

УДК 631.43

АГРЕГАТООБРАЗОВАНИЕ В КАОЛИНИТОВОЙ СУСПЕНЗИИ ПРИ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ГЛИНЫ

© 2020 г. Е. В. Шеин^{a, b, *}, Н. В. Верховцева^a, Г. С. Быкова^a, Е. Б. Пашкевич^a

^aМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, стр. 12, Москва, 119991 Россия

^bПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, Москва, 119017 Россия

*e-mail: evgeny.shein@gmail.com

Поступила в редакцию 02.04.2019 г.

После доработки 29.07.2019 г.

Принята к публикации 20.10.2019 г.

Для доказательства агрегатообразующей роли микроорганизмов, модифицирующих гидрофильную поверхность минералов, в модельном эксперименте в стерильную жидкую среду вводили полученных смывом с речного песка микроорганизмов *Bacillus velezensis* и каолинит, в котором ион К (до 1%) был представлен в сорбированном состоянии и в примесях. В динамике в течение двух месяцев отмечалось увеличение содержания белка, углерода и азота, а также достижение величины соотношения С : N, близкого к 5. Предполагается, что микроорганизмы, потребляя необходимый для жизнедеятельности ион калия, образуют белковые соединения в виде специфических выделений гликопептидной и полисахаридной природы. Эти соединения гидрофобизировали поверхность минералов (краевой угол смачивания возрастал от 20° до 40°), а также изменяли удельную поверхность и увеличивали долю микроагрегатных фракций (50–250 и 250–500 мкм) на 5.4 и 1.5%. Инкубация штаммом *B. velezensis* вела к гидрофобизации поверхности образца каолинита по сравнению с контрольными, что может быть связано с амфифильным характером продуктов жизнедеятельности микроорганизмов. В свою очередь, гидрофобизация минеральной поверхности приводила к образованию связей гидрофобного взаимодействия между частицами минерала, тем самым формируя органо-минеральные микроагрегаты.

Ключевые слова: микроагрегаты, каолинит, краевой угол смачивания, *Bacillus velezensis*, гидрофобность, гранулометрический состав

DOI: 10.31857/S0032180X20030077

ВВЕДЕНИЕ

Агрофизические свойства пахотных почв в виде агрегатного состава и устойчивости агрегатов — ключевой фактор их функционирования, способности обеспечивать жизнедеятельность растений и животных, регулирования водного, воздушного и теплового режимов почвы. Оптимальные агрофизические свойства определяют доступность питательных веществ для растений, скорость подтока влаги и питательных веществ к их корням, формируя диапазоны доступной влаги, температуры и воздухоудержания [1, 6, 10].

Остается слабоизученной проблема оптимизации агрофизических свойств и режимов почвы микробиологическим путем, т.е. роли представителей почвенной микробиоты в создании почвенных агрегатов, прежде всего, в модификации органическим веществом минеральной поверхности твердой фазы. К настоящему времени значение органического вещества в образовании агрономиче-

ски ценной структуры общепринято. Как правило, указывают на агрегирующее значение гуминовых кислот, насыщенных Са. Подчеркивается роль полисахаридов, увеличения активности дегидрогеназы для формирования устойчивой структуры [13, 16, 19, 22]. Разнообразные исследования водостойкости почвенных агрегатов показывают, что это свойство обеспечивается формированием гидрофобно-гидрофильной поверхности твердой фазы почвы [19].

Предложена гипотеза, связывающая образование устойчивой агрегатной структуры почв с особым свойством почвенного органического вещества. Гипотеза основана на амфифильных свойствах почвенного органического вещества, гидрофильные компоненты которого в водной среде формируют связь с минеральными частицами, а гидрофобные — друг с другом, создавая водостойчивый органо-минеральный агрегат [19, 21].

По указанной гипотезе гидрофобные структурообразующие компоненты формируются почвенной микробиотой, локализируются в микроагрегатах, которые, в свою очередь, образуют устойчивые к механическим и водным воздействиям агрегаты.

Эта гипотеза дополнена данными о значении гиф грибов в первичном (сначала механическом, а затем и биохимическом) формировании агрегатов, а также о пространственном распределении микробиоты в агрегате, где создаются условия квазианаэробноза за счет увеличения длительности увлажнения, снижения “разрывного” действия заземленного воздуха [17, 18], что в итоге приводит к преимущественному формированию гидрофобных компонентов и органо-минеральных взаимодействий, служащих основами структуры органо-минерального образования в виде устойчивого агрегата [8, 9, 14, 15, 18–22].

Несмотря на кардинальное значение структурообразования, остаются до конца не разрешенным ряд вопросов, связанных с прямыми доказательствами формирования микробиотой гидрофобных структурообразующих компонентов органического вещества: (1) как во времени происходит процесс образования микробиотой органических веществ; (2) имеет ли этот процесс стадийный характер, можно ли выделить ключевые этапы создания микробиотой органических, “склеивающих” элементарные почвенные частицы веществ; (3) возможны ли прямые доказательства формирования микроагрегатов из элементарных почвенных частиц и их физических проявлений на определенных стадиях процесса формирования органических специфических веществ и, соответственно, образования микроагрегатов (или проагрегатов)? На все эти вопросы может ответить только прямой эксперимент по изучению процесса жизнедеятельности определенной группы микроорганизмов в суспензии из элементарных минеральных почвенных частиц и появления структурных формирований за счет органических продуктов жизнедеятельности почвенной микробиоты.

Цель работы: в модельных экспериментах показать возможность агрегатообразования за счет модификации поверхности минерала (каолинит) бактериями *Bacillus velezensis*. Задачи: (1) в модельном эксперименте с суспензией каолинита, засеянной бактериями, в динамике определить микробиологическую активность бактерий; (2) исследовать динамику краевого угла смачивания и удельной поверхности каолинита в модельном эксперименте; (3) исследовать формирование микроагрегатов (проагрегатов) в модельной суспензии методами лазерной дифрактометрии.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для получения биомассы чистую культуру *Bacillus velezensis*, выделенную с поверхности речного песка, в течение 3–5 дней культивировали на твердой питательной среде NA (Nutrient agar, фирма Himedia): пептический перевар животной ткани – 5 г/л; натрия хлорид – 5 г/л; мясной экстракт – 1.5 г/л; дрожжевой экстракт – 1.5 г/л; агар-агар – 15 г/л в термостате при температуре 28°C. Колонии смывали стерильным физраствором в колбу с жидкой питательной средой. Полученную суспензию в концентрации 10^7 кл/мл использовали для модельного эксперимента по выяснению влияния микроорганизмов на свойства поверхности глинистых минералов.

В ходе модельного эксперимента в течение двух месяцев культивировали микроорганизмы в жидкой среде для силикатных бактерий (сахароза – 0.75 г/л; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 0.15 г/л; Na_2HPO_4 – 0.30 г/л; MgSO_4 – 0.075 г/л; FeCl_3 – следы; минерал (каолинит) – 5 г/л) [5]. Состав среды подбирали таким образом, чтобы единственным труднодоступным источником калия в ней был ион К из глинистого минерала. Для этого использовали каолинит Еленинского месторождения в Челябинской области, в котором по химическому составу K_2O содержалось менее 1%. В целом, состав используемого образца каолина (в мас. %): SiO_2 не менее 46.3%, Al_2O_3 не менее 36.3, Fe_2O_3 не более 1, TiO_2 не более 0.8, CaO не более 0.4, MgO не более 0.3, K_2O менее 1%, Na_2O не более 0.2, SO_3 не более 0.15%. Кроме того, используемый минерал содержал примеси минералов в виде кварца (до 9%), полевого шпата (до 1%), галлуазита (до 2%), до 1% гидрослюд и следы серицита. Рабочая гипотеза эксперимента заключалась в том, что, извлекая калий из природного образца каолинита с указанными примесями, микроорганизмы будут изменять поверхность минералов, а продукты их метаболизма в виде новообразованных органических веществ будут модифицировать их поверхность.

Для проверки этой гипотезы в колбы объемом 1 л помещали навеску образца каолинита с минеральными примесями, содержащими калий (соответственно со средой [5] 2.4 г), и заливали по 400 мл среды. Часть из них (6 шт.) снабжали устройством для стерильного отбора проб [2], оставшиеся 48 сосудов автоклавировали в течение 30 мин при давлении 1 атм.

Половину всего количества колб засеивали 4 мл микробной взвеси с концентрацией 2.7×10^7 КОЕ/мл. Незасеянные колбы служили контролем. После посева все колбы инкубировали при 27°C. Содержимое перемешивали раз в сутки. Сразу после посева отбирали пробы на определение белка (3 мл суспензии) и калия (10 мл). В дальнейшем такие пробы отбирали первые сутки 2–3 ра-

за, далее – раз в сутки. Отобранные жидкие образцы замораживали для дальнейшего анализа. После окончания культивирования, когда были собраны все образцы, их размораживали и центрифугировали. Надосадочную жидкость отфильтровывали шприцевым фильтром с диаметром пор 22 нм для удаления клеток. В полученных образцах определяли содержание калия методом пламенной фотометрии (фирма ВЕКІРР64 Flame Photometer) и содержание белка – фотометрически (КФК-3-01 ЗОМЗ) с окрашиванием по Лоури [4].

Колбы, не оснащенные системами стерильного отбора проб, предназначались для анализа физических свойств поверхности твердой фазы минерала. Через 10, 23, 39, 42, 52, 63 суток часть из них выводили из эксперимента, их содержимое отмывали водой, надосадочную жидкость сливали, остатки выпаривали на песчаной бане при 60–80°C для получения твердой фазы для дальнейшего исследования. Высушенный минерал пропускали через сито с отверстиями диаметром 1 мм.

В опытных и контрольных вариантах определяли гранулометрический и микроагрегатный составы методом лазерной дифракции [11], удельную поверхность методом тепловой десорбции газов (азота) на приборе Сорбтометр-М (ЗАО “Катан”, Новосибирск) [11]. Измерение краевых углов смачивания (КУС) производили с помощью метода “сидячей” капли на цифровом гониометре Drop Shape Analysis System – DSA100 (KRÜSS, Германия) [11, 12]. В качестве тестирующей жидкости использовали дистиллированную воду, подаваемую на поверхность подготовленных образцов каплями, объемом 1.5 мкл. Для проведения анализа на предметное стекло наносили капли почвенных суспензий (1 мас. %), подсушивали при комнатной температуре до испарения жидкости, а затем в сушильном шкафу при 105°C в течение 6 ч [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Динамику роста культуры *B. velezensis* в опытных и контрольных вариантах оценивали по накоплению белка. Питательную среду для культивации микроорганизмов подбирали таким образом, чтобы единственным источником калия для микроорганизмов был глинистый минерал. При постановке эксперимента предполагалось, что микроорганизмы начнут извлекать калий из минерала, переводя его в раствор. Содержание растворимого калия определяли в исследуемых суспензиях (рис. 1). Концентрация иона калия в контрольных суспензиях в течение всего эксперимента практически не изменялась, оставалась в два раза ниже, чем в суспензии, содержащей микроорганизмы (порядка 0.6 и 1.2 мг/л соответственно). По мере микробного роста содержание углерода в процессе инкубирования возрастало от следовых количеств до 1.6%. Аналогично

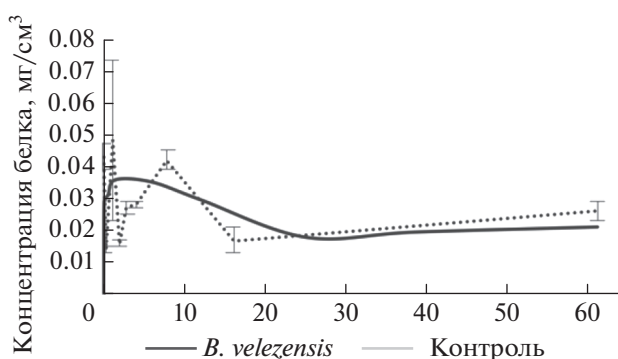


Рис. 1. Динамика содержания белка (мг/см³), определенного по методу Лоури, в суспензии за время эксперимента (сплошная линия – линии тренда, пунктирная – экспериментальные данные).

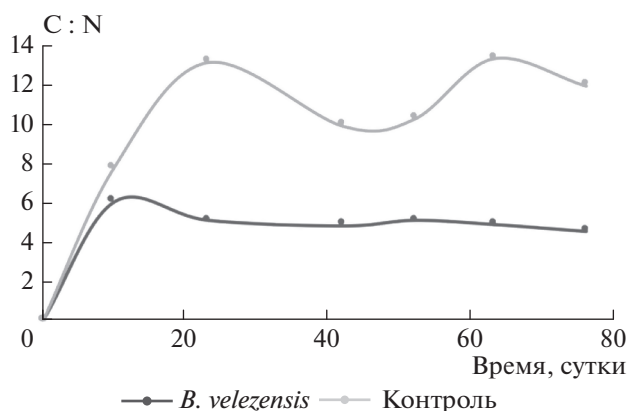


Рис. 2. Динамика соотношения C : N за время эксперимента.

увеличивалось содержание азота до 0.35%, что приводило к изменению отношения C : N в процессе эксперимента (рис. 2). К 20–60-м суткам инкубации это соотношение стабилизировалось (в пределах 5–8), что указывает на микробное происхождение углерода и азота в вариантах опыта [3].

В процессе своей жизнедеятельности микроорганизмы, с одной стороны, разрушали минерал, чтобы извлечь из него необходимые питательные элементы, а с другой – выделяли продукты метаболизма, чем изменяли свойства поверхности каолинита. Для оценки этих изменений определяли основные физические свойства исходного минерала при инкубации в присутствии микроорганизмов и в контрольных образцах.

Для всех образцов определяли краевые углы смачивания (КУС) методом статической “сидячей” капли. На рис. 3 представлены величины угла смачивания в момент времени, когда капля “сядет”, т.е. полностью соприкоснется с поверх-

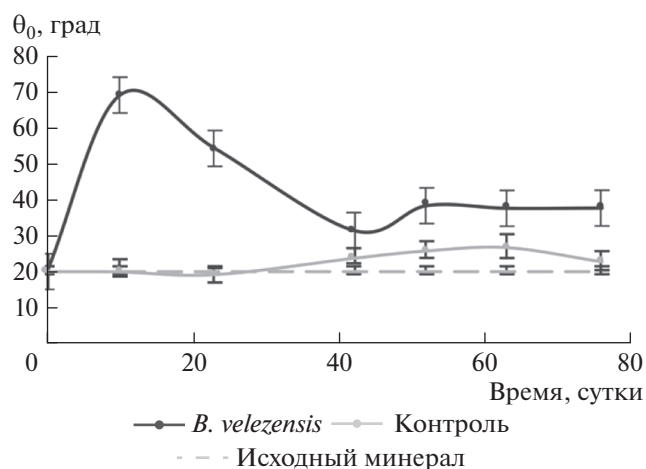


Рис. 3. Динамика краевого угла смачивания (θ_0 , град) за время эксперимента. В точках указаны 25, 50 и 75-процентные квантили экспериментальных данных.

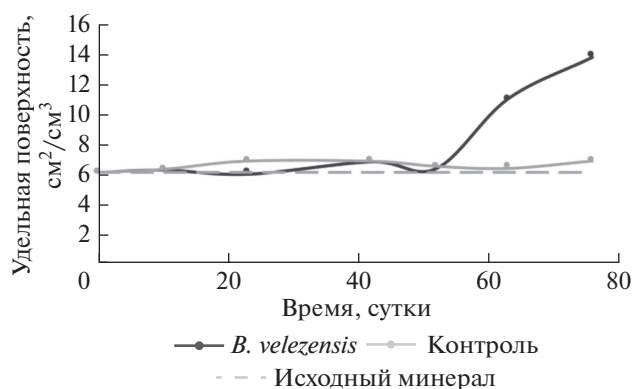


Рис. 4. Динамика удельной поверхности ($\text{м}^2/\text{см}^3$) минерала за время эксперимента (сутки).

ностью минерала, но еще не начнет впитываться в образец — θ_0 . В образцах разного времени инкубации с чистой культурой *B. velezensis* КУС значительно выше (69° – 35°), чем в исходном минерале (19.9°) и в контроле (19.9° – 26°). Максимальная гидрофобность поверхности минерала наблюдалась на десятые сутки эксперимента, КУС равнялся 69° . Далее гидрофобность снижалась и к сороковому дню эксперимента достигала постоянного уровня порядка 35° .

Для характеристики КУС использовали метод изучения скорости впитывания капли — чем дольше капля остается на поверхности анализируемого образца, тем выше КУС. Эти исследования показали, что время впитывания образца каолинита к концу эксперимента достигало 1.3 с, а соответствующего контрольного образца и исходного каолинита — около 0.3 с. По этим данным рассчитывали КУС, они составляли соответственно 38° , 22° и 20° . Это указывает на почти

двукратное увеличение КУС во время эксперимента за счет микробной деятельности. Инкубация штаммом *B. velezensis* во всех случаях вела к гидрофобизации поверхности по сравнению с контрольными образцами, что может быть связано с гидрофобным характером продуктов жизнедеятельности микроорганизмов. К концу эксперимента в образцах с бактериями происходило существенное увеличение содержания органического углерода. Обнаружена достоверная (при уровне значимости 0.01) корреляция между краевым углом смачивания и содержанием $C_{\text{орг}}$ — коэффициент ранговой корреляции Спирмена равен 0.78, тогда как критическое значение для этого уровня значимости составляет 0.70. На рис. 4 представлены результаты определения удельной поверхности образцов методом низкотемпературной адсорбции азота. Через два месяца инкубации произошел резкий рост удельной поверхности в образцах с микроорганизмами, и к концу эксперимента удельная поверхность модифицированных образцов достигала $14 \text{ м}^2/\text{см}^3$. Из экспериментальных исследований удельной поверхности известно, что это физическое свойство считается консервативным, меняется постепенно и в узком диапазоне. Обычно его преобразования связывают с изменением гранулометрического состава, содержания органического вещества, либо с изменением поверхности минералов. В данном случае, вероятно, произошло изменение поверхности минералов, прежде всего, за счет того, что бактерии потребляли ион К из примесей и, возможно, частично разрушая минеральную структуру каолинита. По-видимому, поверхность минерала при таком воздействии становилась более рыхлой, трещиноватой, с большим количеством каверн и чешуек. Отметим, что последующие эксперименты по анализу поверхности частиц с помощью сканирующей электронной микроскопии подтвердили это предположение.

Прямым доказательством формирования микроагрегатов (проагрегатов) было исследование гранулометрического и микроагрегатного составов. Для получения полной картины изменения гранулометрического состава суспензии и появления в ней микроагрегатов провели гранулометрический анализ суспензии на разных этапах возможного формирования микроагрегатов (или проагрегатов) каолинита с микроорганизмами. Все дифференциальные распределения гранулометрического и микроагрегатного составов имеют форму кривой с одним ярко выраженным пиком (рис. 5А). В гранулометрическом составе всех образцов преобладает фракция 10–50 мкм, на которую приходится порядка 60%. Также существенным было содержание фракций 5–10 и 1–5 мкм — 20 и 13% соответственно. В микроагрегатном составе также наблюдалось преобладание (более 60%) фракции 10–50 мкм, а содержание фракций

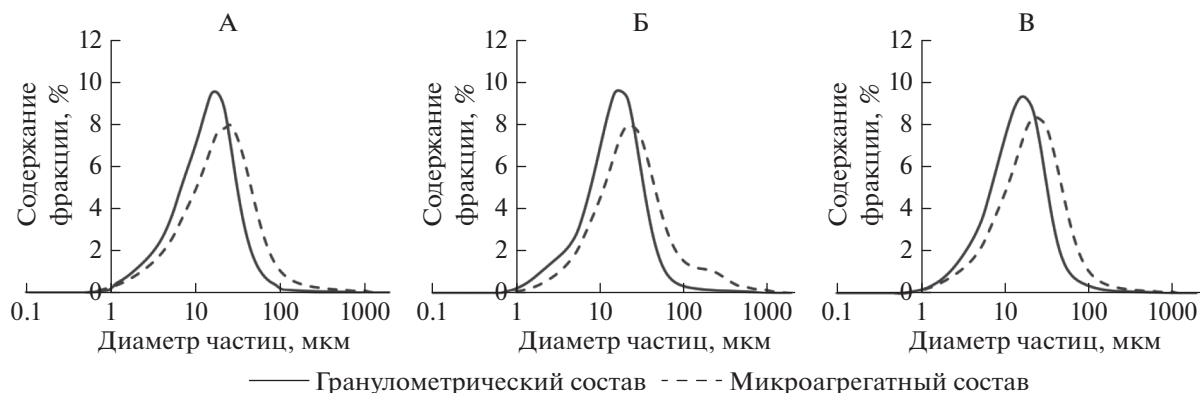


Рис. 5. Гранулометрический и микроагрегатный составы образцов каолинита к концу срока инкубации штаммом *B. velezensis* (Б), соответствующего контрольного образца (В) и исходного каолинита (А).

5–10 и 1–5 мкм снижалось в среднем на 5%, в то время как содержание фракций крупнее 50 мкм возрастало (содержание микроагрегатной фракции 50–250 мкм выше гранулометрической на 10%). По-видимому, в данном эксперименте был достигнут второй этап на пути агрегации частиц, определяющий связывание органо-минеральных ядер в микроагрегаты [7]. За время эксперимента происходило уменьшение содержания частиц диаметром 1–5 и 5–10 мкм с 11.1 до 7% и с 15.5 до 13.2% соответственно. В то же время наблюдалось увеличение количества агрегатов диаметром 50–250 и 250–500 мкм на 5.4 и 1.5%. В контрольных образцах за время инкубации не происходило значимых изменений. Содержание микроагрегатов размером от 30 до 2000 мкм к концу эксперимента увеличилось на 8% за счет более мелких

фракций. Показатель, который рассчитывали как разность содержания фракций по результатам исследования микроагрегатного и гранулометрического состава образцов, приведен на рис. 6. Отрицательная разница указывает на количество илистых частиц, задействованных в образовании микроагрегатов. Переход значений Δ в положительную область свидетельствует о преобладании в указанном диапазоне размеров частиц микроагрегатных фракций над гранулометрическими, характеризует область устойчивых микроагрегатов. К концу срока инкубации произошло увеличение содержания устойчивых микроагрегатов на 6.5% в основном за счет частиц диаметром от 50 до 400 мкм.

Таким образом, микробиологическая активность приводила к уменьшению содержания частиц размерами от 0.5 до 20 мкм (илистых частиц), которые приняли участие в формировании укрупненных частиц (проагрегатов) размерами от 20 до 100 мкм. По результатам проведенного модельного эксперимента можно оценить формирование микроагрегатов (проагрегатов) более крупного диаметра из исходного глинистого материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного модельного эксперимента с суспензией каолинита в присутствии культуры *B. velezensis* в течение двух месяцев обнаружено увеличение содержания белка, углерода и азота. Предполагается, что микроорганизмы потребляли необходимый для жизнедеятельности катион калия из глинистого минерала, формируя микробную биомассу и специфические выделения белковой природы. Эти соединения модифицировали поверхность минералов, что подтверждалось существенным изменением краевого угла смачивания, увеличивавшимся от 20° до 40°, а также заметным ростом микроагрегатной фрак-

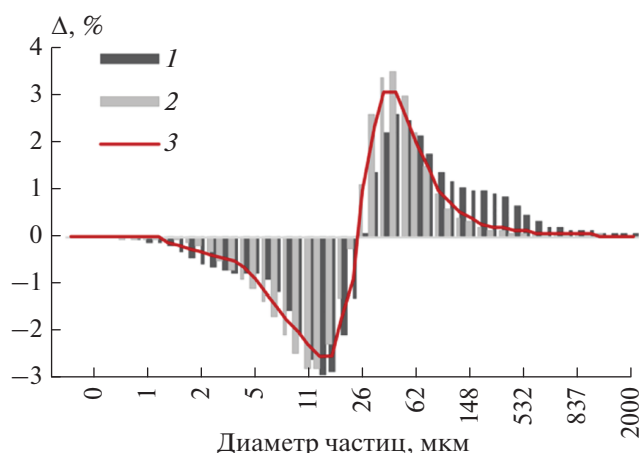


Рис. 6. Разница между содержанием частиц в микроагрегатном и гранулометрическом составах (Δ , %) в образцах каолинита при инкубации с микроорганизмами к концу срока инкубации штаммом *B. velezensis* (1), соответствующего контрольного образца (2) и исходного каолинита (3).

ции. Уже через два месяца инкубации в присутствии *V. velezensis* наблюдалось увеличение содержания фракций 50–250 и 250–500 мкм микроагрегатного состава на 5.4 и 1.5% соответственно.

Проведенный модельный эксперимент позволил сделать следующее заключение по механизму формирования микроагрегатов (проагрегатов) в минеральной глинистой суспензии. Микроорганизмы извлекают необходимый катион калия из примесей образца природного каолинита, увеличивают суммарную биомассу и выделяют различные метаболиты. Эти вещества модифицируют поверхность глинистого минерала. Происходит превращение ее из гидрофильной в частично гидрофобную, что способствует соединению отдельных частиц минерала в агрегатоподобные образования в результате склеивания мелких минеральных элементарных частиц в проагрегаты.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены частично за счет средств РФФИ, проект № 19-04-01056.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барбер С.А. Биологическая доступность питательных веществ в почве. Механистический подход. Пер. с англ. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.
2. Верховцева Н.В. Трансформация соединений железа гетеротрофными бактериями. Дис. д-ра биол. наук. М., 1993. 320 с.
3. Заварзин Г.А. Лекции по природоведческой микробиологии. М.: Наука, 2003. 348 с.
4. Минеев В.Г., Сычев В.Г., Амелянчик О.А., Большова Т.Н., Гомонова Н.Ф., Дурынина Е.П., Егоров В.С., Егорова Е.В., Едемская Н.Л., Карпова Е.А., Прижукова В.Г. Практикум по агрохимии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 689 с.
5. Михайловская Н.А. Количественная оценка активности калиймобилизующих бактерий и их эффективность на посевах озимой ржи // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграрных навук. 2006. № 3. С. 41–46.
6. Най П.Х., Тинклер П.Б. Движение растворов в системе почва–растение. М.: Колос, 1980. 365 с.
7. Семенов В.М., Козут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
8. Софинская О.А., Костерин А.В., Костерина Е.А. Краевые углы смачивания на границе вода–воздух препаратов загрязненных углеводородами почв и глинистых минералов // Почвоведение. 2016. № 12. С. 1456–1463. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16120121>
9. Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Яшин М.А., Лазарев В.И., Тюгай З.Н., Милановский Е.Ю. Контактные углы смачивания и водоустойчивость почвенной структуры // Почвоведение. 2015. № 6. С. 693–701. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15060064>
10. Хэнкс Р.Дж., Ашкрофт Дж.Л. Прикладная физика почв. Влажность и температура почвы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 151 с.
11. Шеин Е.В., Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д., Поздняков А.И., Тюгай З.Н., Початкова Т.Н., Дембовецкий А.В. Практикум по физике твердой фазы почв. М.: Буки-Веди, 2017. 119 с.
12. Vykova G., Tyugai Z., Milanovskiy E., Shein E. Soil-water contact angle of some soils of the Russian Plane // European Geosciences Union General Assembly 2016. Germany, 2016. V. 18. P. EGU2016–505.
13. Cookson W.R., Abaye D.A., Marschner P., Murphy D.V., Stockdale E.A., Goulding K.W.T. The contribution of soil organic matter fractions to carbon and nitrogen mineralization and microbial community size and structure // Soil Biol. Biochem. 2005. V. 37. P. 1726–1737.
14. De Gryze S., Jassogne L., Bossuyt H., Six J., Merckx R. Water repellence and soil aggregate dynamics in a loamy grassland soil as affected by texture // Eur. J. Soil Sci. 2006. V. 57. P. 235–246.
15. Goebel M.-O., Bachmann J., Woche S.K., Fischer W.R. Soil wettability, aggregate stability, and the decomposition of soil organic matter // Geoderma. 2005. V. 128. P. 80–93.
16. Imbufe A.U., Patti A.F., Burrow D., Surapaneni A., Jackson W.R., Milner A.D. Effects of potassium humate on aggregate stability of two soils from Victoria, Australia // Geoderma. 2005. V. 125. P. 321–330.
17. Kalbitz K., Schwesig D., Rethemeyer J., Matzner E. Stabilization of dissolved organic matter by sorption to the mineral soil // Soil Biol. Biochem. 2005. V. 37. P. 1319–1331.
18. Lehmann J., Kluyaugl J., Solomon D. Organic matter stabilization in soil microaggregates: implications from spatial heterogeneity of organic carbon contents and carbon forms // Biogeochemistry. 2007. V. 85. P. 45–57. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9105-3>
19. Milanovskiy E. Yu., Shein E. V. Conceptual model of water stable soil aggregate // J. Ege University Faculty Agriculture. Special Issue. 2015. P. 29–36.
20. Shang J., Flury M., Harsh J.B., Zollars R.L. Contact angles of aluminosilicate clays as affected by relative humidity and exchangeable cations // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2010. V. 353. № 1. P. 1–9.
21. Shein E., Milanovskiy E. Soil structure formation: role of the soil amphiphilic organic matter // Biogeosystem Technique. 2014. V. 2. № 2. P. 182–190.
22. Verkhovtseva N.V., Milanovskiy E. Yu., Shein E. V. Composition of microbial community at biodegradation of different plant litter // Book of Abstracts. Wageningen Soil Conference “Soil Science in a Changing World”. 27–31 August 2017. Wageningen, The Netherlands, 2017. P. 214–214.

Aggregate Formation in the Kaolinite Suspension during the Microbiological Modification of Clay Surface

E. V. Shein^{1,2,*}, N. V. Verkhovtseva¹, G. S. Bykova¹, and E. B. Pashkevich¹

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

²*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

**e-mail: evgeny.shein@gmail.com*

To prove the aggregate-forming role of microorganisms, which modify the hydrophilic surface of minerals to amphiphilic, a model experiment was conducted. Microorganisms *Bacillus velezensis* obtained via washing-off from river sand and kaolinite containing potassium ions (up to 1%) in the sorbed state and in mineral admixtures were added to sterile liquid medium. In the course of two months of incubation, the contents of proteins, carbon, and nitrogen in the medium increased, and the C : N ratio became close to 5. It was supposed that microorganisms consuming the potassium ion, which is necessary for their vital activity, could form protein compounds in the form of specific secretions of glycopeptide and polysaccharide nature. These compounds hydrophobized the surface of minerals (contact angle increased from 20° to 40°), changed the specific surface area, and increased the content of microaggregate fractions of 50–250 and 250–500 μm by 5.4 and 1.5%, respectively. Incubation with *B. velezensis* led to hydrophobization of the kaolinite surface in comparison with the control samples, which could be related to the amphiphilic nature of the products of microbial activity. In turn, the hydrophobization of the mineral surface led to the appearance of hydrophobic bonds between mineral particles and the formation of organomineral microaggregates.

Keywords: microaggregates, kaolinite, contact angle, *Bacillus velezensis*, hydrophobicity, microaggregate composition, particle size distribution