

МРНТИ 67.21

Обзорная статья

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-146-1-158-176>

Обзор использования уреолитических бактерий в процессе биоцементации грунта

Ж.Т. Кусбергенова*¹, А.С. Тулебекова¹, И.Т. Жумадилов²

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Республика Казахстан

²Shakarim University, Семей, Республика Казахстан

(E-mail: zhkusbergenova@gmail.com)

Аннотация. На сегодня применяются различные методы по улучшению свойств почв - грунтов, однако ученые занимаются постоянным поиском альтернативной методики, способной улучшить состояние почвы - грунта с минимальным нарушением экологии, сокращением негативного воздействия на экосистему и ее сохранением. Биоцементация, осуществляемая различными микроорганизмами, при заданных условиях отвечает всем указанным требованиям. В данной статье приводится обзор предлагаемых методов биоцементации с использованием бактерий, способных продуцировать уреазу путем микробно-индуцированного осаждения карбонатов. Хотя многочисленные исследования в лабораторных условиях показали успех процесса биоцементации как экологически безопасного метода строительства, применение этой стратегии на практике и в полевых условиях до сих пор остается нерешенной проблемой. Это вызвано двумя основными трудностями: во-первых, биоцементация является сложным явлением, зависящим от множества факторов, во-вторых, в научной литературе рассматриваются различные виды микроорганизмов и различные условия, что приводит к разнообразию результатов. Представленная работа позволяет изучить последние достижения в применении широко распространенных бактерий *Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus cereus* и *Bacillus paramycoides*. Также в работе определены направления для будущих исследований с целью расширения применения данного способа.

Ключевые слова: биоцементация, микроорганизмы, *Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus cereus*, *Bacillus paramycoides*.

1. Введение

В последние десятилетия все чаще возникает необходимость использования экологически безопасных методов укрепления грунтов, особенно без ущерба для местной инфраструктуры. В связи с этим значительное развитие получили методы улучшения грунтов с использованием технологий биоцементации [1]. Одним из преимуществ биоцементации является использование различных видов микроорганизмов, а также специфических ферментов, получаемых из этих микроорганизмов. В настоящее время популярен метод микробно-индуцированного осаждения карбоната кальция, заключающийся в биохимическом процессе осаждения кристаллов карбоната кальция (CaCO_3) под воздействием активной деятельности уреолитических бактерий в результате гидролиза мочевины (уреолиза), протекающего в окружающей среде [2]. Наиболее эффективен этот метод с использованием бактерии *Sporosarcina pasteurii*. Наряду с этим, проведены испытания с бактериями *Bacillus pasteurii*, *Bacillus Cereus* и *Bacillus Megaterium*, а также ферментами, выделенными из растений, таких, как бобы Джека и соя [3].

Sporosarcina pasteurii имеет способность образовывать эндоспоры - неактивные структуры, которые образуются бактериями в условиях недостатка питания [4]. Эндоспоры позволяют бактериям находиться в состоянии покоя в течение длительного времени, выдерживая экстремальные условия, такие, как ультрафиолетовое излучение, высушивание, высокие температуры, низкие температуры и химические дезинфицирующие средства, пока окружающая среда не станет благоприятной для их активации [4]. Эта особенность повышает выживаемость *S. pasteurii* во враждебных средах и позволяет регулировать метаболические процессы в соответствии с потребностями инженеров. *Sporosarcina pasteurii* является щелочной бактерией и лучше всего растет в щелочной среде с pH от 9 до 10, но может выживать и в умеренно жестких условиях с pH до 11,2, что делает ее подходящим компонентом добавки для использования в строительстве [3].

Бактерия *Sporosarcina pasteurii* притягивает ионы Ca^{2+} , которые обеспечивают нормальное функционирование жизненных процессов бактерии. То количество ионов, которое не будет использовано в метаболических процессах, осаждается на внешней поверхности клеточной стенки. После добавления среды, содержащей, в частности, мочевины, происходит ее гидролиз - мочевина гидролизуеться до аммония и углекислого газа (с образованием ионных форм NH_4^+ и CO_2^-). Реакция ионов кальция, осажденных на клеточной стенке (Ca^{2+}), с ионом CO_2^- приводит к выпадению CaCO_3 и, таким образом, к цементированию почвы - грунта [5].

Осаждение карбоната кальция в природе происходит химическим путем в результате изменения параметров окружающей среды, но значительная его часть образуется биогенным путем в процессе биоминерализации при участии живых организмов. Карбонат кальция может встречаться в двух разновидностях - в виде кальцита или арагонита. Это минералы с одинаковым химическим составом, но различное пространственное строение обуславливает их разные физические и химические свойства [5].

Процесс осаждения карбоната кальция в искусственных условиях состоит из нескольких этапов, включая образование зародышей, затем их преобразование и последующий рост кристаллов. В результате этих процессов могут образовываться различные формы карбоната кальция, включая трансформируемые (которые со временем могут изменить свою кристаллическую структуру), нестабильные (формы, которые являются неустойчивыми и могут претерпевать изменения в более стабильные структуры со временем) и стабильные (представляющие собой термодинамически устойчивые конфигурации карбоната кальция), в зависимости от условий реакции (например, ромбический, аморфный кальцит, ватерит и другие). Форма карбоната кальция, полученная в результате микробиологического индуктивного процесса, может влиять на физические характеристики окончательного материала. Например, некоторые формы могут обладать большей твердостью или устойчивостью к сжатию по сравнению с другими [6]. Кроме того, стабильные формы карбоната кальция менее подвержены изменениям со временем, что делает их более прочными и устойчивыми к условиям окружающей среды, в то время как нестабильные формы могут претерпевать фазовые превращения, что может повлиять на стабильность и долговечность затвердевшего материала. Метод микробно-индуцированных карбонатных осадков (МИКП), осуществляемый специфическими бактериями, является интересной исследовательской темой для ученых и инженеров уже несколько десятилетий. Этот метод предлагает инновационные решения для различных инженерных проблем, связанных с человеческой деятельностью [7].

Целью настоящего исследования является проведение анализа применения уреолитических бактерий: *Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus pasteurii*, *Bacillus Cereus* и *Bacillus Megaterium* на основе лучших практик. Основная проблема в рассматриваемой технологии МИКП состоит в определении параметров, необходимых для установления порядка взаимодействия бактерий, таких, как температура, концентрация мочевины, соотношение используемых добавок и определение оптимальной влажности грунта для роста бактерий и их дальнейшей реакции.

2. Анализ уреолитических бактерий, используемых при биоцементации методом МИКП

При выборе подходящего бактериального агента для использования в процессе МИКП следует отдавать предпочтение эндоспорообразующим уреазопродуцирующим бактериям, которые обладают высоким потенциалом выживания в щелочной среде и устойчивостью к экстремальным условиям. С другой стороны, успеху уреолитических бактерий в процессе МИКП способствуют такие факторы окружающей среды, как pH, размер и распределение частиц почвы - грунта, осмотическое давление, содержание воды и условия обработки, такие, как цементирующий раствор, концентрация бактерий и наличие подходящих питательных веществ [8].

Кроме того, согласно исследованиям Abdulaziz Dardau Aliyu и др. [9], температура играет важную роль в уреолитизе, поскольку при 30°C скорость разложения мочевины

повышается. Однако экстремальные температуры могут негативно влиять на активность микробной уреазы, а также на скорость образования и растворимость эндоспор. Кроме того, при pH ниже 5,0 фермент микробной уреазы может необратимо денатурироваться. Также стоит отметить, что концентрация мочевины выше 0,75 ммоль/л может подавлять уреолитическую активность бактерий, так как высокая транспортировка мочевины через клеточную мембрану может препятствовать другим клеточным процессам. В данном исследовании были отобраны десять образцов почвы - грунта из верхнего слоя на участке Ladang 15 сельскохозяйственного факультета Университета в Селангоре, Малайзия. В начале эксперимента образцы почвы - грунта были смешаны с физиологическим раствором, содержащим 8,5 г/л NaCl в дистиллированной воде, затем были подготовлены серийные разведения суспензий образцов (в 10 раз разбавленные) и каждое разведение было посеяно на агар с карбонатом кальция, состав исследуемой смеси представлен в таблице 1.

Таблица 1

Состав смеси, используемой в исследовании [9]

питательный агар	мочевина	NH ₄ Cl	NaHCO ₃	CaCl ₂	агар
3 г/л	20 г/л	10 г/л	2,12 г/л	25 г/л	20 г/л

Культуры были инкубированы при температуре 28°C ± 0,5°C и ежедневно оценивались в течение 7 дней. Колонии, появившиеся на агаре, были отобраны и пересеяны на состав, содержащий 3 г/л питательного агара, 20 г/л мочевины, 10 г/л NH₄Cl и 2,12 г/л NaHCO₃. В результате проведенных испытаний в почве - грунте фермерских хозяйств обнаружено наличие местных бактерий, способных производить уреазу. Среди шестнадцати изолятов уреолитических бактерий *Bacillus cereus* и *Bacillus paramycoides* проявили самую высокую активность уреазы и продолжали расти при щелочном pH.

Вместе с тем, в другом исследовании [10] данные ученые отмечают, что МИКП применяет природные характеристики бактерий, которые производят уреазу для осуществления гидролиза мочевины (уреолиза), пройдя через ряд сложных биохимических реакций при формировании продукта. Вместе с тем, метод МИКП может быть использован для разных типов грунтов, включая крупные просеянные пески и более мелкие. Однако его эффективность более выражена для крупных и хорошо просеянных песков. Также в исследовании отмечено, что количество осажденного CaCO₃ зависит от разной скорости выработки уреазы различными штаммами уреолитических бактерий. Кроме этого, установлено, что *Bacillus cereus* представляет собой более подходящую кандидатуру для использования в качестве компонента при биоцементации способом МИКП.

В работе [11] изучена возможность использования биочар-бактерий, полученных из рисовой соломы путем пиролиза. Сырье было подвергнуто сушке при 60 °C до полного высыхания, после чего было измельчено до размера, пропускаемого через сито с отверстием 0,15 мм. Затем произведен пиролиз при 300 °C в муфельной печи в течение 2 часов при ограниченном доступе воздуха. В целях инкубационного эксперимента

были подготовлены мензурки со 100 г сухого грунта, затем в каждый образец было добавлено 0,694 мг мочевины и 1,25 мг CaCl_2 для активации процесса МИКП. Также было добавлено 1 г биоугля (1% от общей массы) и 10 мл раствора бактерий, после чего все тщательно перемешивалось. Кроме того, в эксперимент включен грунт с добавлением 1% биочара и грунт без каких-либо добавок. В результате исследования использование комбинированной системы биочара и уреолитических бактерий привело к значительному снижению содержания экстрагируемого вещества в грунте по сравнению с отдельными системами биочара и бактерий. Также было замечено, что добавление бактерий привело к снижению подвижности в грунте, что в итоге привело к его укреплению.

Masaharu Fukue, Zbigniew Lechowicz и другие [12] исследовали бактерии взятые из аллювиальных грунтов Японии в 2008 г., показавшие сходство с *Sporosarcina pasteurii* на 93%. В качестве реактивов использовались мочевины, хлорид кальция, дистиллированная вода и аммиачный буфер. Максимальная концентрация Ca^{2+} составляла 1,0 М, а мочевины использовалась в концентрации 1,1 М, а также использовался аммиачный буферный раствор 20 мМ. В данном исследовании полученные результаты свидетельствуют о том, что содержание карбонатов увеличивается с ростом концентрации раствора. С другой стороны, было отмечено, что увеличение концентрации Ca^{2+} приводит к снижению содержания карбонатов из-за эффекта замедления. Однако такая замедленная реакция способствует увеличению прочности грунта в случаях, когда нет необходимости получения результата в короткие сроки.

Группа ученых [13] выращивали *Sporosarcina pasteurii* в среде, состоящей из 20,0 г дрожжевого экстракта, 10,0 г NH_4 и 800 мл трис-буфера в 100 мл дистиллированной воды. Среда для культивирования бактерий создавалась при pH 9,0, что идеально подходит для роста *S. pasteurii*. После этого бактерии переносили в бульон, находящийся в инкубаторе, при температуре 30 С и далее встряхивали при 200 об/мин в аэробных условиях в течение 3 дней. Результаты исследования показали увеличение прочности грунта, обработанного сидеритом и высокомолибденовым кальцитом/доломитом, по сравнению с грунтами, обработанными кальцитом/ватеритом и нескегонитом.

В работе [14] исследователи провели серию лабораторных исследований по изучению влияния *Sporosarcina pasteurii* на грунт, загрязненный цинком, а также рассмотрели сроки твердения, установили закономерность развития микроструктур и выявили механизм стабилизации грунта. При этом грунт был взят со склона нарезного канала в северном Синьцзяне (Китай), культурная среда состояла из питательного бульона в пропорции 20 г/л плюс мочевины с pH 8,0, а цементирующий раствор состоял из CaCl_2 и мочевины. Затем в течение 7 дней в приготовленном растворе измеряли рост бактерий, уреазную активность и образование кальцита. Обнаружено, что использование микробных осадков карбоната кальция существенно уменьшает концентрацию растворения ионов цинка в грунте, загрязненном Zn, примерно до 20 мг/л. Наиболее значительный эффект стабилизации загрязненного грунта, обработанного МИКП, будет достигнут при следующих условиях: время твердения образцов 28 дней, концентрация цементирующего раствора 1 моль/л и соотношение цементирующих растворов 1:2. Эти

условия обеспечат необходимые механические свойства, герметичность и способность удерживать токсичные вещества в грунте, исключая тем самым нанесения вреда окружающей среде.

В статье [15] цементирующий раствор был приготовлен из смеси мочевины и хлористого кальция в соотношении 1:1 с использованием *Sporosarcina pasteurii*. Концентрация этих компонентов в растворе составляла 1 моль/л. Мочевина служила источником азота и энергии для бактерий, а хлорид кальция - источником кальция для процесса МИКП. Растворение мочевины в воде является эндотермической реакцией, а растворение хлорида кальция в воде – экзотермической, поэтому перед смешиванием растворов их необходимо было отдельно оставить до достижения комнатной температуры. Данные результаты указывают на то, что влияние температуры на различные процессы может быть различным и не всегда однозначным. Также выявлено, что скорость образования CaCO_3 и скорость конверсии Ca^{2+} сначала увеличиваются с повышением температуры, вероятно, из-за активации химических реакций и повышенной подвижности молекул. Однако при более высоких температурах скорости этих процессов начинают снижаться, возможно, из-за утомления или денатурации ферментов, ответственных за эти реакции. С другой стороны, скорость адгезии бактерий постоянно увеличивалась с повышением температуры. Это может быть связано с изменением поверхностных свойств бактерий или с повышенной подвижностью молекул бактерий. Скорость поглощения воды снижается с повышением температуры, что может быть связано с изменением физических свойств воды. Более высокая температура может способствовать быстрому испарению воды или изменению ее вязкости, что затрудняет поглощение воды. Кристаллы CaCO_3 , образовавшиеся при разных температурах, могут иметь различную структуру или размер. Осадки карбоната кальция заполняют пустоты между частицами песка, эффективно уменьшая коэффициент пустотности и уплотняя песчаный грунт. Это также снижает эрозию и оказывает положительное влияние на окружающую среду, так как является естественным и экологически чистым методом улучшения различных геотехнических свойств грунта.

В исследовании [8] установили, что в сравнении с обычными методами химического цементирования, применение бактерий и цементирующих растворов по технологии МИКП характеризуется более низкой вязкостью. Это облегчает проникновение *S. pasteurii* в грунтовые материалы, позволяя осуществлять более глубокое и плотное цементирование. Кроме того, материалы, улучшенные с использованием МИКП, обладают сохранением выдающихся механических и гидравлических свойств, что придает им продолжительную долговечность. Основным элементом процесса ферментативного гидролиза мочевины является катализаторическое воздействие уреазы, вырабатываемой определенными штаммами бактерий. Предполагается, что среди всех бактериальных штаммов, способных синтезировать уреазу, бактерия *Sporosarcina pasteurii*, извлеченная из грунта, является наиболее активным катализатором гидролиза мочевины. По сравнению с другими штаммами *Sporosarcina pasteurii* обладает более высокой адаптацией к окружающей среде. Кроме того, у *Sporosarcina pasteurii* отмечается высокая производительность и эффективность в

производстве карбоната кальция. При этом образование углекислых осадков может быть результатом разнообразных биологических или биоминерализационных процессов, таких, как уреолитиз, денитрификация, сульфатредукция и железоредукция. Ферментативный процесс гидролиза мочевины привлекает особое внимание из-за его высокой энергоэффективности, невысокой стоимости, возможности контроля реакции и простоты процесса сепарации и сбора продуктов. В частности, когезия грунта увеличивается благодаря цементации частиц грунта карбонатом кальция, что предотвращает возможность ее разрыхления.

Вместе с тем, исследователи [6] отмечают в своей работе, что перенос и распределение уреолитических *S. pasteurii* в насыщенных песчаных колонках значительно зависят от химического состава воды, скорости потока, плотности бактерий и времени, проведенного бактериями в грунте. Эта зависимость придает высокую степень сложности процессу перемещения и удержания бактерий в реальных полевых условиях как во времени, так и в пространстве. В свете этого, представленные результаты также указывают на возможность снижения использования *S. pasteurii* путем увеличения скорости потока. Это означает, что уменьшение количества бактерий в точке закачки может быть достигнуто путем увеличения скорости потока в данной точке. Это особенно важно, учитывая, что в условиях радиального потока скорость бактерий экспоненциально уменьшается с увеличением расстояния от точки закачки, что приводит к ремобилизации бактерий только вблизи скважины. Также возможны другие подходы, такие, как подача небольшого импульса воды с низким уровнем индекса насыщенности для мобилизации *Sporosarcina pasteurii* в объеме, непосредственно окружающем нагнетательную скважину. Наряду с этим, в данном исследовании было выявлено, что введение раствора CaCl_2 с концентрацией 0,5 М, как это обычно практикуется в стратегиях микробиально-индуцированного цементирования (в частности, в составе цементирующего раствора), способствует стабилизации предварительно введенных бактерий. Это проявляется в ограничении повторного захвата клеток. В противоположность этому, введение деионизированной воды с гораздо более низкой ионной силой приводит к частичному расщеплению *S. pasteurii*. Вместе с тем, данное исследование информирует о способах эффективной доставки указанной бактерии в пористые среды.

Кроме этого, согласно работе Charalampos Konstantinou and Yuze Wang [16], факторами, влияющими на результат исследования, проведенного с использованием *Sporosarcina pasteurii* методом МИКП, являются количество химикатов, параметры окружающей среды и свойства гранулированной сети, т.к. большое количество частиц в заданном объеме приводит к увеличению числа точек контакта, что в итоге снижает нагрузку на каждую частицу. Еще одним выводом исследования является то, что средний диапазон оптических плотностей способствует более эффективному сцеплению частиц. Помимо того, в статье обсуждаются проблемы использования *S. pasteurii* для решения проблем рекультивации подземных вод, а также секвестрации загрязняющих веществ. При этом тяжелые металлы могут быть удалены с помощью МИКП через процессы биосорбции, совместного осаждения с Ca^{2+} или с образованием осадков CaCO_3 .

В исследовании [5] проводились испытания алевроитового грунта с использованием бактерии *Sporosarcina pasteurii* в целях оценки прочности грунта на сдвиг и определения

оптимальной влажности, при которой грунт может быть максимально уплотнен. Бактерии *Sporosarcina pasteurii* были выращены на жидком питательном бульоне с регулярным встряхиванием. Вместе с тем, для обогащения культуры использовались катионы кальция (Ca^{2+}) в форме $CaCl_2 \cdot 2H_2O$. Раствор с бактериями добавляли постепенно в грунт, распыляя его в небольших количествах, и затем тщательно перемешивали. В результате получился материал с оптимальной влажностью, из которого формировали образцы в форме цилиндра высотой 80 мм и диаметром 38 мм. Результаты проведенных испытаний указали на способность повышения прочности грунта до 50%. Наряду с этим, сделаны выводы о возможном использовании молочных отходов и ила цементных печей в качестве сырья для производства бактерий, используемых для биоцементации.

В статье [17] рассмотрено применение *Bacillus pasteurii*, приобретенной в Шанхайском центре сбора биоресурсов (Китай), со следующими компонентами: мочевины, триптон, пептон, хлорид натрия, порошок агара и вода в соотношениях, указанных в таблице 2. В ходе эксперимента был применен метод поэтапного введения, при котором бактериальный раствор наносился и выдерживался в течение 3 часов, далее раствор добавлен в цементирующую смесь четыре раза с интервалом в 16 часов. После последнего нанесения бактериального раствора цементирующий раствор был нанесен дважды. По итогам полного проникновения раствора образцы промыты чистой водой три раза с одинаковой скоростью, чтобы завершить реакцию микробного индуцированного карбонатного осаждения и удалить побочные продукты этого процесса. В результате эксперимента представлен новый подход к укреплению золотого песка путем комбинации базальтового волокна и технологии микробного осаждения кальцита. Данный метод в определенной степени увеличивает прочность песка, затвердевшего под воздействием микроорганизмов.

Таблица 2

Состав смеси, используемой в исследовании [17]

мочевина	триптон	пептон	хлорид натрия	порошок агара	вода
20 г/л	15 г	5 г	5 г	20 г	900 мл

В эксперименте [18] изучалось укреплениерыхлогопесчаногогрунтас помощью уреазы, производимой с использованием *Sporosarcina pasteurii*, для осаждения биоминералов, являющиеся формами ферментации. При этом механические характеристики песчаного столба были оценены с использованием сухой плотности, коэффициента проницаемости, содержания карбоната кальция и UCS. В качестве источника кальция был использован ацетат кальция, производимый из дешевых отходов известняка, а также 5 г/л пептона из сои, 15 г/л пептона из казеина, 5 г/л NaCl и 20 г/л мочевины, далее смесь культивировалась в течение 24 часов. Затем осадок, полученный после 5 мин центрифугирования при 8000 об/мин, добавляли в среду для ферментации (pH 8,0), состоящую из 15 г/л пептона из сои, 30 г/л порошка кукурузной мякоти, 3 г/л NaH_2PO_4 и 10 г/л мочевины, и далее культивировали в течение 48 часов. Согласно проведенному

анализу, были определены оптимальные условия процесса извлечения ацетата кальция из известняка и уксусной кислоты. Температура реакции составляла 55 °С, соотношение между твердой и жидкой фазами равнялось 1:14, а дозировка уксусной кислоты составляла 163%. При таких условиях был достигнут выход ацетата кальция в размере 96,81%. Отмечается, что известняк широко доступен и имеет низкую стоимость, причем затраты при использовании его в качестве источника кальция снижаются на 31,87% по сравнению с хлоридом кальция. Экспериментальные результаты также подтверждают, что известняк идеально подходит в качестве источника кальция для технологии МИКП при использовании песчано-твердого песка.

3. Результаты

В целом результаты использования уролитических бактерий в исследованиях показали эффективность их применения в процессе биоцементации грунта, при этом увеличение концентрации хлорида кальция влияет на рост карбонатов кальция. Наряду с этим, сделаны выводы о возможном использовании таких дополнительных компонентов, как биочар-бактерии, биоуголь, соя, дрожжевые экстракты, а также молочные отходы. Общие результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты исследований

Авторы статьи	Используемая бактерия	Компоненты исследуемой смеси	Результат исследования
Исследование 1 [9]	Bacillus cereus, Bacillus paramycoides	питательный агар, мочевины, NH ₄ Cl, NaHCO ₃ , CaCl ₂ , агар	Электронно-микроскопические изображения подтвердили, что осажденный CaCO ₃ как с использованием B. cereus, так и с применением B. paramycoides представлен в виде сгруппированных кристаллов. Интересно отметить, что агломерированные кристаллы CaCO ₃ , образованные B. paramycoides, напоминали кристаллы, вырабатываемые B. cereus. Очевидно, что эти кристаллы образовались вследствие избытка веществ в приготовленной среде, где бактериальная клеточная стенка служила местом для начала кристаллизации. В виду того, что процесс образования агломерированных кристаллов CaCO ₃ включает нуклеацию и рост уже существующих кристаллов, это приводит к образованию более крупных кристаллов CaCO ₃ . Также установлена способность B. cereus и B. paramycoides выживать при щелочном pH, а также их высокую уреазную активность, что способствует выпадению осадка карбоната кальция.

Исследование 2 [11]	Sporosarcina pasteurii	мочевина, CaCl ₂ , биоуголь, раствор биочар-бактерий	Основываясь на теории МИКП, исследователи разработали и протестировали систему 2В, сочетающую в себе биочар (В) и бактерии (В), чтобы изучить ее способность эффективно удерживать питательные вещества в почве. Применение системы 2В привело к значительному улучшению плодородия почвы, повышению уровня уреазы в ней, а также ее бактериальному разнообразию. Уреаза и NH ₄ ⁺ -N оказались ключевыми факторами, влияющими на состав и разнообразие бактерий.
Исследование 3 [12]	Sporosarcina pasteurii	мочевина, хлорид кальция, дистиллированная вода и аммиачный буфер	В ходе данного исследования было обнаружено, что уровень карбонатов в растворе увеличивается в результате увеличения концентрации хлорида кальция. Однако также было замечено, что увеличение содержания Ca ²⁺ приводит к уменьшению содержания карбонатов из-за замедленного эффекта. Таким образом, это явление рассматривается как ускорение процесса загрузки Ca ²⁺ , позволяющее определить зависимость роста кристаллов CaCO ₃ от содержания Ca ²⁺ .
Исследование 4 [13]	Sporosarcina pasteurii	дрожжевой экстракт, NH ₄ , трис-буфер, дистиллированная вода	Результаты продемонстрировали увеличение прочности грунта, обработанных сидеритом и кальцитом/доломитом по сравнению с грунтами, обработанными кальцитом/ватеритом и нескегонитом. Вместе с тем, установлены различия в размерах кристаллов, что, в свою очередь, влияет на инженерные свойства образцов, обработанных МИКП, такие, как проницаемость, жесткость и прочность. Различные карбонатные минералы осаждались путем добавления ионов Fe ²⁺ , Mg ²⁺ и Ca ²⁺ к растворам карбонатных ионов (CO ₃ ²⁻).
Исследование 5 [14]	Sporosarcina pasteurii	питательный бульон в виде мочевины с pH 8,0, а цементирующий раствор состоял из CaCl ₂ и мочевины	Обнаружено, что использование микробных осадков карбоната кальция существенно уменьшает концентрацию растворения ионов цинка в загрязненных грунтах. Обработка осадков карбоната кальция, вызванная микроорганизмами, изменяет соотношение напряжения и деформации загрязненной почвы от слаборазмягченного до сильно-размягченного типа. Прочность на сжатие обработанных образцов увеличилась на 187,2%~550,5%. Когезия обработанных образцов имеет значительную тенденцию к увеличению, в то время как угол внутреннего трения остается относительно стабильным. Обработка осадков карбоната кальция, вызванная микроорганизмами, может усилить механические свойства почв, загрязненных ионами цинка.

Исследование 6 [15]	Sporosarcina pasteurii	мочевина и хлористый кальций	Скорость образования CaCO ₃ , скорость преобразования Ca ²⁺ и прочность на сжатие без ограничения сначала увеличиваются, а затем уменьшаются с повышением температуры используемой смеси. Минералы CaCO ₃ , образовавшиеся при 20°C, были в основном зернистыми, с малым размером кристаллов и не имели фиксированной морфологии. Минералы CaCO ₃ образовавшиеся при 30°C, были в основном кубическими, а размер кристаллов был большим, чем при 20°C. По сравнению с CaCO ₃ , образовавшимся при комнатной температуре, скопление CaCO ₃ было более плотным, а зазор между соседними частицами песка был меньше, что подтверждает более плотную связь между частицами.
Исследование 8 [5]	Sporosarcina pasteurii	питательный бульон, катионы кальция	Данное исследования подтвердило экологическую безопасность технологии улучшения почв путем МИКП. Вместе с тем, результаты проведенных испытаний показали повышение прочности грунта с добавлением Sporosarcina pasteurii до 50%. Так, в частности, при нагрузке 200 кН несущая способность грунта составила 34,5%, для естественно цементированного грунта - 29,3%, а для биостабилизированного - 18,8%.
Исследование 9 [17]	Bacillus pasteurii	триптон, пептон, хлорид натрия, порошок агара, базальтовое волокно, очищенная вода и мочевина	В рассмотренном исследовании представлен новый подход к укреплению золотого песка путем комбинации базальтового волокна и технологии микробного осаждения кальцита. Кроме того, кристаллы CaCO ₃ продемонстрировали эффекты цементирования, заполнения и закрепления. Коэффициент несущей способности золотого песка повышался с увеличением сухой плотности, а прочность образцов при использовании Bacillus pasteurii в количестве 1,5 г/см ³ была значительно ниже, чем при 1,6г/см ³ .
Исследование 10 [18]	Sporosarcina pasteurii	пептон из сои, пептон из казеина, NaCl и мочевина	В эксперименте по фиксации песка с применением МИКП и известняка в качестве источника кальция механические показатели содержания карбоната кальция, сухой плотности и коэффициента проницаемости песчаного столба были лучше, чем у образцов с хлоридом кальция. Это объясняется различием кристаллических фаз карбоната кальция, производимого микроорганизмами в разных питательных средах, что приводит к разной прочности цементации между карбонатом кальция и частицами песка. Согласно анализу полученных в ходе испытания данных, оптимальные условия процесса извлечения ацетата кальция из известняка

			и уксусной кислоты были следующими: температура реакции составляла 55°C, соотношение твердой и жидкой фаз было 1:14, дозировка уксусной кислоты составляла 163%, а выход ацетата кальция составлял 96,81%.
--	--	--	--

Результаты проведенного анализа уреолитических бактерий, приведенных в исследованиях 1-10 с использованием *Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus pasteurii*, *Bacillus Cereus* и *Bacillus Megaterium*, были оценены графическим количественно-качественным методом. Результаты анализа критериев для бактерий представлены в Таблице 4.

Таблица 4

Результаты анализа критериев

	Критерии оценки методом паутины	Наименование уреолитической бактерии		
		A	B	C
		<i>Sporosarcina pasteurii</i>	<i>Bacillus pasteurii</i>	<i>Bacillus cereus</i> и <i>Bacillus paramycoides</i>
I	Реакция при температуре 550 С	100%	100%	80%
II	Реакция при pH среды от 9 до 10	100%	90%	90%
III	Рост бактерий	100%	100%	100%
IV	Скорость реакции	100%	80%	70%
V	Уреазная активность	100%	100%	100%
VI	Влажность грунта	100%	100%	100%
VII	Образование кальцита	100%	100%	100%
VIII	Эффект стабилизации грунта	100%	90%	70%

Для ориентации были построены две окружности: большая и малая - для оценки метода. На окружности были нанесены радиусы, равные количеству критериев, обозначенных римскими цифрами от 1 до 8. Для каждого радиуса приведено обозначение для измерения значений параметров критериев в процентах в соответствии с таблицей 4. При этом каждая бактерия или группа бактерий была обозначена буквой, так, в частности, *Sporosarcina pasteurii* - А, *Bacillus pasteurii* - В, *Bacillus cereus* и *Bacillus paramycoides* - С. На схеме показатели критериев использования уреолитических бактерий обозначены линиями, *Sporosarcina pasteurii* обозначена голубым цветом, *Bacillus pasteurii* - оранжевым, *Bacillus cereus* и *Bacillus paramycoides* - красным (рисунок 1). Ранее отмеченные метки каждого вида бактерий или группы бактерий (А, В, С) соединены линиями. После ввода всех значений на диаграмме проведен анализ полученных данных, затем по площади соединенных линий определена бактерия, показавшая наибольшее значение по заданным критериям.

Анализ результатов приведенных в таблице 4 критериев использования уреолитических бактерий показывает, что значения показателей использования бактерий отличаются друг от друга не более чем на 0,2.

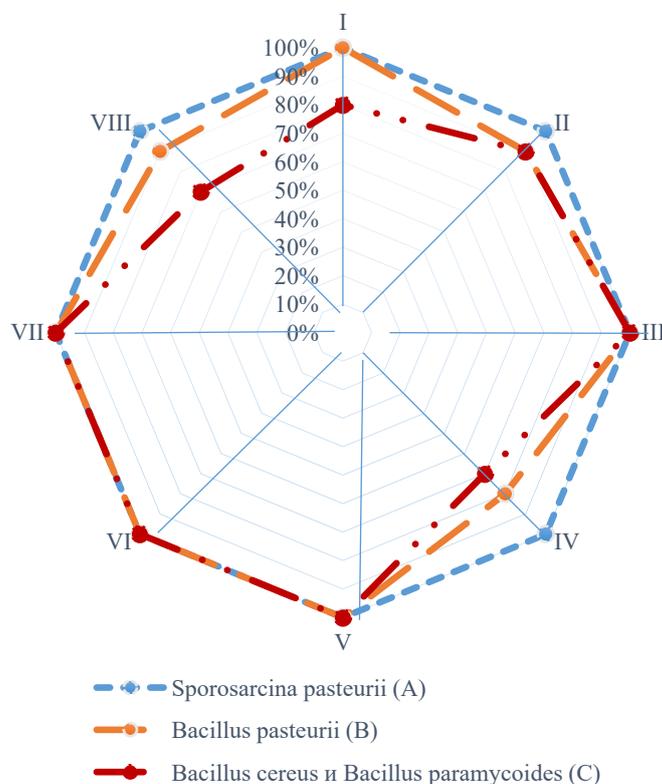


Рисунок 1. Диаграмма оценки количественно-качественным методом «Паутина»

4. Выводы

Сравнительный анализ показателей воздействия на улучшение свойств грунта путем применения бактерий показывает, что наибольшую активность показывает бактерия *Sporosarcina pasteurii*. Это обусловлено наличием и способностью данной бактерии выживать в щелочной среде и эффективно производить с высокой скоростью карбонат кальция. Осадки карбоната кальция, заполняющие пространства между частицами песка, эффективно сокращают объем пустот в грунте и уплотняют его. Таким образом, использование *Sporosarcina pasteurii* является более естественным и экологически чистым способом улучшения различных характеристик грунта.

Кроме того, из проведенных исследований можно сделать вывод о том, что скорость образования CaCO_3 , скорость преобразования Ca^{2+} и прочность на сжатие без ограничения зависят от температуры используемой смеси. Минералы CaCO_3 , образовавшиеся при более высокой температуре, имеют более крупный размер кристаллов и кубическую форму, что способствует более плотной связи между частицами.

Новый подход к укреплению эолового песка с использованием комбинации базальтового волокна и технологии микробного осаждения кальцита также показал хорошие результаты. Кристаллы CaCO₃ не только укрепляют песок, но и заполняют пустоты, улучшая его несущую способность. Дополнительно было выявлено, что прочность образцов улучшается с повышением количества используемых бактерий *Bacillus pasteurii*.

Вместе с тем, рассмотренный обзор применения уреолитических бактерий при биоцементации показал следующее:

1) необходимы дальнейшие исследования процесса осаждения CaCO₃ с учетом зависимости от pH, температуры и состава питательной среды с уреолитическими бактериями для определения граничных значений жизнеспособности бактерий;

2) важно также учитывать специфические характеристики материала, присущие каждой области применения, например, метод внесения и свойства используемого грунта;

3) необходимо определить скорость уреазной активности для прогнозирования необходимого количества осаждения CaCO₃.

Учитывая все вышеуказанные характеристики, полученные в разных областях знаний на разных масштабных уровнях, появится возможность более точно прогнозировать процесс биоцементации для каждого типа грунта и определить наилучший способ укрепления грунта с использованием данного метода.

Вклад авторов:

Кусбергенова Ж.Т. – сбор, написание статьи, анализ;

Тулбекова А.С. – критический пересмотр содержания;

Жумадилов И.Т. – интерпретация результатов работы.

Список литературы:

1. Effect of bio-cementation process on sandy soil / Bojja Vinod Kumar, Anuja Charpe, NR Krishnamurthy, Ashwin Raut – 2022. – Т. 2, № 5. – p. 1-9. <https://doi.org/doi:10.1088/1755-1315/1086/1/012017>

2. Bio-precipitation of CaCO₃ for soil improvement: A Review / A Miftah, H Khodadadi Tirkolaei², H Bilsel³ – 2020. – Т. 800. – p. 1-7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/800/1/012037>

3. Advancements in Exploiting *Sporosarcina pasteurii* as Sustainable Construction Material: A Review / S. Khoshtinat – 2023. – Т. 15. – p. 1-23.

4. Manual of Clinical Microbiology / Wormser G.P, Stratton C.ASM Press, 2007. – 2488 с.

5. Biocementation as a Pro-Ecological Method of Stabilizing Construction Subsoil / Katarzyna Stefaniak, J ędrzej Wierzbicki, Barbara Ksit, Anna Szymczak-Graczyk – 2023. – Т. 16, № 6. – p. 1-15. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en16062849>

6. Transport and Fate of Ureolytic *Sporosarcina pasteurii* in Saturated Sand Columns: Experiments and Modelling / Guijie Sang, Rebecca J. Lunn, Grainne El Mountassir, James M. Minto – 2023. – Т. 149. – p. 599-624. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11242-023-01973-x>

7. Influencing factors on ureolytic microbiologically induced calcium carbonate precipitation for biocementation / N. Erdmann, D. Strieth – 2023. – Т. 39, № 61. – p. 1-18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11274-022-03499-8>

8. Microbial-induced carbonate precipitation (MICP) technology: a review on the fundamentals and engineering applications / Kuan Zhang, Chao-Sheng Tang, Ning-Jun Jiang, Xiao-Hua Pan, Bo Liu, Yi-Jie Wang, Bin Shi – Т. 82, № 229. – p. 1-33. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12665-023-10899-y>

9. Assessing Indigenous Soil Ureolytic Bacteria as Potential Agents for Soil Stabilization / Abdulaziz Dardau Aliyu, Muskhazli Mustafa, Nor Azwady Abd Aziz, Yap Chee Kong, Najaatu Shehu Hadi – 2023. – Т. 8, № 1. – p. 1-20. <https://doi.org/DOI: 10.22146/jtbb.75128>

10. A Study on Bio-Stabilisation of Sub-Standard Soil by Indigenous Soil Urease-Producing Bacteria / Abdulaziz Dardau Aliyu, Muskhazli Mustafa, Nor Azwady Abd Aziz, Najaatu Shehu Hadi – 2023. – Т. 31, № 5. – p. 2389-2412. <https://doi.org/DOI: https://doi.org/10.47836/pjst.31.5.18>

11. Biochar-bacteria partnership based on microbially induced calcite precipitation improves Cd immobilization and soil function / Min Xu, Jing Ma, Xiao-Hong Zhang, Gang Yang, Lu-Lu Long, Chao Chen, Chun Song, Jun Wu, Peng Gao, Dong-Xing Guan – 2023. – Т. 5, № 20. – p. 1-14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42773-023-00222-0>

12. Inhibited and Retarded Behavior by Ca²⁺ and Ca²⁺/OD Loading Rate on Ureolytic Bacteria in MICP Process / Masaharu Fukue, Zbigniew Lechowicz, Yuichi Fujimori, Kentaro Emori, Catherine N. Mulligan Cep. 16. – 2023. – Т. 1, № 3357. – p. 1-20. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma16093357>

13. Characterizing Microbial and CO₂-Induced Carbonate Minerals: Implications for Soil Stabilization in Sandy Environments / Hamed Abdeh Keykha, Alireza Zangani, Hadi Mohamadzadeh Romiani, Afshin Asadi, Satoru Kawasaki, Niloofar Radmanesh – 2023. – Т. 7, № 13. – p. 1-19. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/min13070976>

14. Performance and Mechanism of Zn-Contaminated Soil through Microbe-Induced Calcium Carbonate Precipitation / Wei Xing, Feng Zhou, Rui Zhu, Xudong Wang, Tingzhu Chen – 2023. – Т. 1974, № 13. – p. 1-17. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/buildings13081974>

15. Experimental Study of MICP-Solidified Calcareous Sand Based on Ambient Temperature Variation in the South China Sea / Jun Hu, Yufei Yang, Yuxuan Zhou, Hui Xiang, Kai Wei – 2023. – Т. 15, № 10. – p. 1-14. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su15108245>

16. Unlocking the Potential of Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation for Hydrological Applications: A Review of Opportunities, Challenges, and Environmental Considerations / Charalampos Konstantinou, Yuze Wang – 2023. – Т. 9, № 10. – p. 1-32. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/hydrology10090178>

17. Experimental Study on the Mechanical Behaviors of Aeolian Sand Treated by Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) and Basalt Fiber Reinforcement (BFR) / Jia Liu, Xian Li, Gang Li, Jinli Zhang – 2023. – Т. 2, № 16. – p. 1-13. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma16051949>

18. Feasible Utilization of Waste Limestone as a Calcium Source for Microbially Induced Carbonate Precipitation (MICP) / Qian Feng, Yuqi Song, Chuanwei Lu, Hao Fang, Yuxin Huang, Liuxia Chen, Xiangyang Song – 2023. – Т. 9. – p. 307. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/fermentation9030307>

Құсбергенова Жанар¹, Тулебекова Асель¹, Жұмадилов Ильяс²

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қаласы, Қазақстан Республикасы

²Shakarim University, Семей қаласы, Қазақстан Республикасы

*zhkusbergenova@gmail.com

Топырақты био цементтеу процесінде уреолитикалық бактериялардың қолданылуына шолу

Андатпа: Бүгінгі таңда топырақтың құрамын жақсартудың әртүрлі әдістері қолданылады. Сала ғалымдары экологияға мейілінше нұқсан келтірмеу, экожүйеге теріс әсерді азайту және оны сақтау арқылы топырақтың сапасын жақсартуға қабілетті балама әдісті табуда үнемі ізденіс жасайды. Бұл жағдайда әртүрлі микроорганизмдер жүзеге асыратын биоцементтеу барлық көрсетілген талаптарға жауап береді. Мақалада микробтық индукцияланған карбонатты тұндыру арқылы уреаза түзуге қабілетті бактерияларды қолдана отырып, ұсынылған биоцементтеу әдістеріне шолу жасалады. Зертханалық жағдайда жүргізілген көптеген талдау экологиялық таза құрылыс әдісі ретінде биоцементтеу процесінің сәттілігін көрсеткенімен, аталмыш стратегияны тәжірибеде және далада қолдану әлі де толық шешімін тапқан жоқ. Бұл екі күрделі жағдайдан туындайды: біріншіден, биоцементтеу көптеген факторларға байланысты күрделі құбылыс, екіншіден, ғылыми әдебиеттерде әртүрлі микроорганизмдер мен түрлі жағдайлар қарастырылып, әр тарапты нәтижелер берілген. Ұсынылған жұмыс кең таралған *Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus Cereus* және *Bacillus paramycoides* бактерияларын қолданудағы соңғы жетістіктерді зерттеуге мүмкіндік береді. Сондай-ақ, жұмыста осы әдісті қолдануды кеңейту мақсатында болашақ зерттеулердің басым бағыттары айқындалады.

Түйін сөздер: биоцементтеу, микроорганизмдер, *Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus cereus*, *Bacillus paramycoides*.

Kusbergenova Zhanar¹, Tulebekova Asel¹, Zhumadilov Ilyas²

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana city, Republic of Kazakhstan

²Shakarim University, Semei city, Republic of Kazakhstan

*zhkusbergenova@gmail.com

A review of the use of ureolytic bacteria in the process of biocementation of soils

Abstract: Today, various methods are used to improve the properties of soils, but scientists are constantly searching for an alternative technique that can improve the condition of the soil with minimal disturbance to the ecology, reducing the negative impact on the ecosystem and preserving it. Biocementation carried out by various microorganisms under given conditions fulfils all these requirements. This paper gives an overview of the proposed biocementation methods using bacteria capable of producing urease by microbially induced carbonate precipitation. Although numerous in vitro studies have demonstrated the success of the biocementation process as an environmentally friendly construction method, the application of this strategy in practice and in the field is still an unsolved

problem. This is due to two main difficulties: firstly, biocementation is a complex phenomenon depending on many factors, and secondly, different types of microorganisms and different conditions have been considered in the scientific literature, resulting in a diversity of results. The presented work allows us to explore recent advances in the application of the widely used bacteria *Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus cereus* and *Bacillus paramycooides*. The work also identifies directions for future research to expand the application of this method.

Keywords: biocementation, microorganisms, *Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus cereus*, *Bacillus paramycooides*.

References:

1. Effect of bio-cementation process on sandy soil / Bojja Vinod Kumar, Anuja Charpe, NR Krishnamurthy, Ashwin Raut – 2022. – Т. 2, № 5. – p. 1–9. <https://doi.org/doi:10.1088/1755-1315/1086/1/012017>
2. Bio-precipitation of CaCO₃ for soil improvement: A Review / A Miftah, H Khodadadi Tirkolaei², H Bilsel³ – 2020. – Т. 800. – p. 1–7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/800/1/012037>
3. Advancements in Exploiting *Sporosarcina pasteurii* as Sustainable Construction Material: A Review / S. Khoshtinat – 2023. — Т. 15. – p. 1–23.
4. Manual of Clinical Microbiology / Wormser G.P, Stratton C. ASM Press, 2007. – 2488 с.
5. Biocementation as a Pro-Ecological Method of Stabilizing Construction Subsoil / Katarzyna Stefaniak, Jędrzej Wierzbicki, Barbara Ksist, Anna Szymczak-Graczyk – 2023. – Т. 16, № 6. – p. 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en16062849>
6. Transport and Fate of Ureolytic *Sporosarcina pasteurii* in Saturated Sand Columns: Experiments and Modelling / Guijie Sang, Rebecca J. Lunn, Grainne El Mountassir, James M. Minto — 2023. — Т. 149. — p. 599–624. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11242-023-01973-x>
7. Influencing factors on ureolytic microbiologically induced calcium carbonate precipitation for biocementation / N. Erdmann, D. Strieth – 2023. – Т. 39, № 61. – p. 1–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11274-022-03499-8>
8. Microbial-induced carbonate precipitation (MICP) technology: a review on the fundamentals and engineering applications / Kuan Zhang, Chao-Sheng Tang, Ning-Jun Jiang, Xiao-Hua Pan, Bo Liu, Yi-Jie Wang, Bin Shi – Т. 82, № 229. – p. 1–33. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12665-023-10899-y>
9. Assessing Indigenous Soil Ureolytic Bacteria as Potential Agents for Soil Stabilization / Abdulaziz Dardau Aliyu, Muskhazli Mustafa, Nor Azwady Abd Aziz, Yap Chee Kong, Najaatu Shehu Hadi – 2023. – Т. 8, № 1. – p. 1–20. <https://doi.org/DOI: 10.22146/jtbb.75128>
10. A Study on Bio-Stabilisation of Sub-Standard Soil by Indigenous Soil Urease-Producing Bacteria / Abdulaziz Dardau Aliyu, Muskhazli Mustafa, Nor Azwady Abd Aziz, Najaatu Shehu Hadi – 2023. – Т. 31, № 5. — p. 2389–2412. <https://doi.org/DOI: https://doi.org/10.47836/pjst.31.5.18>
11. Biochar-bacteria partnership based on microbially induced calcite precipitation improves Cd immobilization and soil function / Min Xu, Jing Ma, Xiao-Hong Zhang, Gang Yang, Lu-Lu Long, Chao Chen, Chun Song, Jun Wu, Peng Gao, Dong-Xing Guan – 2023. – Т. 5, № 20. – p. 1–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42773-023-00222-0>

12. Inhibited and Retarded Behavior by Ca²⁺ and Ca²⁺/OD Loading Rate on Ureolytic Bacteria in MICP Process / Masaharu Fukue, Zbigniew Lechowicz, Yuichi Fujimori, Kentaro Emori, Catherine N. Mulligan *Сep.* 16. – 2023. – Т. 1, № 3357. – p. 1-20. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma16093357>
13. Characterizing Microbial and CO₂-Induced Carbonate Minerals: Implications for Soil Stabilization in Sandy Environments / Hamed Abdeh Keykha, Alireza Zangani, Hadi Mohamadzadeh Romiani, Afshin Asadi, Satoru Kawasaki, Niloofar Radmanesh – 2023. – Т. 7, № 13. – p. 1-19. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/min13070976>
14. Performance and Mechanism of Zn-Contaminated Soil through Microbe-Induced Calcium Carbonate Precipitation / Wei Xing, Feng Zhou, Rui Zhu, Xudong Wang, Tingzhu Chen – 2023. – Т. 1974, № 13. – p. 1-17. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/buildings13081974>
15. Experimental Study of MICP-Solidified Calcareous Sand Based on Ambient Temperature Variation in the South China Sea / Jun Hu, Yufei Yang, Yuxuan Zhou, Hui Xiang, Kai Wei – 2023. – Т. 15, № 10. – p. 1-14. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su15108245>
16. Unlocking the Potential of Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation for Hydrological Applications: A Review of Opportunities, Challenges, and Environmental Considerations / Charalampos Konstantinou, Yuze Wang – 2023. – Т. 9, № 10. – p. 1-32. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/hydrology10090178>
17. Experimental Study on the Mechanical Behaviors of Aeolian Sand Treated by Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) and Basalt Fiber Reinforcement (BFR) / Jia Liu, Xian Li, Gang Li, Jinli Zhang – 2023. – Т. 2, № 16. – p. 1-13. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma16051949>
18. Feasible Utilization of Waste Limestone as a Calcium Source for Microbially Induced Carbonate Precipitation (MICP) / Qian Feng, Yuqi Song, Chuanwei Lu, Hao Fang, Yuxin Huang, Liuxia Chen, Xiangyang Song – 2023. – Т. 9. – p. 307. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/fermentation9030307>.

Сведения об авторах:

Құсбергенова Ж. Т. – докторант, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Республика Казахстан

Түлебекова А.С. – профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Республика Казахстан

Жұмаділов И.Т. - старший преподаватель, Shakarim University, г. Семей, Республика Казахстан

Авторлар туралы мәліметтер:

Құсбергенова Ж.Т. – Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Құрылыс» кафедрасының докторанты, Астана қаласы, Қазақстан Республикасы

Түлебекова А.С. – Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Құрылыс» кафедрасының профессоры, Астана қаласы, Қазақстан Республикасы

Жұмаділов И.Т. – Shakarim University «Құрылыс» кафедрасының аға оқытушысы, Семей қаласы, Қазақстан Республикасы

Information about the authors:

Kusbergenova Zh.T. – PhD student, Department of «Civil Engineering», L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana city, Republic of Kazakhstan

A.S. Tulebekova – Professor, Department of «Civil Engineering», L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana city, Republic of Kazakhstan

I.T. Zhumadilov – Senior Lecturer, Department of «Civil Engineering», Shakarim University, Semey city, Republic of Kazakhstan



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).