

## ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

ГРНТИ 68.05.45

DOI: 10.51886/1999-740X\_2025\_4\_64

А.К. Аманбосын<sup>1</sup>, А.А. Курманбаев<sup>1</sup>

## РОЛЬ БИОЦЕМЕНТАЦИИ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОЧВ И СЕКВЕСТРАЦИИ УГЛЕРОДА

<sup>1</sup>Казахский научно-исследовательский институт почвоведения и агрохимии имени У.У. Успанова, 050060, Алматы, пр. аль-Фараби, 75 В, Казахстан,

e-mail: aamanbossyn@gmail.com

**Аннотация.** Микробиологическое осаждение карбонатов (МОК) представляет собой экологически чистую и перспективную технологию для укрепления грунтов, основанную на активности микроорганизмов, таких как *Sporosarcina pasteurii*, которые способствуют осаждению карбонатов кальция. Этот процесс включает биологическое взаимодействие бактерий с химическими веществами, такими как мочевины и ионы кальция, что приводит к образованию кальцитовых отложений, которые укрепляют структуру грунта, повышая ее прочность, снижая проницаемость и увеличивая устойчивость к эрозии. В статье рассматриваются виды и механизмы биоцементации, а также ключевые факторы, влияющие на эффективность МОК, включая выбор микроорганизмов, условия среды и состав грунта. Описываются методы оптимизации биоцементации для достижения максимальной эффективности, а также рассматриваются различные области применения технологии, такие как улучшение песчаных и слабых глинистых грунтов. Особое внимание уделяется экологическим аспектам, в частности, применению МОК для секвестрации углерода, что способствует долговременному захоронению углерода в почвах и помогает в борьбе с изменением климата. В заключение обсуждаются перспективы дальнейших исследований и возможные направления для расширения применения этой технологии в строительстве и геотехнике.

**Ключевые слова:** микробиологическое осаждение карбонатов, биоцементация, улавливание и хранение углерода, мочевины, карбонат кальция.

## ВВЕДЕНИЕ

В начале 2000-х годов калифорнийские ученые под руководством J.T. DeJong [1] успешно применили способность бактерий *Bacillus pasteurii* к формированию биопленки на частицах грунта, в питательной среде из кальция и мочевины для цементирования грунта за счет заполнения пустот между зёрен минерального материала кальцитом. В 2017 году впервые в Казахстане научные исследования в этой области были начаты А. Курманбаевым и его коллегами, что стало важным вкладом в развитие микробной геотехнологии в стране [2].

Во многих частях мира грунт с плохими инженерными свойствами не пригоден для использования, в первую очередь из-за его нестабильной струк-

туры и низкой механической прочностью. При определенных факторах окружающей среды (сейсмическая активность, цикл заморозания-оттаивания, чередование температур, ливни и наводнения и т.д.) такой грунт может вызвать ряд геотехнических инженерных проблем [3].

Традиционно укрепление грунта осуществляется с помощью механических методов (таких как уплотнение, предварительная нагрузка, вибрация, смачивание, дренаж и др.) или с применением химических и синтетических добавок (например, цемента, извести, летучей золы, промышленных отходов, органических веществ, геосинтетических материалов и др.). Хотя такие методы считаются эффективными, их всё чаще критикуют за дороговизну, высо-

кий расход энергии и вред экологии – они выделяют вредные вещества и углекислый газ. Поэтому сейчас важно разрабатывать новые способы укрепления почв, которые будут не только надёжными, но и дешевыми, безопасными для природы и не потребляющими много энергии [4].

Микробная геотехнология – это новая ветвь геотехнической инженерии. Несмотря на существование различных потенциальных применений микроорганизмов в геотехнической инженерии, в настоящее время перспективные применения сосредоточены преимущественно на биоцементации [5].

Микробно-индуцированное карбонатное осаждение (МОК, в английской версии MICP), является перспективной технологией, применяемой в экологическом строительстве, особенно в борьбе с опустыниванием. Опустынивание – это процесс деградации земель, происходящий в засушливых, полусухих и субгумидных районах под воздействием различных факторов, включая климатические условия и человеческий фактор. Глобальная проблема опустынивания обусловлена как природными, так и антропогенными факторами, такими как изменение климата, ветровая и водная эрозия почвы, стремление к экономической выгоде, уничтожение растительности и нерациональное использование водных ресурсов. Все эти факторы способствуют дальнейшему развитию опустынивания. Поскольку последствия этого явления негативно сказываются на окружающей среде и экономике, контроль над процессом опустынивания имеет критическое значение. Эоловая эрозия – это один из ключевых процессов, воздействующих на пустынные экосистемы по всему миру, делая их уязвимыми к деградации. Большинство пустынь подвержены риску эрозии, особенно в районах с засушливым климатом [4]. Около 12% этих земель подвержены

деградации, что составляет примерно 5 миллионов квадратных километров. Почвы в таких регионах зачастую состоят из рыхлого песка и ила, которые легко поддаются воздействию высокоскоростных ветров, что приводит к поверхностной эрозии [6].

В связи с этим МОК представляет собой особенно перспективный метод для борьбы с опустыниванием за счёт стабилизации рыхлых песчаных почв и предотвращения эоловой эрозии. Её основа – способность микроорганизмов инициировать образование кальцита, который, оседая между частицами грунта, скрепляет их и улучшает механические свойства почвы. Это снижает её уязвимость к ветровой эрозии и повышает устойчивость к внешним воздействиям. Учитывая, что данный подход может быть реализован непосредственно на месте (*in situ*) с минимальными затратами и вмешательством в природную среду, он становится привлекательной альтернативой традиционным способам укрепления почв. Кроме того, как показывают исследования, биоцементация эффективна в различных климатических условиях и на разнообразных типах грунтов, что делает её универсальным инструментом в области устойчивого природопользования и экологического строительства. Таким образом, применение данной технологии открывает новые горизонты в борьбе с деградацией земель и восстановлении экосистем, особенно в уязвимых засушливых и полузасушливых регионах [7].

*Микробно-индуцированное осаждение карбонатов.*

В последние годы микробиологическое упрочнение грунтов (на основе микробно-индуцированного осаждения карбонатов) привлекло значительное внимание как экологически чистый и эффективный способ повышения инженерных характеристик почвы. В его основе лежит способность микроорга-

низмов, особенно уреазы продуцирующих бактерий, катализировать гидролиз мочевины, что приводит к образованию карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ), оседающего между частицами грунта. Образующиеся кристаллы действуют как природный цемент, укрепляя структуру за счёт увеличения сцепления и трения между частицами, а также благодаря снижению проницаемости и повышению устойчивости к эрозионным процессам [8]. В отличие от традиционных методов армирования, данный биотехнологический подход требует минимального вмешательства в окружающую среду. Использование растворов с низкой вязкостью и небольших инъекционных отверстий позволяет легко проникать в пористую структуру почвы, обеспечивая равномерную и глубокую минерализацию [9]. Это делает метод особенно подходящим для задач стабилизации грунтов, защиты от эрозии, герметизации пустот и трещин, а также для долговременного повышения прочности и устойчивости различных инженерных сооружений [10]. Кроме того, благодаря междисциплинарному характеру, объединяющему микробиологию, геохимию и геотехнику, технология рассматривается как перспективное направление в экологически устойчивом строительстве. Современные исследования подтверждают её успешную реализацию в реальных условиях, одновременно подчёркивая необходимость дальнейшего изучения влияния биологических и абиотических факторов, оптимизации процедур обработки и разработки подходов к масштабированию для широкого инженерного использования [11]. Биогеохимический механизм микробно-индуцированного осаждения карбоната кальция основан на специфических метаболических путях определённых микроорганизмов, способных инициировать образование карбонатных соединений, преимущественно  $\text{CaCO}_3$ .

Ключевым отличием данного процесса от природных геохимических циклов является участие бактериальных ферментов, значительно ускоряющих реакции и повышающих их эффективность. Существует несколько метаболических механизмов, посредством которых микроорганизмы стимулируют карбонатную минерализацию:

*Уреолиз.* Наиболее изученным механизмом МОК является уреолиз, при котором бактерии, обладающие уреазной активностью (например, *Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus megaterium*), катализируют гидролиз мочевины ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ) с образованием аммиака ( $\text{NH}_3$ ) и карбоната. Карбамат, промежуточный продукт, спонтанно гидролизуетсся с образованием дополнительного количества аммиака и угольной кислоты. Важным участником этого процесса является также карбоангидраза – фермент, способствующий преобразованию угольной кислоты в бикарбонат, что повышает концентрацию ионов  $\text{CO}_3^{2-}$  в среде [12]. Повышение pH, вызванное уреолизом, способствует ускоренному осаждению  $\text{CaCO}_3$  при наличии ионов кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ).

*Восстановление сульфатов.* Некоторые бактерии, например *Desulfovibrio desulfuricans*, способны восстанавливать сульфаты ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) до сульфидов ( $\text{S}^{2-}$ ) в анаэробных условиях. Этот процесс, известный как диссимиляторное восстановление сульфатов, также увеличивает щелочность среды, создавая благоприятные условия для осаждения карбонатов [13]. Полученные сульфиды могут взаимодействовать с ионами металлов, включая кальций, с образованием устойчивых осадков.

*Восстановление железа.* При участии бактерий, таких как *Geobacter sulfurreducens*, трёхвалентное железо ( $\text{Fe}^{3+}$ ) восстанавливается до двухвалентного ( $\text{Fe}^{2+}$ ), что сопровождается увеличением pH и последующим осаждением карбоната кальция. Этот путь

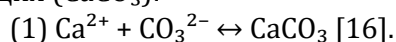
особенно значим в средах с высоким содержанием железа.

**Денитрификация.** Процесс денитрификации осуществляется такими микроорганизмами, как *Pseudomonas denitrificans*, *Alcaligenes*, *Denitrobacillus*, *Thiobacillus*, *Spirillum* и *Micrococcus*. Эти факультативно анаэробные бактерии восстанавливают нитраты ( $\text{NO}_3^-$ ) до молекулярного азота ( $\text{N}_2$ ), при этом поглощаются протоны, что способствует повышению pH и формированию условий для осаждения карбонатов [14].

В отличие от естественных геохимических процессов, МОК происходит гораздо быстрее благодаря участию ферментов, способствующих повышению щёлочности среды и концентрации карбонат-ионов. Такая скорость и возможность контролировать параметры делают технологию крайне перспективной для биоремедиации, стабилизации грунтов, снижения риска разжижения, ремонта бетона и даже связывания углерода [15].

#### *Механизм минерализации МОК.*

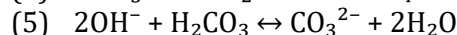
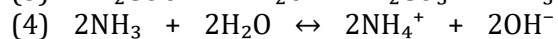
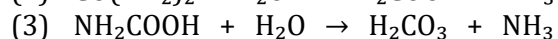
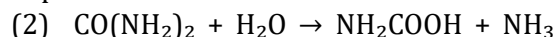
Микробиологическое осаждение карбонатов – это процесс, при котором микроорганизмы, используя различные метаболические пути, способствуют образованию карбонат-ионов ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), которые в присутствии ионов кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ) осаждаются в виде карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ):



Если осаждение происходит в порах между минеральными частицами, они могут соединяться между собой, образуя прочную цементирующую структуру. МОК может осуществляться как за счёт автотрофных, так и гетеротрофных метаболических путей [17]. Среди всех механизмов уреолитического путь является наиболее широко применяемым из-за простоты культивирования бактерий, устойчивости в слож-

ных питательных средах и легкости контроля метаболизма [18].

Биохимические реакции уреолитического пути: Во время уреолитического МОК одна молекула мочевины гидролизуется внутриклеточно ферментом уреазой с образованием одной молекулы аммиака и одной молекулы карбаминовой кислоты:



Повышение pH в микроокружении клеток происходит за счёт выхода аммиака и образования гидроксид-ионов, что сдвигает равновесие угольной кислоты в сторону образования карбонат-ионов. Это создаёт условия, благоприятные для осаждения  $\text{CaCO}_3$  [19].

Как показано на рисунке 1а, эти процессы можно обобщить следующим образом: сначала бактерии выделяют уреазу, затем происходит гидролиз мочевины с образованием аммиака и карбоната, сопровождающийся увеличением pH, что способствует осаждению карбоната кальция в кальцийсодержащей среде [20].

В результате образуется осадок  $\text{CaCO}_3$ , который может связывать частицы породы, улучшая механические свойства грунта.

**Факторы оптимизации биоцементации.**

Для повышения эффективности метода микробно-индуцированного осаждения карбонатов в стабилизации грунтов и улучшении их инженерных характеристик необходимо учитывать ряд ключевых факторов. Эти параметры критичны для формирования прочной, стабильной и равномерной цементирующей матрицы. Ниже представлены основные из них.

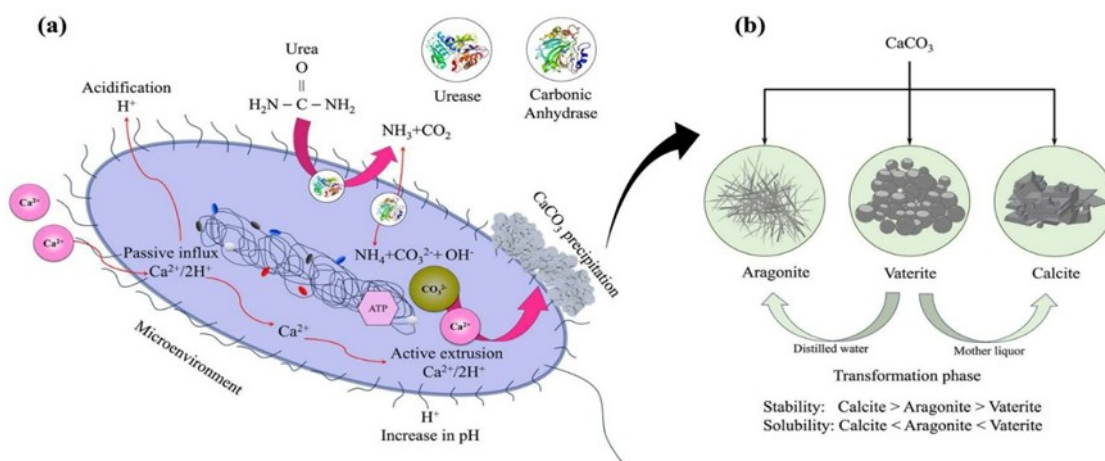


Рисунок 1 – Схематическое изображение:

- (a) процесса МОК (микробиологическое осаждение карбонатов),  
 (b) трёх форм полиморфов  $\text{CaCO}_3$  (карбоната кальция) [21]

Влияние бактериальных штаммов и концентрации бактерий на процесс МОК.

Выбор бактериального штамма является ключевым фактором, определяющим успешность процесса биоцементации. Бактерии играют важную роль в расщеплении мочевины и других органических соединений, высвобождая ионы углекислоты ( $\text{CO}_3^{2-}$  и  $\text{HCO}_3^-$ ), которые, взаимодействуя с кальцием, образуют карбонат кальция ( $\text{CaCO}_3$ ), цементирующий частицы почвы. Концентрация бактерий также имеет важное значение, влияя на насыщение  $\text{CO}_3^{2-}$  и параметры роста кристаллов как на микро-, так и на макроуровне, что, в свою очередь, определяет прочностные характеристики и геометрию образующихся минералов.

**Бактериальные штаммы:** для эффективного осаждения карбонатов часто используют штаммы с высокой уреазной активностью, такие как *Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus* spp., *Spodoptera* spp. Эти бактерии обладают способностью эффективно расщеплять мочевины, выделяя аммиак и углекислый газ, что способствует созданию щелочной среды, необходимой для образования

карбоната кальция. Например, S. Jain и её коллеги [22] применили *Sporosarcina pasteurii* и изолированные виды *Proteus* в концентрациях от  $1 \times 10^6$  до  $1 \times 10^8$  клеток/мл, наблюдая увеличение кластеров кристаллов карбоната кальция и повышение прочности и проницаемости песка. Аналогично, Лю и др. использовали *Bacillus pasteurii* в глиняных колоннах, что привело к увеличению толщины образца и снижению водопоглощения при повышении концентрации бактерий [23].

**Зависимость от условий среды:** эффективность бактерий значительно зависит от условий окружающей среды, таких как pH, температура, концентрация кислорода и солей. Например, *Sporosarcina pasteurii* наиболее эффективно работает в нейтральной или слегка щелочной среде (pH 7–9) и при температуре около 30°C. Эти условия оптимальны для расщепления мочевины и формирования стабильных карбонатных кристаллов [24].

Как показывают исследования, повышение концентрации бактерий приводит к ускорению разложения мочевины и интенсификации осаждения карбоната кальция, что увеличи-

вает количество зон минерализации. Dong Z. H. и др. установили, что увеличение оптической плотности культур *Bacillus pasteurii* положительно коррелирует с ростом предела прочности при одноосном сжатии (ПРОС) [25]. При низких концентрациях бактерий образуются более крупные кристаллы карбоната кальция, которые могут трансформироваться из ватерита в кальцит, что влияет на тип и геометрию минеральных образований [26].

*Влияние концентрации цементирующего раствора и источников кальция на процесс МОК.*

Использование уреазы-гидролизующих бактерий для МОК требует мочевины и солей кальция, образующих цементирующий раствор. Концентрация этого раствора и источник кальция критически влияют на выход карбоната кальция, распределение размеров кристаллов, активность уреазы и механические свойства почвы. Уреазы катализируют разложение мочевины, образуя аммиак и повышая pH. Однако высокая щелочность может денатурировать белки уреазы, в то время как чрезмерные концентрации  $\text{Ca}^{2+}$  препятствуют транспортировке сырья и активности уреазы [27]. Таким образом, оптимизация концентрации цементирующего раствора имеет важное значение для эффективной минерализации и экономической эффективности.

Правильный выбор концентрации цементирующего раствора (содержащего кальций и углерод) оказывает значительное влияние на скорость осаждения карбоната кальция и прочность образующейся структуры. Раствор обычно содержит источники кальция (например,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) и углерода (например, мочевина или  $\text{NaHCO}_3$ ). Источник кальция снабжает почву ионами кальция, которые в сочетании с углеродными ионами образуют карбонат кальция. Однако концентрация этих компонентов должна быть

оптимальной, чтобы избежать токсичности для бактерий или недостаточной осадочной активности.

Согласно проведенным исследованиям, хлорид и нитрат кальция значительно способствуют улучшению цементации песчаных грунтов, тогда как ацетат кальция демонстрирует меньшую эффективность [28]. Для достижения оптимальных результатов в процессе биоцементации важно подобрать подходящую концентрацию цементирующего раствора. Установлено, что раствор с концентрацией 0,5 моль/л обеспечивает наилучший эффект, увеличивая содержание карбоната кальция на 2,78% и повышая прочность на одноосное сжатие (ПРОС) до 2,436 МПа. Хотя при концентрации 2,5 моль/л наблюдается максимальное образование  $\text{CaCO}_3$  и усиление сцепления между частицами почвы, чрезмерно высокая концентрация ингибирует уреазную активность, что снижает скорость минерализации. Переизбыток мочевины вызывает резкое повышение pH, подавляющее бактериальную активность, а также увеличивает осмотическое давление, нарушая транспорт питательных веществ и провоцируя стрессовые реакции у микроорганизмов [26].

Таким образом, слишком низкие концентрации компонентов замедляют процесс осаждения карбоната кальция и не обеспечивают должного укрепления почвы, в то время как чрезмерные концентрации могут быть токсичными для бактерий, что снижает эффективность биоцементации. Обычно оптимальные концентрации компонентов (например, 0,5 М) обеспечивают хорошее соотношение между активностью бактерий и количеством осаждаемого карбоната кальция, улучшая прочностные характеристики почвы [29].

Кроме того, высокая концентрация раствора способствует образованию более прочных цементирующих связей, улучшая механические свойства

материала и снижая его проницаемость для воды, что играет ключевую роль в стабилизации грунта и его улучшении для применения в строительных и инженерных проектах [30]. В целом, хотя методы МОК демонстрируют различные оптимальные концентрации цементирующего раствора, выбор подходящей концентрации имеет решающее значение для улучшения механических свойств и стабильности почвы. Будущие исследования должны изучить оптимальные концентрации и биохимическую кинетику в различных условиях для улучшения практических приложений.

#### *Инкубационный период.*

Инкубация необходима для обеспечения роста бактерий и активного участия микробов в процессе осаждения карбоната кальция.

*Длительность инкубации:* оптимальное время инкубации зависит от конкретного штамма бактерий, условий среды и физических характеристик почвы. В общем, инкубационный период может варьироваться от 14 до 28 дней. Чем дольше бактерии имеют возможность размножиться и осадить карбонат кальция, тем прочнее и стабильнее становится почвенная структура [31].

*Роль инкубационного периода:* во время инкубации бактерии продолжают расщеплять мочевину, выделяя углекислый газ, который способствует образованию карбоната кальция. Бактерии также начинают активно взаимодействовать с частицами почвы, улучшая их сцепление и стабилизируя грунт [32].

*Влияние температуры на процесс МОК и осаждение карбоната кальция.*

Технология МОК включает в себя быстрый процесс сопряжения биохимических реакций и бактериального метаболизма в пористой среде. Колебания температуры существенно влияют на процесс микробиологической цементации грунтов через различные

механизмы, включая динамику роста бактерий, скорость метаболических реакций и активность уреазы [33]. Эти параметры напрямую воздействуют на скорость образования, выход, размер и морфологию кристаллов карбоната кальция, что, в свою очередь, обуславливает различия в эффективности обработки почвы данным биотехнологическим методом.

Широко признано, что активность уреазы обычно увеличивается при температурах от 0 до 30°C [34]. Например, *Sporosarcina pasteurii*, распространенная бактерия в процессе МОК, показывает пиковую активность при 30 °C. Практические приложения должны учитывать комплексное влияние температуры на жизнеспособность бактерий. Низкие температуры (4°C) препятствуют росту и прикреплению бактерий, снижая осаждение карбоната кальция, тогда как высокие температуры (50°C) быстро снижают активность уреазы. Несмотря на температурные проблемы, повторные инъекции бактерий поддерживают значительную эффективность цементации.

Исследования кристаллизации показывают преобладание ватерита при 4°C и кальцита при 50°C [35]. Почва, обработанная МОК, показала самый высокий ПРОС при 25°C, несмотря на равные количества карбоната кальция. Это несоответствие объясняется влиянием температуры на размер кристаллов и кинетику связывания. При 50°C более мелкие кристаллы (2–5 мкм) действуют как защитные слои вокруг частиц почвы, препятствуя цементации между частицами. Напротив, более крупные кристаллы (15–20 мкм) при температуре 25°C заполняют пустоты и образуют прочные связи, улучшая механические свойства почвы [36].

Температура также оказывает значительное влияние на растворимость кальциевых солей и диффузию реаген-

тов, что влияет на процесс осаждения карбоната кальция. Например, высокие температуры могут увеличить растворимость карбонатов, что ускоряет образование стабильных кристаллов и влияет на скорость осаждения. Температура регулирует активность уреазы – фермента, который расщепляет мочевины, а также влияет на скорость осаждения карбонатов. При температуре около 30°C активность уреазы максимальна, что способствует интенсивному осаждению карбоната кальция. Однако при температурах выше 40°C активность бактерий может значительно снизиться.

Таким образом, температура играет ключевую роль в процессе МОК, регулируя как метаболизм бактерий, так и растворимость карбонатов, что в свою очередь влияет на конечный результат осаждения карбоната кальция и механические свойства обработанных почв [34].

#### *Тип почвы.*

Тип почвы и её физико-химические характеристики имеют решающее значение для эффективности процесса биоцементации.

*Размер частиц:* МОК наиболее эффективен в песчаных и супесчаных почвах, так как их крупные частицы обеспечивают более хорошее проникновение раствора и активное взаимодействие с бактериями. Почвы с более мелкими частицами, такие как глинистые почвы, могут требовать дополнительных методов обработки, таких как добавление песка для улучшения проницаемости [35].

*Гидравлическая проводимость:* почвы с высокой гидравлической проводимостью обеспечивают более равномерное распределение раствора, что способствует лучшему осаждению карбоната кальция. В глинистых и сильно уплотнённых почвах может потребоваться предварительная подготовка или добавление инертных

материалов для повышения проницаемости [37].

*Органические вещества:* наличие органических веществ в почве может воздействовать на активность бактерий и процесс цементирования. В некоторых случаях органические вещества могут препятствовать процессу осаждения карбоната кальция, снижая эффективность биоцементации [38].

Процесс микробно-индуцированного осаждения карбоната кальция инициируется путем введения в целевую среду специализированных микробных культур, которые взаимодействуют с растворами, содержащими ионы кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ) и источники карбонат-ионов ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Эти микроорганизмы, в том числе *Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus megaterium* и *Lysinibacillus fusiformis*, благодаря уреазной активности метаболизируют соединения углерода, продуцируя карбонат кальция в виде осадка. Обычно процесс развивается в течение 1–5 суток и приводит к накоплению прочных карбонатных структур, что способствует укреплению почвы и связыванию углерода [39].

*Роль мочевины и путь к углеродно-нейтральному МОК.*

Ключевым элементом уреолитического метаболического пути в технологии микробиологического упрочнения грунтов является мочевина, однако вопрос о её экологически устойчивом происхождении остаётся нерешённым. В настоящее время этот компонент в основном синтезируется из аммиака (производимого из природного газа) и углекислого газа – процесс, сопряжённый с существенными выбросами парниковых газов. Это ставит под сомнение экологическую целесообразность традиционного подхода к биоцементации в условиях глобальной борьбы с климатическими изменениями. Современные научные работы предлагают интегрировать в производство мочевины технологии улавливания и длительного

хранения CO<sub>2</sub>. Одним из перспективных направлений является применение прямого извлечения углекислого газа из атмосферы, что позволяет создать замкнутый цикл: тот же CO<sub>2</sub>, который извлекается из воздуха, используется как сырьё для получения мочевины, применяемой в почвенном упрочнении [40]. Другой подход заключается в синтезе так называемой «зелёной» мочевины – посредством прямой химической реакции между захваченными CO<sub>2</sub> и азотом (N<sub>2</sub>) из дымовых газов, что позволяет существенно снизить выбросы в процессе производства. Дополнительно, технология «зелёного» аммиака, основанная на использовании возобновляемых источников энергии, может служить фундаментом для создания устойчивой системы получения мочевины. Одним из наиболее простых и потенциально эффективных решений также является разработка биореакторов, способных поглощать атмосферный CO<sub>2</sub> с последующим использованием полученного сырья в биоцементации. При этом взаимодействие уреазных бактерий с углекислым газом в контролируемых условиях не только укрепляет почвенные структуры, но и способствует активному биозахвату углерода, что делает данный метод важным вкладом в достижение целей по углеродной нейтральности [41].

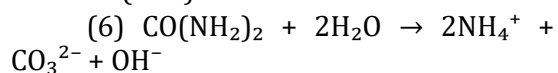
*Оценка эффективности улавливания CO<sub>2</sub> в процессе МОК.*

Хотя уреолитический механизм микробиологической цементации не предусматривает прямого улавливания атмосферного CO<sub>2</sub>, данный процесс тем не менее способствует его секвестрации за счёт образования устойчивых карбонатных соединений. Углерод фиксируется в осадочных формах, преимущественно в виде карбоната кальция (CaCO<sub>3</sub>), в результате биохимических реакций, инициируемых метаболической активностью уреазных микроор-

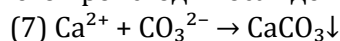
ганизмов. Благодаря этому биотехнология может рассматриваться как эффективный инструмент непрямого захвата углерода, способствующий реализации стратегии углеродной нейтральности.

Процесс можно условно разделить на две последовательные стадии:

*Гидролиз мочевины:* Уреаза, продуцируемая бактериями (например, *Sporosarcina pasteurii*), катализирует реакцию гидролиза мочевины, в результате которой образуются ионы аммония (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), карбонат-анионы (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) и гидроксид-анионы (OH<sup>-</sup>):



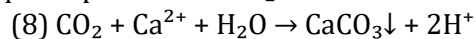
*Осаждение карбоната кальция:* Образовавшиеся ионы CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> взаимодействуют с ионами кальция (Ca<sup>2+</sup>), присутствующими в растворе, в результате чего происходит осаждение CaCO<sub>3</sub>:



На этом этапе происходит минеральная фиксация углерода в устойчивой форме, что и рассматривается как ключевой механизм секвестрации CO<sub>2</sub> в технологии МОК [42].

*Стехиометрическая оценка улавливания CO<sub>2</sub>.*

Для количественной оценки потенциала улавливания углекислого газа можно использовать упрощённый стехиометрический подход, основанный на эквивалентности между количеством осаждённого CaCO<sub>3</sub> и количеством зафиксированного CO<sub>2</sub>:



Согласно данной реакции, один моль CO<sub>2</sub> (молярная масса 44,01 г/моль) участвует в образовании одного моля CaCO<sub>3</sub> (молярная масса ~100,09 г/моль). Это означает, что на каждый моль осаждённого карбоната кальция МСР фиксирует 44,01 г CO<sub>2</sub>.

Таким образом, можно сделать вывод: Процесс МОК улавливает примерно 44 грамма CO<sub>2</sub> на каждый моль образовавшегося CaCO<sub>3</sub>.

Этот показатель может быть использован как основа для дальнейших расчётов при масштабировании технологии, например, в инженерных проектах по стабилизации грунтов или в системах биоцементации, ориентированных на снижение углеродного следа [41].

*Практическое значение.*

Хотя в химических уравнениях уреолиза участие атмосферного  $\text{CO}_2$  не очевидно, реальная секвестрация углерода происходит за счёт утилизации углерода, ранее введённого в систему в виде мочевины или  $\text{CO}_2$ , полученного через устойчивые источники, включая улавливание выбросов или прямое извлечение из атмосферы. В совокупности с инновациями в производстве «зелёной мочевины», описанными выше, это делает технологию МОК мощным инструментом в арсенале устойчивого строительства и биогеохимического управления углеродом.

*Преимущества технологии МОК в контексте улавливания и хранения углерода.*

Технология МОК демонстрирует значительные преимущества в качестве метода улавливания и долговременного хранения углекислого газа. В отличие от традиционных промышленных подходов, она опирается на естественные биогеохимические процессы, не требующие высоких энергозатрат или масштабной инфраструктуры. Это делает методику не только экономически целесообразной, но и экологически устойчивой альтернативой [43].

Одним из ключевых достоинств микробиологической цементации грунтов является широкое распространение задействованных микроорганизмов – в первую очередь уреазы продуцирующих бактерий – в природной среде, что существенно снижает потребность в их лабораторном культивировании. Процесс минерализации протекает при умеренных температурах и в условиях низкого энергопотребления, в резуль-

тате чего углерод связывается в виде стабильного соединения – карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ).

Образующиеся в ходе МОК карбонатные отложения обладают высокой стабильностью и способны сохранять зафиксированный углерод на протяжении геологических временных масштабов. Это подтверждается существованием природных аналогов – таких как известняк, доломит и меловые породы, служащих естественными хранилищами углерода миллионы лет. Таким образом, технология микробной минерализации  $\text{CO}_2$  рассматривается как перспективное направление минеральной секвестрации, способствующее его долговременному исключению из глобального углеродного цикла [44].

*Применение в строительстве и геотехнической инженерии.*

Благодаря универсальности, технология МОК может быть адаптирована в различных инженерных и промышленных секторах. В геотехнической инженерии она применяется для укрепления слабых грунтов, повышения несущей способности оснований, а также для стабилизации откосов и склонов [24]. Инъекция бактериальных растворов в грунт способствует осадению карбонатов в порах, образуя цементоподобные соединения, повышающие прочность и стабильность конструкций.

В строительстве МОК может использоваться для создания биоцемента, где микроорганизмы, внесённые в бетонную смесь, способствуют улавливанию  $\text{CO}_2$  во время твердения. Этот зафиксированный углерод остаётся в структуре материала на протяжении всего срока службы объекта. Такой подход может существенно снизить углеродный след строительной отрасли, особенно в контексте замены традиционного портландцемента, производство которого сопровождается значительными выбросами  $\text{CO}_2$  [44].

*МОК как средство повышения герметичности геологических формаций.*

В контексте геологической секвестрации углерода микробиологическая технология упрочнения грунтов демонстрирует высокий потенциал в повышении герметичности подземных хранилищ, особенно благодаря способности заполнять и закупоривать поры и трещины в горных породах. Уреазные бактерии способствуют осаждению карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ) непосредственно в микроскопических разломах, что существенно снижает проницаемость породы и эффективно блокирует возможные пути утечки  $\text{CO}_2$  [45].

К числу значимых преимуществ относится возможность локального применения технологии: процесс может быть избирательно активирован в зонах, где имеются потенциальные риски нарушений герметичности. Это делает метод высокоточным и управляемым, в отличие от традиционных средств изоляции [46]. Кроме того, все компоненты, участвующие в процессе – мочевины, ионы кальция и микроорганизмы – экологически безопасны, что дополнительно подчёркивает устойчивость биоцементационного подхода.

*Промышленные и экологические применения.*

Помимо применения в геотехнических и строительных отраслях, технология микробиологической цементации может быть эффективно использована в нефтегазовой промышленности, например, для обработки углеродсодержащих выбросов и отходов. В этом контексте микробная обработка потоков, насыщенных  $\text{CO}_2$ , способствует его минерализации в виде карбонатов, превращая вредные выбросы в полезные минеральные продукты, которые могут быть использованы повторно или проданы на рынке.

Таким образом, метод микробиологической минерализации углерода представляет собой не только способ сокращения углеродного следа, но и

инновационный подход к использованию  $\text{CO}_2$  как ценного ресурса. Многофункциональность технологии делает её особенно перспективной в условиях глобальных вызовов по обеспечению климатической устойчивости [44].

*Применение МІСР в удалении тяжёлых металлов из почвы и воды.*

В дополнение к этому технология биоцементации используется для удаления тяжелых металлов из почвы и воды. Микробно-индуцированное осаждение карбонатов представляет собой эффективный биологический процесс, при котором уреазы продуцирующие бактерии разлагают мочевины, повышая рН и способствуя образованию карбонат-ионов. Эти ионы взаимодействуют с тяжелыми металлами, такими как стронций и барий, вызывая их осаждение в виде нерастворимых карбонатов. Таким образом, МІСР может применяться для очистки загрязнённых почв и сточных вод, эффективно связывая и выводя тяжёлые металлы из окружающей среды [46].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Микробно-индуцированное осаждение карбонатов – перспективная технология для достижения углеродной нейтральности, преобразующая  $\text{CO}_2$  в стабильные минеральные формы. Несмотря на вызовы, такие как необходимость оптимизации процессов и масштабирования, МОК представляет собой экономически эффективное решение для улавливания углерода.

Для повышения устойчивости технологии важно пересмотреть источники реагентов (мочевина, кальций, углерод) и способы энергоснабжения. Использование экологически безопасных альтернатив, таких как «зелёный» аммиак и возобновляемая энергия, может значительно снизить углеродный след. Это сделает МОК не только климатически нейтральным, но и активным инструментом в борьбе с изменением климата.

Необходимы дальнейшие исследования для раскрытия полного потенциала МОК и его внедрения в практику. Ключевые рекомендации включают изучение воздействия на микроорганизмы в почве, повышение эффективности при смягчении пылевых бурь, исследование долговечности и устойчивости к климатическим изменениям, а также использование дешевых альтер-

нативных субстратов и интеграцию с другими методами стабилизации почвы.

В долгосрочной перспективе МОК может стать важной технологией для улучшения качества почвы, борьбы с эрозией и улавливания углерода, но для этого нужны дополнительные исследования и оптимизация процессов.

#### REFERENCES

1. DeJong J.T., Mortensen B.M., Martinez B.C., Nelson D.C. Biomediated soil improvement// *Ecological Engineering*. – 2010. – Vol. 36, № 2. – P. 197–210.
2. Kurmanbaev A.A., Nagmetova G.Zh., Bizhanova L.Zh., et al. Isolation of ureolytic bacteria promising for microbiologically induced calcium carbonate precipitation// *Actual Problems of Humanities and Natural Sciences*. – 2017. – Vol. 4, № 1.
3. Patil M., Dalal P.H., Shreedhar S., Dave T.N., Iyer K.R.K. Biostabilization techniques and applications in civil engineering: State-of-the-art// *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 309. – Article ID 125098.
4. Ta Tang C.-S., Yin L.-Y., Jiang N.-J., Zhu C., Zeng H., Li H., Shi B. Factors affecting the performance of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) treated soil: a review// *Environmental Earth Sciences*. – 2020. – Vol. 79. – Article № 94.
5. Karol R.H. *Chemical grouting and soil stabilization*. 3rd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2003.
6. Burrell A.L., Evans J.P., De Kauwe M.G. Anthropogenic climate change has driven over 5 million km<sup>2</sup> of drylands towards desertification// *Nature Communications*. – 2020. – Vol. 11. – Article № 3853.
7. Harran R., Terzis D., Laloui L. Mechanics, modeling, and upscaling of biocemented soils: A review of breakthroughs and challenges// *International Journal of Geomechanics*. – 2023. – Vol. 23, № 9.
8. Zhang Y.S., Liu Y., Sun X.D., Zeng W., Xing H.P., Lin J.Z., Kang S.B., Yu L. Application of microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) technique in concrete crack repair: A review// *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 359. – Article № 134313.
9. Bhutange S.P., Latkar M.V., Muhammad S. A review on the potential challenges in the application of biocementation in cement-based materials, possible solutions and way forward// *Materials Today Communications*. – 2024. – Vol. 38. – Article № 107986.
10. Kumar A., Song H.-W., Mishra S., Zhang W., Zhang Y.-L., Zhang Q.-R., Yu Z.-G. Application of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) techniques to remove heavy metal in the natural environment: A critical review// *Chemosphere*. – 2023. – Vol. 318. – Article № 137894.
11. Sun X., Wai O.W.H., Xie J., Li X. Biomineralization to prevent microbially induced corrosion on concrete for sustainable marine infrastructure// *Environmental Science & Technology*. – 2023. – Vol. 58, № 1. – P. 522–533.

12. Saracho A.C., Marek E.J. Uncovering the dynamics of urease and carbonic anhydrase genes in ureolysis, carbon dioxide hydration, and calcium carbonate precipitation// *Environmental Science & Technology*. – 2024. – Vol. 58, № 2. – P. 1199–1210.
13. Zhu T., Dittrich M. Carbonate precipitation through microbial activities in natural environment, and their potential in biotechnology: A review// *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. – 2016. – Vol. 4. – Article 4.
14. Jain S., Fang C., Achal V. A critical review on microbial carbonate precipitation via denitrification process in building materials// *Geotechnical and Geological Engineering*. – 2021. – Vol. 39. – P. 7529–7551.
15. Lai H., Ding X., Cui M., Zheng J., Chen Z., Pei J., Zhang J. Mechanisms and influencing factors of biomineralization-based heavy metal remediation: A review// *Biogeotechnics*. – 2023. – Vol. 1, № 4. – Article 100039.
16. Mondal S., Ghosh A.D. Review on microbial induced calcite precipitation mechanisms leading to bacterial selection for microbial concrete// *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 225. – Article 115236.
17. Castanier S., Le Métayer-Levrel G., Perthuisot J.-P. Bacterial roles in the precipitation of carbonate minerals// In: Riding R.E., Awramik S.M. (eds.) *Microbial sediments*. – Vol. 5. – Berlin: Springer, 2000. – P. 32–39.
18. Dhama N.K., Reddy M.S., Mukherjee A. Biomineralization of calcium carbonate polymorphs by the bacterial strains isolated from calcareous sites// *Journal of Microbiology and Biotechnology*. – 2013. – Vol. 23, № 5. – P. 707–714.
19. Anbu P., Kang C.-H., Shin Y.-J., So J.-S. Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications// *SpringerPlus*. – 2016. – Vol. 5. – Article 250.
20. Wang Y.N., Li S.K., Li Z.Y., Garg A. Exploring the application of the MICP technique for the suppression of erosion in granite residual soil in Shantou using a rainfall erosion simulator// *Acta Geotechnica*. – 2023. – Vol. 18. – P. 3273–3285.
21. Payan M., Khoshdel Sangdeh M., Salimi M., Zanganeh Ranjbar P., Arabani M., Hosseinpour I. A comprehensive review on the application of microbially induced calcite precipitation (MICP) technique in soil erosion mitigation as a sustainable and environmentally friendly approach// *Results in Engineering*. – 2024. – Article 103235.
22. Jain S. Influence of biomass and chemicals on kinetics of ureolysis-based carbonate biomineral precipitation// *Environmental Earth Sciences*. – 2024. – Vol. 83. – Article 58.
23. Liu S.Y., Wang R.K., Yu J., Peng X.Q., Cai Y.Y., Tu B.X. Effectiveness of the anti-erosion of an MICP coating on the surfaces of ancient clay roof tiles// *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 243. – Article 118202.
24. Rui Y.F., Qian C.X. Characteristics of different bacteria and their induced biominerals// *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2022. – Vol. 115. – P. 488–502.
25. Dong Z.H., Pan X.H., Tang C.S., Wang D.L., Wang R., Shi B. An efficient microbial sealing of rock weathering cracks using bio-carbonation of reactive magnesia cement// *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 352. – Article 130038.
26. Haouzi F.Z., Esnault-Filet A., Courcelles B. Optimization of microbially induced calcite precipitation (MICP) protocol against erosion// *Environmental Geotechnics*. – 2020.
27. Siddhartha M., Bikas S.R., Joydeep M. Effect of biologically induced cementation via ureolysis in stabilization of silty soil// *Geomicrobiology Journal*. – 2021. – Vol. 39, № 1. – P. 1–9.

28. Lv C., Tang C.S., Zhang J.Z., Pan X.H., Liu H. Effects of calcium sources and magnesium ions on the mechanical behavior of MICP-treated calcareous sand: Experimental evidence and precipitated crystal insights// *Acta Geotechnica*. – 2022. – Vol. 18, № 5. – P. 1623–1635.
29. Zheng X.G., Lu X.Y., Zhou M., Huang W., Zhong Z.T., Wu X.H., Zhao B.Y. Experimental study on mechanical properties of root-soil composite reinforced by MICP// *Materials*. – 2022. – Vol. 15, № 10. – Article 3586.
30. Hu Q.Z., Wang Z.K. Experimental study on microbial solidification of gravel-containing silty clay under different calcium sources// *Geofluids*. – 2022.
31. Prongmanee N., Horpibulsuk S., Dulyasucharit R., Noulmanee A., Boueroy P., Chancharoonpong C. Novel and simplified method of producing microbial calcite powder for clayey soil stabilization// *Geomechanics and Energy Environment*. – 2023. – Vol. 35. – Article 100480.
32. Vaskevicius L., Malunavicius V., Jankunec M., Lastauskiene E., Talaikis M., Mikoliunaite L., Maneikis A., Gudiukaite R. Insights in MICP dynamics in urease-positive *Staphylococcus* sp. H6 and *Sporosarcina pasteurii* bacterium// *Environmental Research*. – 2023. – Vol. 234. – Article 116588.
33. Liu B., Xie Y.H., Tang C.S., Pan X.H., Jiang N.J., Singh D.N., Cheng Y.J., Shi B. Bio-mediated method for improving surface erosion resistance of clayey soils// *Engineering Geology*. – 2021. – Vol. 19. – Article 106295.
34. Yi H.H., Zheng T.W., Jia Z.R., Su T., Wang C.G. Study on the influencing factors and mechanism of calcium carbonate precipitation induced by urease bacteria// *Journal of Crystal Growth*. – 2021. – Vol. 564. – Article 126113.
35. Wang Q., Miao Q.M., Liu F., Wang X.W., Xu Q.Y. Coupled effect of microbiologically induced calcium carbonate and biofilms in leachate// *Journal of Environmental Management*. – 2022. – Vol. 324. – Article 116350.
36. Cheng L., Shahin M.A., Mujah D. Influence of key environmental conditions on microbially induced cementation for soil stabilization// *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 2017. – Vol. 143, № 1. – Article 04016083.
37. Ji X.L., Tang C.S., Pan X.H., Cheng Y.J., Shi B. Enhancing biocementation performance in low permeability clayey soil through sand column strategy// *Catena*. – 2024. – Vol. 245. – Article 108301.
38. Al-Salloum Y., Abbas H., Sheikh Q.I., Hadi S., Alsayed S., Almusallam T. Effect of some biotic factors on microbially-induced calcite precipitation in cement mortar// *Saudi Journal of Biological Sciences*. – 2017. – Vol. 24, № 2. – P. 286–294.
39. Li J., Tian L.J., Xu Y., Tian Z.F., Zhang Z.D. Study on the solidification effect of dredger fill by microbial-induced calcium precipitation (MICP)// *Materials*. – 2022. – Vol. 22, № 15. – Article 7891.
40. Milani D., Kiani A., Haque N., Giddey S., Feron P. Green pathways for urea synthesis: A review from Australia's perspective// *Sustainable Chemistry for Climate Action*. – 2022. – Vol. 1. – Article 100008.
41. Salmon N., Bañares-Alcántara R. Green ammonia as a spatial energy vector: A review// *Sustainable Energy & Fuels*. – 2021. – Vol. 5, № 11. – P. 2814–2839.
42. Fang C., Achal V. Enhancing carbon neutrality: A perspective on the role of Microbially Induced Carbonate Precipitation (MICP)// *Biogeotechnics*. – 2024. – Vol. 2, № 2. – Article 100083.

43. Achal V., Mukherjee A., Kumari D., Zhang Q. Biomineralization for sustainable construction: A review of processes and applications// *Earth-Science Reviews*. – 2015. – Vol. 148. – P. 1–17.

44. Phillips A.J., Lauchnor E., Eldring J., Esposito R., Mitchell A.C., Gerlach R., Cunningham A.B., Spangler L.H. Potential CO<sub>2</sub> leakage reduction through biofilm-induced calcium carbonate precipitation// *Environmental Science & Technology*. – 2013. – Vol. 47, № 1. – P. 142–149.

45. Tveit S., Pettersson P., Landa-Marbán D. Optimizing sealing of CO<sub>2</sub> leakage paths with microbially induced calcite precipitation under uncertainty// In: *ECMOR XVII – 17th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery*. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. – P. 1–12.

46. Li M., Cheng X., Guo H. Heavy metal removal by biomineralization of urease producing bacteria isolated from soil// *International Biodeterioration and Biodegradation*. – 2013. – Vol. 76. – P. 81–85.

#### ТҮЙІН

А.К. Аманбосын<sup>1</sup>, А.А. Курманбаев<sup>1</sup>

#### БИОЦЕМЕНТАЦИЯНЫҢ ТОПЫРАҚТЫ НЫҒАЙТУ МЕН КӨМІРТЕКТІ САҚТАУ МӘСЕЛЕЛЕРІНДЕГІ МАҢЫЗЫ

<sup>1</sup>Ө.О. Оспанов атындағы Қазақ топырақтану және агрохимия ғылыми-зерттеу институты, 050060, Алматы, Әл-Фараби даңғылы, 75 В, Қазақстан,

e-mail: aamanbossyn@gmail.com

Микробиологиялық карбонат тұндыру (МКТ) - топырақты нығайту үшін микроорганизмдердің, атап айтқанда *Sporosarcina pasteurii* бактериясының белсенділігіне негізделген, экологиялық таза әрі болашағы зор технология. Бұл үдеріс бактериялардың мочевины мен кальций иондары сияқты химиялық заттармен өзара әрекеттесуін қамтиды, соның нәтижесінде кальцит тұнбалары түзіліп, топырақ құрылымы нығаяды. Мұның нәтижесінде топырақтың беріктігі артып, өткізгіштігі төмендейді және эрозияға төзімділігі күшейеді. Мақалада биоцементация түрлері мен механизмдері, сондай-ақ МКТ тиімділігіне әсер ететін негізгі факторлар - микроорганизмдерді таңдау, орта жағдайлары және топырақ құрамы қарастырылады. Биоцементацияның тиімділігін арттыру әдістері сипатталып, технологияның құмды және әлсіз сазды топырақтарды жақсартудағы қолдану аясы талқыланады. Әсіресе экологиялық аспектілерге, соның ішінде көміртекті секвестрлеуге арналған МКТ қолдануына ерекше назар аударылған, бұл көміртекті топырақта ұзақ мерзімді сақтауға мүмкіндік береді және климаттың өзгеруімен күреске үлес қосады. Қорытындыда болашақ зерттеулердің бағыттары мен осы технологияны құрылыс және геотехника салаларында кеңінен қолдану мүмкіндіктері сөз болады.

*Түйінді сөздер:* микробиологиялық карбонат тұндыру, биоцементация, көміртекті аулау және сақтау, мочевины, кальций карбонаты.

#### SUMMARY

A.K. Amanbossyn<sup>1</sup>, A.A. Kurmanbayev<sup>1</sup>

#### THE ROLE OF BIOCEMENTATION IN ADDRESSING SOIL STABILIZATION AND CARBON SEQUESTRATION ISSUES

<sup>1</sup>U.U. Uspanov Kazakh Research Institute of Soil Science and Agrochemistry, 050060, Almaty, 75 V, Al-Farabi Ave., Kazakhstan, e-mail: aamanbossyn@gmail.com

Microbiologically induced carbonate precipitation (MICP) is an environmentally friendly and promising technology for soil stabilization, based on the activity of microorganisms such as *Sporosarcina pasteurii*, which promote the precipitation of calcium carbonates. This process involves the biological interaction of bacteria with chemical compounds such as urea and calcium

ions, resulting in the formation of calcite deposits that reinforce soil structure by increasing its strength, reducing permeability, and improving erosion resistance. The article discusses the types and mechanisms of biocementation, as well as key factors affecting the efficiency of MICP, including the selection of microorganisms, environmental conditions, and soil composition. Methods for optimizing biocementation to achieve maximum efficiency are described, along with various applications of the technology, such as the improvement of sandy and weak clay soils. Special attention is given to environmental aspects, particularly the use of MICP for carbon sequestration, which contributes to long-term carbon storage in soils and helps mitigate climate change. The conclusion discusses prospects for further research and possible directions for expanding the application of this technology in construction and geotechnics.

*Keywords:* microbiologically induced carbonate precipitation, biocementation, carbon capture and storage, urea, calcium carbonate.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1. Аманбосын Алина Қуанышқызы – инженер-микробиолог отдела плодородия и биологии почв, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-2464-2264>, e-mail: [aamanbossyn@gmail.com](mailto:aamanbossyn@gmail.com)

2. Курманбаев Аскар Абылайканович – главный научный сотрудник отдела плодородия и биологии почв, д.б.н., профессор, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4384-7634>, e-mail: [wberel@gmail.com](mailto:wberel@gmail.com)