

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ, МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ И ГРУНТОВЕДЕНИЕ

УДК 550.72:579.26

Трансформация минерального состава дисперсного грунта в условиях микробиологического воздействия

Н.Г. Максимович, А.Д. Деменев, В.Т. Хмурчик

Естественнонаучный институт Пермского государственного
национального исследовательского университета

614990, Пермь, ул. Генкеля, 4. E-mail: demenevartem@gmail.com

(Статья поступила в редакцию 30 октября 2020 г.)

Микроорганизмы широко распространены в грунтах разного генезиса и могут оказывать значительное влияние на их свойства. Методами рентгенофазового, рентгенофлуоресцентного и электронно-микроскопического анализов исследовали влияние на минеральный и химический состав глинистого грунта жизнедеятельности аборигенных бактерий разных физиологических групп. Активизация жизнедеятельности микрофлоры грунта приводила как к разрушению породообразующих минералов, так и к новообразованию минералов – кальцита и железосодержащих минералов. При электронно-микроскопических исследованиях в образцах грунта регистрируются минеральные новообразования, а между микроагрегатами грунта – новые связи.

Ключевые слова: *микроорганизмы, физиологические группы, силикаты, карбонаты, разрушение минералов, новообразование минералов*

DOI: 10.17072/psu.geol.20.1.24

Введение

Микроорганизмы, обладающие разнообразными ферментными системами и легко приспосабливающиеся к изменениям условий окружающей среды, играют важную роль в круговороте химических элементов. Известно, что микроорганизмы способны разрушать важнейшие минеральные компоненты горных пород, такие как силикаты и алюмосиликаты. Объемы выноса элементов из минералов в присутствии микроорганизмов в два-три раза выше, чем под действием воды. Особенности выноса элементов определяются прочностью связей атомов в структуре кристаллической решетки и интенсивностью микробиологического воздействия. Более активное влияние на грунт при активизации аборигенного микробиоценоза обусловлено способностью микробов окис-

лять и восстанавливать элементы с переменной валентностью, а также влиянием метаболитов (минеральных и органических кислот, щелочей, слизей, поверхностно-активных веществ и др.) (Кузнецов и др., 1962; Иванов, Каравайко, 2004; Ehrlich, 2008). В результате активизации жизнедеятельности микроорганизмов происходит изменение минерального состава грунтов, их прочностных и других характеристик (Дашко и др., 2014; Dashko, Shidlovskaya, 2016; Ivanov et al., 2020).

Целью настоящего исследования было определение в лабораторных условиях изменения химического и минерального состава глинистого грунта, типичного для верхней части геологического разреза территории пригорода Перми, при активизации в нем жизнедеятельности аборигенных микроорганизмов разных физиологических групп.

Методы исследования

Глинистый грунт, отобранный в пригороде Перми с глубины 0,3–0,4 м, представлял собой суглинок тяжелый. Активизацию в нем жизнедеятельности аборигенных микроорганизмов разных физиологических групп проводили следующим образом. Навески грунта сырой массой 100 г помещали в колбы и заливали следующими средами для развития физиологических групп бактерий: аэробные гетеротрофные бактерии – сухой мясо-пептонный бульон 1,5 г/л, глюкоза 1 г/л; железовосстанавливающие бактерии – NaCl 8,5 г/л, KH_2PO_4 0,3 г/л, Na_2HPO_4 0,6 г/л, NH_4Cl 0,3 г/л, глюкоза 1 г/л; сульфатвосстанавливающие бактерии – среда для аэробных гетеротрофных бактерий 100 мл/л, NaCl 8,5 г/л, KH_2PO_4 0,3 г/л, Na_2HPO_4 0,6 г/л, NH_4Cl 0,3 г/л, Na_2SO_4 0,5 г/л. Среда стерилизовали автоклавированием при 0,5 атм, все работы проводили асептически. В контрольном опыте использовали 200 мл дистиллированной воды. Для развития аэробных гетеротрофных бактерий также использовали 200 мл среды. Среда для развития железовосстанавливающих и сульфатвосстанавливающих бактерий доливали в колбы доверху. Колбы помещали в шейкер-термостат Multitron Standart (Infors AG, Швейцария) и инкубировали в течение 31 суток при комнатной температуре и 200 об/мин. Грунт трижды промывали 400 мл дистиллированной воды и сушили в термощкафу при 60 °С.

Рентгенофазовый анализ минеральной фазы грунта проводили на рентгеновском порошковом дифрактометре D2 Phaser (Bruker, ФРГ). Осуществляли безэталонный анализ на основе метода Ритвельда, сумму минеральных фаз приводили к 100%. Рентгенофлуоресцентный анализ химического состава грунта проводился на волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре последовательного типа действия S8 Tiger (Bruker, ФРГ), сумму элементов приводили к 100%. Электронно-микроскопические исследования грунта выполняли на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV (JEOL, Япония) после напыления образцов углеродом. Анализы были выполнены в Секторе наноминералогии ПГНИУ (г. Пермь), за что авторы благодарят его сотрудников.

Результаты и их обсуждение

Для изучения трансформации минерального и химического состава глинистого грунта в результате активизации жизнедеятельности аборигенных микроорганизмов разных физиологических групп был выполнен комплекс исследований, включающий рентгенофазовый анализ, рентгенофлуоресцентный анализ и электронно-микроскопические исследования. Результаты рентгенофазового и рентгенофлуоресцентного анализов приведены в табл. 1 и 2, соответственно.

Таблица 1. Минеральный состав кристаллической фазы образцов, мас. %

№ образца и вид обработки	Породообразующие минералы (кварц, плагиоклаз, полевой шпат)	Гидрослюда (иллит)	Хлорит	Кальцит	Доломит
1 – контрольный	74,2	7,8	6,5	8,8	2,7
2 – аэробные гетеротрофные бактерии	63,8	14,5	11,9	8,9	0,9
3 – железовосстанавливающие бактерии	62,6	17,4	14,4	4,1	1,5
4 – сульфатвосстанавливающие бактерии	63,5	13,0	12,0	10,3	1,2

Таблица 2. Химический состав образцов, мас. %

Элемент	Номер образца*			
	1	2	3	4
Na ₂ O	1,54	1,38	1,43	1,60
MgO	2,15	2,39	3,27	2,28
Al ₂ O ₃	11,70	12,63	13,00	12,34
SiO ₂	63,61	60,61	60,82	61,00
P ₂ O ₅	0,07	0,08	0,26	0,15
SO ₃	0,00	0,00	0,12	0,49
K ₂ O	1,88	1,91	2,32	1,90
CaO	7,16	6,95	3,87	6,59
TiO ₂	0,67	0,67	0,84	0,69
MnO	0,12	0,12	0,12	0,13
Fe ₂ O ₃	4,71	5,37	7,75	5,34
ППП**	8,08	8,79	8,55	8,24

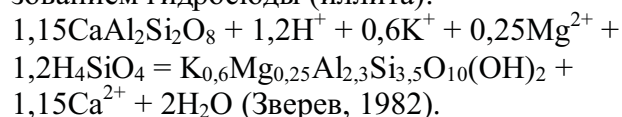
Примечания: * Номер образца соответствует таковому в табл. 1. ** ППП – потери при прокаливании в образцах при 900 °С.

Поскольку суммы значений показателей для каждого образца в таблицах приведены к 100%, то при интерпретации полученных результатов необходимо учитывать не только сами значения показателей, но и соотношения между ними.

По данным рентгенофазового анализа в исследуемом грунте присутствуют две группы минералов, составляющих кристаллическую фазу: силикаты (кварц, полевые шпаты, гидрослюда (иллит) и хлорит) и карбонаты (кальцит и доломит). Эти же две группы минералов присутствуют и в образцах грунта, подвергнутых обработке разными физиологическими группами бактерий, однако меняются количественные соотношения минералов как между группами, так и внутри групп.

Результаты анализов показывают, что активизация жизнедеятельности микроорганизмов в грунте приводит к разрушению в нем породообразующих минералов – их содержание в опытных образцах снижается примерно на 10% в сравнении с контрольным. Известно, что кварц может растворяться под действием бактерий (Bennett, 1991; Hiebert, Bennett, 1992), однако это не происходит в ходе нашего эксперимента, так как соотношение Al₂O₃/SiO₂, равное 0,2, остается постоянным во всех пробах. Следовательно, идет разрушение алюмосиликатов, например, полевых шпатов, в том числе плагиоклазов. Плагиоклазы, за исключением альби-

та, относятся к умеренно устойчивым и малоустойчивым к выветриванию минералам (Трофимов и др., 2005). Разрушение бактериями полевых шпатов наблюдали как в лабораторных (Barker et al., 1998), так и в природных условиях (Hiebert, Bennett, 1992; Bennett et al., 2001). Снижение содержания породообразующих минералов в кристаллической фазе образцов, подвергнутых бактериальному воздействию, приводило, соответственно, к пропорциональному увеличению содержания в кристаллической фазе глинистых минералов (гидрослюда и хлорита), так как сумму минеральных фаз при анализе всегда приводили к 100%. Однако, в образце 3 наблюдается незначительное отступление от пропорции – отношение гидрослюда/породообразующие минералы (0,3) несколько выше отношения хлорит/породообразующие минералы (0,2), что может быть объяснено, с одной стороны, протеканием самопроизвольной реакции кислого гидролиза плагиоклазов (например, анортита) с образованием гидрослюда (иллита):



С другой стороны, это может являться ошибкой анализа вследствие его недостаточной точности, так как соотношение иллит/хлорит в образце не меняется. По этой же причине (постоянство соотношения иллит/хлорит), а также вследствие постоянства

соотношения $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ мы предполагаем отсутствие разрушения глинистых минералов в образцах грунта, в которых происходило развитие микроорганизмов, и наличие такового для пороодообразующих минералов — полевых шпатов.

В опытных образцах грунта наблюдается снижение суммарного содержания и содержания отдельных карбонатных минералов (за исключением образца 4, в котором растет содержание кальцита, и за счет этого не меняется суммарное содержание карбонатов — объяснение см. ниже). Способность разных групп микроорганизмов разрушать карбонатные минералы была известна и ранее (Кузнецов и др., 1962; Иванов, Каравайко, 2004; Ehrlich, 2008). Видно также, что разрушение карбонатных минералов идет в основном за счет разрушения доломита. Больше разрушение доломита относительно кальцита при выветривании объясняют большей реакционной способностью магнитофитной фазы доломита (Cultrone et al., 2008). Исключением является образец 3, в котором разрушение карбонатных минералов произошло примерно в одинаковой пропорции — разрушилось 53% кальцита и 44% доломита относительно их содержания в контрольном образце. По нашему мнению, это может быть связано с тем, что метаболиты железовосстанавливающих бактерий имеют большее сродство (т.е. большую растворяющую способность) к карбонатным минералам в сравнении с метаболитами аэробных гетеротрофных бактерий. Этот же образец характеризуется почти вдвое большим значением отношения $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ по сравнению с контролем (0,13 против 0,07). Известно, что железовосстанавливающие бактерии способны восстанавливать в алюмосиликатах как структурные, так и связанные/адсорбированные в межслоевом пространстве минералов ионы трехвалентного железа до двухвалентного состояния (Lovley, 1993). По нашему мнению, после выхода в раствор эти ионы могут образовать новые минералы, например, с фосфат-ионами среды и снова перейти в твердую фазу. Следует отметить, что образец 3 характеризуется также повышенным содержанием фосфора, что может служить подтверждением данного предположения. Ранее нами уже наблюдалось

новообразование железосодержащих минералов из ионов железа, образующихся в результате жизнедеятельности железовосстанавливающих бактерий (Maksimovich et al., 2016). Отсутствие минералов железа в кристаллической фазе грунта может являться результатом их нахождения в аморфном состоянии. Другим механизмом повышения содержания в образце фосфора может быть сорбция фосфат-ионов среды на глинистых минералах, что требует дополнительных исследований. Разрушение алюмосиликатов во всех опытных образцах, как отмечено выше, было примерно одинаковым; в образцах 2 и 4 также наблюдался рост отношения $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ по сравнению с контролем, но он был значительно меньше, чем в образце 3. По нашему мнению, это является свидетельством того, что железовосстанавливающие бактерии преимущественно восстанавливали ионы железа, связанные/адсорбированные в межслоевом пространстве минералов, которые были для них более доступны, чем структурные ионы железа. При этом, разумеется, не происходило дополнительного, относительно образцов 2 и 4, разрушения самих минералов — большее на 1% разрушение пороодообразующих минералов в образце 3, по нашему мнению, не может являться причиной почти полуторакратного увеличения отношения $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ по сравнению с образцами 2 и 4.

Известно, что в анаэробных условиях, характеризующихся развитым бактериальным процессом сульфатвосстановления, может идти осаждение карбонатных минералов (Иванов, Каравайко, 2004; Ehrlich, 2008; Заварзин, 2002), в частности, кальцита (Hendry, 1993; Hammes, Verstraete, 2002), так как прямая биоминерализация доломитом или протодоломитом неизвестна, и считается, что их образование идет в условиях диагенеза (Заварзин, 2002). Таким образом, рост содержания кальцита как в кристаллической фазе карбонатных минералов, так и в общей кристаллической фазе в образце 4 относительно контрольного образца может быть объяснено протеканием бактериального процесса восстановления сульфатов, в результате которого происходит защелачивание среды, и может чисто химическим путем идти новообразование кальцита. Этим же процессом объ-

ясняется наличие повышенного содержания серы в образце 4, так как продуктом процесса восстановления сульфатов является сероводород, образующий с металлами нерастворимые сульфиды. Повышенное содержание в образце 4 фосфора может являться результатом образования фосфатных минералов из продуктов разложения кристаллической фазы грунта сульфатвосстанавливающими микроорганизмами и фосфат-ионов среды. Согласно Зобеллу (1972), с повышением pH среды возникает тенденция к выпадению фосфат-иона в виде фосфата кальция. Отсутствие сульфидных и фосфатных минералов в кристаллической фазе грунта после воздействия микроорганизмов может являться результатом нахождения этих минералов в аморфном состоянии.

Для выявления особенностей микроструктуры образцов — морфологических вариаций элементов грунта и агрегатов, наличия пустотного пространства (пор и трещин) и т. д. — проводили электронно-микроскопические исследования. Для каждого образца последовательно делались снимки с увеличением от 2,5 до 20 тысяч крат с целью определения особенностей в размерностях от макрозерен к микрочастицам, а также уточнения структуры агрегатов и других деталей строения.

В контрольном образце в большом количестве присутствовали агрегаты разной формы, а также одиночные частицы кварца и

полевых шпатов. Пустотное пространство было представлено межзерновыми порами и трещинами (рис. 1).

При активизации в грунте жизнедеятельности аэробных гетеротрофных бактерий на зернах обломочных минералов появляются нарастания и пленки (рис. 2). В центральной части рис. 2в видно формирование между микроагрегатами так называемых биогенно обусловленных структурных связей. Данные связи формируются за счет выделения микроорганизмами различных продуктов метаболизма и приводят к агрегации частиц грунта, вследствие чего возрастает содержание структурных элементов больших размеров и увеличивается пористость грунтов (Иванов, 2015).

При активизации жизнедеятельности сульфатвосстанавливающих бактерий в образце грунта наблюдается появление крупных (до 100 мкм) агрегатов, сложенных чешуйчато-листоватыми и палочкообразными частицами размером 1-5 мкм в случайной ориентировке друг относительно друга (рис. 4).

При активизации жизнедеятельности железовосстанавливающих бактерий в образце грунта появляются пористые стяжения уплощенной формы и небольшие волосовидные и игольчатые новообразования (рис. 3а, б), а также биогенно обусловленные структурные связи между микроагрегатами (рис. 3в).

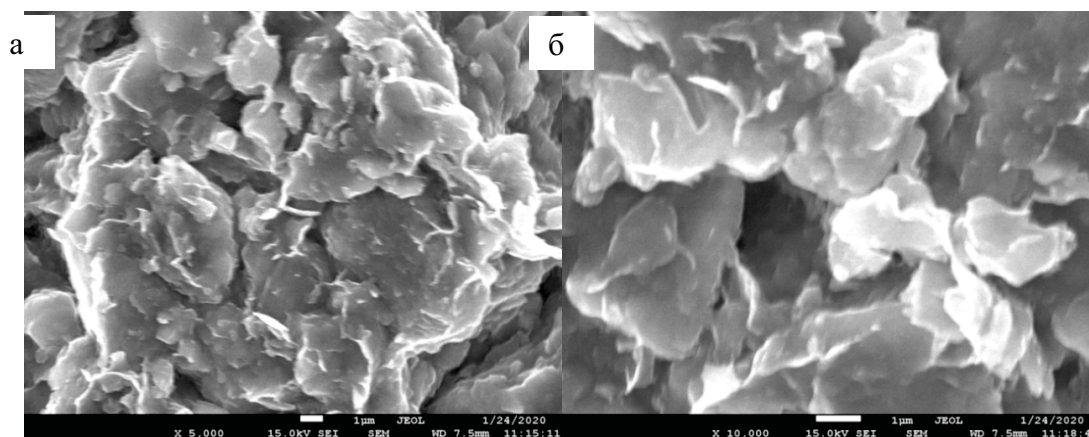


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение поверхности образца 1: а) увеличение $\times 5000$, б) увеличение $\times 10000$

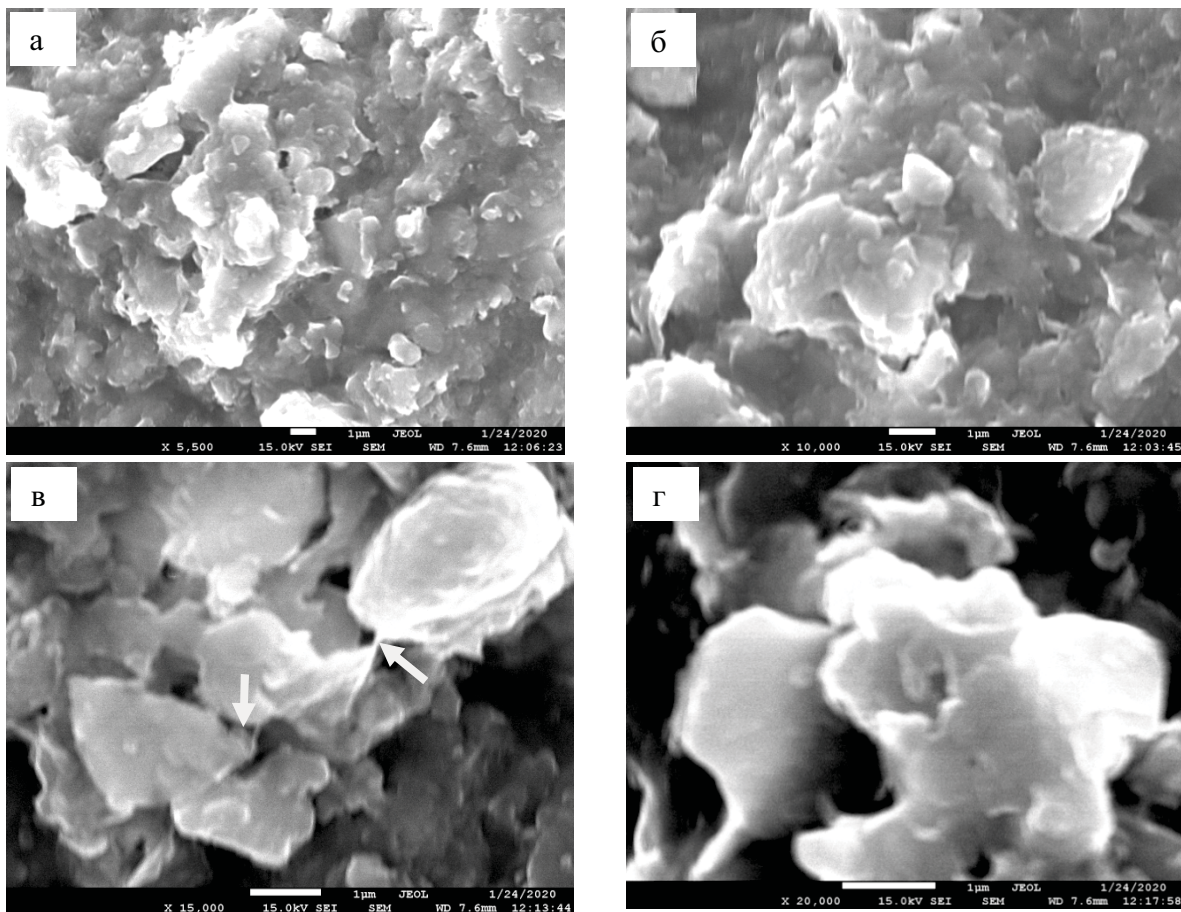


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение поверхности образца 2: а) увеличение $\times 5000$, б) увеличение $\times 10000$, в) увеличение $\times 15000$, г) увеличение $\times 20000$; стрелками отмечено формирование связей между микроагрегатами)

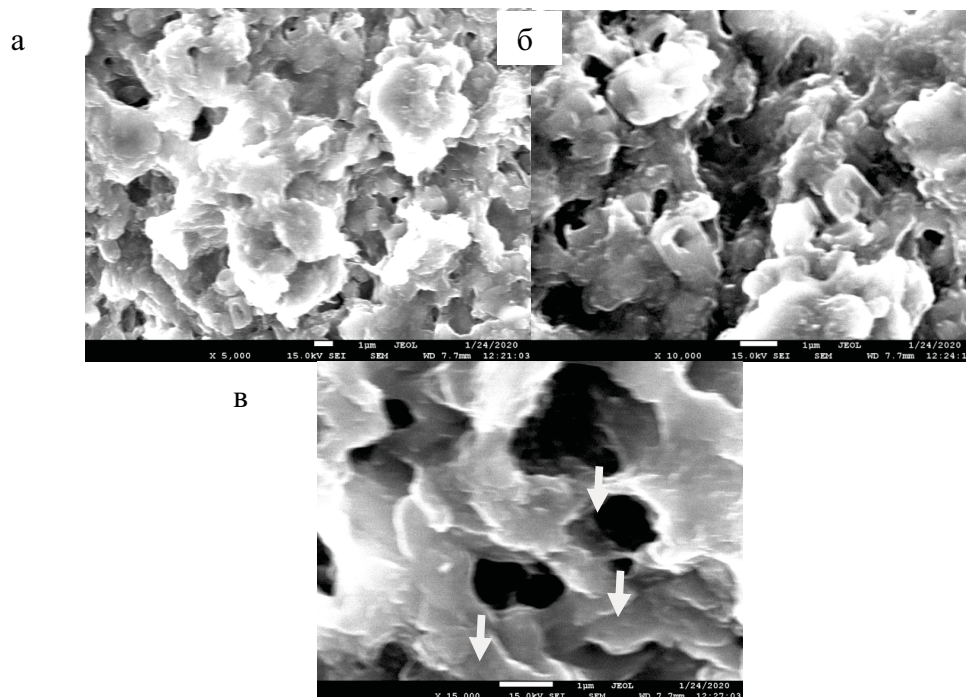


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение поверхности образца 3: а) увеличение $\times 5000$, б) увеличение $\times 10000$, в) увеличение $\times 15000$; стрелками отмечено формирование связей между микроагрегатами

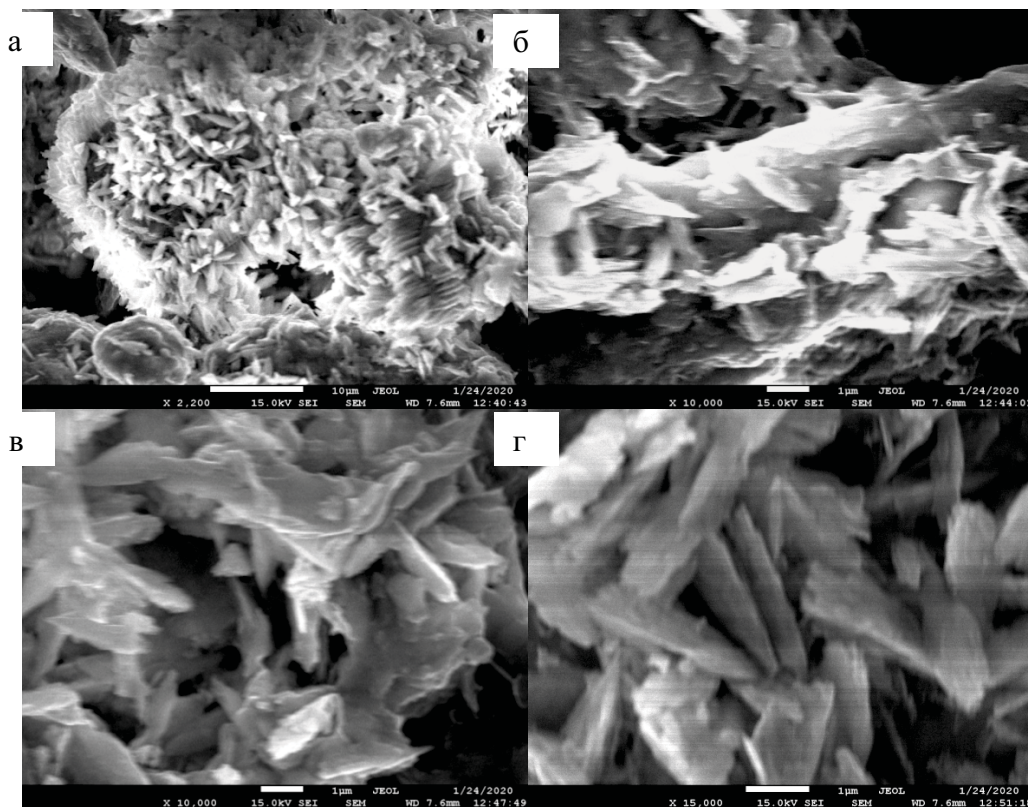


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение поверхности образца 4: а) увеличение $\times 2200$, б) увеличение $\times 10000$, в) увеличение $\times 10000$, г) увеличение $\times 15000$;

Микроструктура представленного образца схожа со структурой смешанослойных минералов типа монтмориillonит-иллит, содержащих набухающие слои. В образце наблюдается увеличенное количество микропор величиной 1-1,5 мкм, относящихся по своему размеру к межмикроагрегатным порам.

Формирование этих агрегатов, вероятно, обусловлено особенностями взаимодействия элементов грунта со средой для развития сульфатвосстанавливающих бактерий, содержащей в своем составе значительное количество сульфат-ионов и ионов аммония, или продуктами ее трансформации бактериями – сульфид-ионами и органическими кислотами.

Электронно-микроскопические исследования грунта показали, что при активизации жизнедеятельности аборигенной микрофлоры в грунте появляются минеральные новообразования, а между микроагрегатами грунта возникают биогенно обусловленные структурные связи.

Заключение

Результаты проведенных исследований показали, что активизация жизнедеятельности аборигенной микрофлоры глинистого грунта приводит к изменению его минерального и химического составов, а именно разрушению породообразующих минералов, в частности полевых шпатов. Под воздействием метаболитов микроорганизмов происходит разрушение и карбонатных минералов, особенно доломита. Одновременно в грунте может происходить новообразование минералов – кальцита при развитии сульфатвосстанавливающих бактерий и железосодержащих минералов при развитии железовосстанавливающих бактерий. Наличие в среде фосфат-ионов приводит к появлению их и в минеральной части грунта. Изменения в грунте находят свое отражение и на электронно-микроскопических изображениях – в образцах грунта регистрируются минеральные новообразования, а между микроагрегатами грунта возникают новые связи.

Библиографический список

- Дашико Р.Э., Власов Д.Ю., Шидловская А.В. Геотехника и подземная микробиота. СПб.: Институт «ПИ Геореоконструкция», 2014. 280 с.
- Заварзин Г.А. Микробный геохимический цикл кальция // Микробиология. 2002. Т. 71. № 1. С. 5–22.
- Зверев В.П. Роль подземных вод в миграции химических элементов. М.: Недра, 1982. 186 с.
- Зобелл К.Е. Микробная биогеохимия кислотного рода // Известия академии наук СССР, Серия биологическая. 1972. № 1. С. 23–42.
- Иванов М.В., Каравайко Г.И. Геологическая микробиология // Микробиология. 2004. Т. 73. № 5. С. 581–597.
- Иванов П.В. Изменение состава, строения и свойств дисперсных грунтов при активизации природного микробного комплекса: автор. дис. ... канд. геол.-мин. наук // Моск. гос. ун-т. Москва, 2015. 24 с.
- Кузнецов С.И., Иванов М.В., Ляликова Н.Н. Введение в геологическую микробиологию. М.: Наука, 1962. 239 с.
- Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский В.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров Р.С. Грунтоведение. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
- Barker W.W., Welch S.A., Chu S., Banfield J.F. Experimental observations of the effects of bacteria on aluminosilicate weathering // American Mineralogist. 1998. Vol. 83. P. 1551–1563.
- Bennett P.C. Quartz dissolution in organic-rich aqueous systems // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1991. Vol. 55. Iss. 7. P. 1781–1797.
- Bennett P.C., Rogers J.R., Choi W.J., Hiebert F.K. Silicates, silicate weathering, and microbial ecology // Geomicrobiological Journal. 2001. Vol. 18. Iss. 1. P. 3–19.
- Cultrone G., Arizzi A., Sebastián E., Rodríguez-Navarro C. Sulfation of calcitic and dolomitic lime mortars in the presence of diesel particulate matter // Environmental Geology. 2008. Vol. 56. P. 741–752.
- Dashko R., Shidlovskaya A. Impact of microbial activity on soil properties // Canadian Geotechnical Journal. 2016. Vol. 53. Iss. 9. P. 1386–1397.
- Ehrlich H.L. Geomicrobiology. 3rd ed. N.Y.: Marcel Dekker, Inc, 1996. 719 p.
- Hammes F., Verstraete W. Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation // Reviews in Environmental Science & Biotechnology. 2002. Vol. 1. P. 3–7.
- Hendry J.P. Calcite cementation during bacterial manganese, iron and sulphate reduction in Jurassic shallow marine carbonates // Sedimentology. 1993. Vol. 40. Iss. 1. P. 87–106.
- Hiebert F.K., Bennett P.C. Microbial control of silicate weathering in organic-rich ground water // Science. 1992. Vol. 258. P. 278–281.
- Ivanov P., Manucharova N., Nikolaeva S., Safonov A., Krupskaya V., Chernov M., Eustermehues K., Totsche K.U. Glucose-stimulation of natural microbial activity changes composition, structure and engineering properties of sandy and loamy soils // Engineering Geology. 2020. Vol. 265. Article 105381.
- Lovley D.R. Dissimilatory metal reduction // Annual Reviews in Microbiology. 1993. Vol. 47. P. 263–290.
- Maksimovich N.G., Khmurchik V.T., Demenev A.D. The role of microorganisms in elevating the turbidity of dam seepage water // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 50. Iss. 1. P. 6–8.

Transformation of the Mineral Composition of Dispersed Soil under Microbiological Impact

N.G. Maksimovich, A.D. Demenev, V.T. Khmurchik

Institute of Natural Sciences, Perm State University

4 Genkelya Str., Perm 614990. E-mail: demenevartem@gmail.com

Microorganisms are widespread in soils of different genesis and can have a significant effect on their properties. The influence of the vital activity of aboriginal bacteria of different physiological groups on the mineral and chemical composition of clay soil was investigated using methods of X-ray diffraction spectroscopy, X-ray fluorescence spectroscopy, and electron microscopic analyzes. The activation of the vital activity of the soil microflora led both to the destruction of rock-forming minerals and to the new formation of minerals - calcite and iron-containing minerals. During electron microscopic studies, mineral new formations were recorded in soil samples. Newly-formed connections between soil microaggregates were also observed.

Keywords: *microorganisms; physiological groups; silicates; carbonates; destruction of minerals; new formation of minerals.*

References

- Dashko R.E., Vlasov D.Yu., Shidlovskaya A.V.* 2014. Geotekhnika i podzemnaya microbiota [Geotechnics and underground microbiota]. Institut PI Georekonstruktsiya, Sankt-Peterburg, p. 280. (in Russian)
- Zavarzin G.A.* 2002. Mikrobnyy geokhimicheskiy tsikl kaltsiya [Microbial geochemical cycle of calcium]. *Microbiologiya*. 71(1):5–22. (in Russian)
- Zverev V.P.* 1982. Rol podzemnykh vod v migratsii khimicheskikh elementov [The role of groundwater in the migration of chemical elements]. Nedra. Moskva, p. 186. (in Russian)
- Zobell K.E.* 1972. Mikrobnaya biogeokhimiya kisloroda [Microbial biogeochemistry of oxygen]. *Izvestiya akademii nauk SSSR, Seriya biologicheskaya*. 1:23–42. (in Russian)
- Ivanov M.V., Karavayko G.I.* 2004. Geologicheskaya mikrobiologiya [Geological microbiology]. 73(5):581–597. (in Russian)
- Ivanov P.V.* 2015. Izmeneniye sostava, stroeniya i svoystv dispersnykh gruntov pri aktivizatsii prirodnogo mikrobnogo kompleksa [Changes in the composition, structure and properties of dispersed soils during the activation of the natural microbial complex]. Diss. kand. geol.-min. nauk, Moskva. (in Russian)
- Kuznetsov S.I., Ivanov M.V., Lyalikova N.N.* 1962. Vvedeniye v geologicheskuyu mikrobiologiyu [Introduction to Geological Microbiology]. Nauka, Moskva, p. 239. (in Russian)
- Trofimov V.T., Korolev V.A., Voznesenskiy V.A., Golodkovskaya G.A., Vasilchuk Yu.K., Ziangirov R.S.* 2005. Gruntovedeniye [Soil science]. MGU. Moskva, p. 1024. (in Russian)
- Barker W.W., Welch S.A., Chu S., Banfield J.F.* 1998. Experimental observations of the effects of bacteria on aluminosilicate weathering. *American Mineralogist*, 83:1551–1563.
- Bennett P.C.* 1991. Quartz dissolution in organic-rich aqueous systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(7):1781–1797.
- Bennett P.C., Rogers J.R., Choi W.J., Hiebert F.K.* 2001. Silicates, silicate weathering, and microbial ecology. *Geomicrobiological Journal*, 18(1):3–19.
- Cultrone G., Arizzi A., Sebastián E., Rodríguez-Navarro C.* 2008. Sulfation of calcitic and dolomitic lime mortars in the presence of diesel particulate matter. *Environmental Geology*, 56:741–752.
- Dashko R., Shidlovskaya A.* 2016. Impact of microbial activity on soil properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(9):1386–1397.
- Ehrlich H.L.* 1996. *Geomicrobiology*. N.Y.: Marcel Dekker, Inc, p. 719.
- Hammes F., Verstraete W.* 2002. Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 1:3–7.
- Hendry J.P.* 1993. Calcite cementation during bacterial manganese, iron and sulphate reduction in Jurassic shallow marine carbonates. *Sedimentology*, 40(1):87–106.
- Hiebert F.K., Bennett P.C.* 1992. Microbial control of silicate weathering in organic-rich ground water. *Science*, 258:278–281.
- Ivanov P., Manucharova N., Nikolaeva S., Safonov A., Krupskaya V., Chernov M., Eusterhues K., Totsche K.U.* 2020. Glucose-stimulation of natural microbial activity changes composition, structure and engineering properties of sandy and loamy soils. *Engineering Geology*. 265, Article 105381.
- Lovley D.R.* 1993. Dissimilatory metal reduction. *Annual Reviews in Microbiology*, 47:263–290.
- Maksimovich N.G., Khmurchik V.T., Demenev A.D.* 2016. The role of microorganisms in elevating the turbidity of dam seepage water. *Power Technology and Engineering*, 50(1):6–8.