



# БИОТЕХНОЛОГИИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ

## BIOTECHNOLOGIES IN ENGINEERING GEOLOGY

### МАКСИМОВИЧ Н.Г.

Заведующий лабораторией геологии техногенных процессов и заместитель директора по научной работе Естественнонаучного института Пермского государственного национального исследовательского университета (ЕНИ ПГНИУ), к.г.-м.н., г. Пермь, nmax54@gmail.com

### ХМУРЧИК В.Т.

Ведущий научный сотрудник Естественнонаучного института Пермского государственного национального исследовательского университета (ЕНИ ПГНИУ), к.б.н., г. Пермь, khmurchik.vadim@mail.ru

### MAKSIMOVICH N.G.

Head of the Laboratory of Technogenic Processes Geology and deputy science director of the Institute of Natural Sciences of the Perm State National Research University (INS PSNRU), PhD (candidate of science in Geology and Mineralogy), Perm, nmax54@gmail.com

### KHMURCHIK V.T.

Leading staff scientist of the Institute of Natural Sciences of the Perm State National Research University (INS PSNRU), PhD (candidate of science in Biology), Perm, khmurchik.vadim@mail.ru

#### Ключевые слова:

микроорганизмы; биоцементация; биокольматация; биогенное газообразование; микробиологическая геотехнология; искусственные биогеохимические барьеры.

#### Key words:

microorganisms; biocementation; biocolmatation; biogenic gas formation; microbiological geotechnology; artificial biogeochemical barriers (permeable reactive barriers).

#### Аннотация

Микроорганизмы являются самыми массовыми обитателями нашей планеты и способны выполнять те или иные геохимические функции, способствовать стабильности параметров окружающей среды. Лабильность метаболизма и широкое разнообразие типов обмена микроорганизмов обусловили их использование во многих технологических процессах. В настоящее время, когда хозяйственная деятельность человека вызывает изменения в геологической среде, в т.ч. нежелательные с инженерной точки зрения, геотехнологическое использование микробиологических процессов может найти применение для решения целого ряда задач. Микробиологические методы широко применяются в технологиях цементации, кольматации и обезвоживания грунтов, а также при создании искусственных геохимических барьеров. Поскольку в геотехнологических методах используются процессы, протекающие в естественной геологической среде, то грамотное использование данных методов невозможно без понимания механизмов этих процессов в природе. В статье рассматриваются механизмы природной цементации, кольматации и обезвоживания грунтов, а также геотехнологии, разработанные на их основе.

#### Abstract

Microorganisms are the most ubiquitous and abundant inhabitants of our planet and can accomplish various geochemical functions and support stability of the environment parameters. Metabolic lability of microorganisms and wide variety of their metabolic reaction types have determined application of them in many technological processes. Microbiological processes can be applied in geotechnologies to solve a range of various tasks at present when human economic activity induces changes in the environment including undesirable from an engineering standpoint. Microbiological techniques are widely used in cementation, colmatation and dewatering of grounds and in construction of artificial biogeochemical barriers (permeable reactive barriers). Since many geotechnological techniques imitate processes in the natural geological environment, so proper use of these methods is impossible without understanding of mechanisms of these processes in the nature. The article describes the mechanisms of natural cementation, colmatation and dewatering of grounds as well as geotechnologies developed on the base of them.

#### Введение

В инженерной геологии существует широкий круг задач, при решении которых необходимо целенаправленно воздействовать на грунты для улучшения их свойств. Для этого применяют самые различные методы, получившие общее название «техническая мелиорация грунтов» [4]. В последнее время появляется интерес к использованию в этих целях биотехнологий. Однако в России это направление практически не развивается, несмотря на его очевидные преимущества. В данной работе авторы показывают возможности биотехнологий для решения задач инженерной геологии.

Микроорганизмы являются самыми массовыми обитателями нашей планеты. Их общая биомасса боль-

ше биомассы всех других живых существ вместе взятых [40, 57]. Чрезвычайная гибкость метаболизма бактерий позволяет им жить практически повсеместно. Благодаря широкому диапазону условий существования микроорганизмы заселяют почти все элементы геологической среды [3, 5, 15]. Лабильность метаболизма и широкое разнообразие типов обмена обусловили использование микроорганизмов во многих технологических процессах и становление биотехнологии как отдельного направления науки [16].

В процессе жизнедеятельности микроорганизмы используют химические элементы (Na, K, Ca, Mg, Fe, P, S, N, S и многие другие) и обладают почти универсальной способностью выполнять те или иные геохимические функции. Исключительную их роль в био-

геохимических процессах отмечали В.И. Вернадский, С.Н. Виноградский, Б.Л. Исаченко и другие отечественные исследователи [2, 3, 6, 9]. Являясь биотической составляющей грунта, микроорганизмы в то же время способны изменять его твердую, жидкую и газовую фазы [13]. С одной стороны, именно микроорганизмы могут способствовать поддержанию желаемых параметров окружающей среды. С другой стороны, инженерная деятельность человека нарушает условия хода в геологической среде многих природных процессов, в т.ч. и микробных. При этом нередко наблюдается ускорение протекания некоторых нежелательных с инженерной точки зрения микробиологических процессов по сравнению с естественными условиями [7].

Авторами проводилось изучение пород чеганской свиты палеогена в западной части Курганской области. Незначительная глубина залегания грунтов свиты обуславливает использование их в качестве оснований фундаментов строительных сооружений и, соответственно, вскрытие их котлованами в процессе проведения строительных работ. Присутствие в составе отложений свиты минералов с низкой химической устойчивостью (гипса, сидерита, пирита) определяет наличие у грунтов и подземных вод потенциала агрессивных свойств по отношению к строительным конструкциям, которые могут проявиться с течением времени за счет развития в поверхностных условиях окислительных бактериальных процессов. Из грунтов чеганской свиты на среде для *Thiobacillus ferrooxidans* были выделены бактерии, которые в лабораторных исследованиях с использованием грунтов показали снижение pH и более чем двукратное увеличение содержания сульфат-ионов за счет бактериального окисления пирита. Таким образом, был сделан вывод, что бактериальное окисление пирита, инициированное ходом строительных работ, может привести к повышению сульфатной и общеокислительной агрессивности грунтов и грунтовых вод [11].

Наиболее заметно деятельность микроорганизмов проявляется в местах с повышенным содержанием органических веществ, микробиологическое разложение которых ведет к обильному выделению газов и накоплению продуктов неполного разложения. О протекании подобных процессов при строительстве инженерных сооружений свидетельствуют, в частности, данные А.М. Кузнецова об обильном выделении газов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ) после сооружения плотины Камской ГЭС. Источниками органического вещества для микробиологического образования газов в основании плотины являлись: органическое вещество грунтов, богатые органическим веществом воды водохранилища, материал, служащий для гидроизоляции подземных сооружений и представляющий собой мешковину, пропитанную битумом, и др. [8]. На внутренних стенках потерны в местах просачивания воды из водохранилища отмечалось развитие слизиобразующих микроорганизмов и разрушение бетона стен [18]. Дуплотнение противодиффузионной цементационной завесы щавелево-алюмосиликатным раствором создало дополнительный источник питания для микроорганизмов, что привело к их развитию в структуре геля и частичному разложению последнего (рис. 1) [1, 10].

Микроорганизмы играют важную роль в образовании многих тонкозернистых песков, изменяют свойства гру-

бозернистых грунтов, ускоряют на порядок скорости геохимических реакций, участвуют в выветривании пород. Точное понимание принципов и механизмов микробиологического воздействия на геологическую среду позволяет использовать их для решения задач инженерной геологии [54]. Технологии использования микроорганизмов и продуктов их метаболизма в геологии начали развиваться более 50 лет назад. Так, в одном из методов повышения нефтеотдачи пласта использовались бактерии для тампонирующего высокопроницаемых водопроницающих отложений [55]. Следует отметить, что возможность запечатывания нефтяной залежи для предотвращения проникновения пластовой воды за счет бактериально образованного вторичного кальцита отмечалась еще советскими учеными-геомикробиологами [9]. К сожалению, авторы настоящей статьи не располагают данными о том, была ли разработана какая-либо технология на основе именно этого открытия, в то время как другие методы микробиологического повышения нефтеотдачи пласта используются в нашей стране до сих пор.

Многочисленные лабораторные и полевые исследования показали, что микроорганизмы могут быть использованы для улучшения свойств грунтов. Зарубежные исследователи полагают, что по мере накопления знаний и развития технологий может появиться новое направление в геотехнической инженерии — микробиологическая геотехнология [24], призванная решить, по крайней мере, следующие три актуальные задачи: укрепление почв и грунтов за счет биоцементации; снижение проницаемости грунтов с помощью биокольматации; снижение водонасыщенности грунтов за счет образования биогазов. Следует отметить, что в предлагаемых геотехнологиях используются микробиологические процессы, протекание которых уже установлено в геологической среде в естественных условиях. Понимание механизма этих процессов способствует их грамотному использованию при решении инженерно-геологических задач.



Рис. 1. Щавелево-алюмосиликатный гель, подвергнутый микробиологическому воздействию: а — неизменный участок, б–г — биогенный компонент в структуре геля

## Биоцементация

### Цементация в естественных условиях

В природных условиях цементация грунтов происходит в ходе химических реакций, связанных с выветриванием. Естественно сцементированные пески существуют в различных частях земной коры. Образование песчаников объясняют осаждением кальцитового цемента [62]. Цементация песков усиливается малым количеством других агентов, например кремнезема, водных силикатов и гидроксидов железа [25]. Степень цементации грунтов широко варьирует и зависит от свойств окружающей среды, которые также определяют и степень выветривания, постепенно разрушающего образующийся цемент. В роли цементирующих агентов выступают как различные минеральные соединения (например, кальцит, гидроксиды железа, марганца и др.), так и вещества полимерной природы.

Аутигенные минералы образуются *in situ* осаждением из водорастворенных ионов в процессе нуклеации и последующего роста кристаллов. Обязательным условием выпадения минералов из раствора, даже когда в этом процессе принимают участие микроорганизмы, является достижение некоторой степени перенасыщения раствора. Самопроизвольное выпадение нерастворимого осадка из раствора сдерживается необходимостью преодоления энергоактивационного барьера, что легко осуществляется в насыщенных растворах с помощью энергии, высвобождаемой при образовании связей в твердой фазе. Точка, в которой этот энергоактивационный барьер преодолевается и начинается рост устойчивого к растворению кластера из молекул, называется точкой нуклеации [39]. Как только сформируется зародышевое ядро кристалла, начинается его рост за счет взаимодействия с ионами раствора. Нуклеация может протекать гомогенно (вследствие случайных столкновений ионов или атомов в растворе) или гетерогенно (когда зародышевые ядра кристаллов образуются на поверхности частиц, которые усиливают нуклеацию) [33]. В качестве центров нуклеации для аутигенного образования минералов могут выступать биополимеры [20, 39]. Гетерогенная нуклеация может возникать на поверхности индивидуальной бактериальной клетки. Присутствие миллионов таких клеток в данном растворе представляет для кристаллизации неисчислимо множество центров нуклеации [33].

### Механизм цементации кальцитом

*In situ* кальцит осаждается как цементирующий агент двумя разными способами: выпадая в осадок из воды, насыщенной карбонатом кальция ( $\text{CaCO}_3$ ); выпадая в результате реакций химического обмена на границе раздела фаз «вода — порода». На осаждение кальцита влияют химизм воды, миграционная способность ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{HCO}_3^-$ , наличие карбонатов, проницаемость пород, их состав и текстура. Немаловажную роль играет и микробная активность пород.

Эксперименты показали, что образование частиц карбоната кальция гетеротрофными бактериями идет различными путями. Так, пассивное образование карбонатов стимулируется изменениями среды, которые приводят к накоплению в ней ионов  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{CO}_3^{2-}$  и их последующему осаждению в виде твердых частиц.

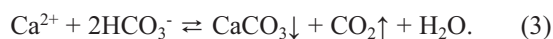
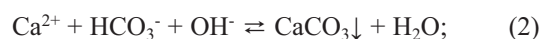
Эти изменения могут быть вызваны несколькими метаболическими путями бактериальных циклов химических элементов: азота (аммонификация аминокислот, гидролиз мочевины и мочевой кислоты, диссимиляторное восстановление нитратов), серы (диссимиляторное восстановление сульфатов), марганца и железа (диссимиляторное восстановление марганца и железа) [22, 47]. В случае автотрофных микроорганизмов метаногенез метилотрофного типа и цианобактериальный фотосинтез также могут приводить к осаждению  $\text{CaCO}_3$ . Активное карбонатообразование не зависит от вышеназванных метаболических путей: частицы карбоната кальция образуются в результате реакций ионного обмена, идущих на поверхности бактериальной клетки по механизму, который до сих пор еще слабо изучен. Таким образом, карбонатообразование не ограничен ни определенными таксономическими группами микроорганизмов, ни специфическими средами их обитания. Это общепланетный феномен, существующий с докембрия. В настоящее время потенциальная активность продукции карбонатов гетеротрофными микроорганизмами выше, чем автотрофными микроорганизмами или абиотическими химическими реакциями [21, 22].

Эффективность бактериального осаждения минералов зависит от свойств пористой среды, количества присутствующих бактерий и их метаболической активности. Критическим фактором для микробиологически индуцированной цементации является также pH среды [61]. Авторы работы [64] определили, что микробиологически индуцированное осаждение карбоната кальция начинается при  $\text{pH}=8,3$  и протекает с увеличением скорости до  $\text{pH}=9,0$ . Образование кальций-карбонатного (кальцитового) цемента является следствием метаболической активности бактерий, увеличивающей pH среды. Локальное увеличение pH может быть достигнуто и при продукции ионов аммония в результате ферментативного гидролиза мочевины (уреазной активности бактерий). Уреазная активность обнаружена у широкого ряда микроорганизмов и растений, некоторые из которых вырабатывают фермент в большом количестве [19]. Например, высокой уреазной активностью обладает *Bacillus pasteurii* — обычная алкалофильная (щелочелюбивая) почвенная бактерия [36]. Эта бактерия использует мочевины как источник энергии и продуцирует ионы аммония ( $\text{NH}_4^+$ ), увеличивающие pH окружающей среды и вызывающие осаждение ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{CO}_3^{2-}$  в виде  $\text{CaCO}_3$ . Локальное увеличение pH часто является причиной того, что клетки микроорганизмов становятся центрами нуклеации для кристаллизации.

Осаждение кальцита описывается следующим средним уравнением реакции:



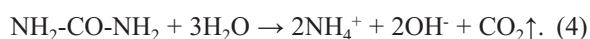
Микробиологически индуцированное осаждение кальцита протекает в соответствии с уравнениями [33]:



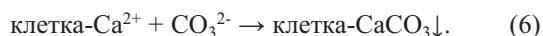


Как было сказано выше, выпадению карбоната кальция из раствора будут благоприятствовать любые микробиологические процессы, ведущие к повышению содержания в среде гидрокарбонат-ионов. Так, авторами было обнаружено образование кристаллов кальцита в отложениях дренажной системы земляной плотины Камской ГЭС (рис. 2). Гидрокарбонат-ионы образовывались в результате бактериального восстановления сульфатов. Другими продуктами процесса являлись сероводород, обнаруживаемый по характерному запаху, и гидросульфид-ионы, которые при реакции с водорастворенными ионами  $Fe^{2+}$  выпадали из раствора в виде кристаллов пирита. При этом новообразованные кристаллы кальцита и пирита могли образовывать сростки (рис. 3) [14].

Направление протекания реакции по уравнению (2) переключается при изменении pH, индуцированном метаболической активностью бактерий. Наибольшее значение pH среды достигается при разложении мочевины в соответствии с уравнением реакции:



Вдобавок к осаждению кальцита по вышеописанному механизму ионы кальция могут закрепляться на поверхности бактериальной клетки вследствие ее общего отрицательного заряда. Отложение кальцита на поверхности клетки, служащей центром нуклеации, описывается следующими уравнениями [33]:



### Искусственная цементация

Техническая мелиорация грунтов традиционно используется для улучшения их инженерных свойств: укрепления, снижения проницаемости, уплотнения и т.д. Для обработки отложений проницаемостью  $10^{-4}$ – $10^{-1}$  см/с обычно применяется закачка химических растворов, из которых происходит осаждение частиц или образование геля с заполнением ими пор и пустот в грунтах, что приводит к повышению несущей способности последних. Инъекционное закрепление грунтов нашло широкое применение в фундаментостроении, горном деле, гидротехническом строительстве. Практически на всех крупных плотинах этот способ применяется для создания противофильтрационных завес [10, 51, 68, 69], причем для завес глубокого заложения он является единственным [10].

Обычно используются следующие цементирующие агенты: органические вещества, силикаты, синтетические смолы, карбонат кальция, гипс, портланд-цемент. Два последних агента используются в сухом виде. Их смешивают с грунтом до достижения необходимой плотности. Цементация инициируется насыщением водой [33, 65]. Добавка гипса к грунтам ограничивает набухание и диспергирование глин и повышает стабильность структуры грунта за счет эффектов катионного обмена и электролитического эффекта грунтовой влаги [42].

Использование органических кислот для улучшения характеристик грунтов приводит к увеличению проч-



Рис. 2. Агрегат прозрачных зерен кальцита

ности в 1,5–2,5 раза [52]. В целях стабилизации грунтовых агрегатов используют и другие органические вещества, в т.ч. отходы [42].

На Камской ГЭС, где по данным режимных гидрхимических и гидродинамических наблюдений шло развитие процессов опреснения подземных вод, выщелачивания и растворения гипсоносных пород в основании плотины, проводили работы по доуплотнению противофильтрационной цементационной завесы щавелево-алюмосиликатным раствором. Это было первое в отечественной практике использование силикатного раствора для трещиноватых грунтов в основании плотины. В результате проведенных работ возросли перепады напора на завесе и коэффициент устойчивости сооружения [10].

### Методы цементации кальцитом

Карбонат кальция в качестве цементирующего агента применяется в нескольких технологиях. Одна из них — *Calcite In Situ Precipitation System* — заключается в инъектировании в грунт соответствующих химических растворов, из которых в поровом растворе и на поверхности частиц происходит осаждение кристаллов кальцита. При этом степень и скорость цементации могут быть изменены химическим составом растворов [33].



Рис. 3. Сростание зерен кальцита и пирита

Технология цементации, основанная на использовании биогенно образованного кальцита, в иностранной литературе получила название *MICP* (*Microbial Induced Calcite Precipitation*), или *BICP* (*Bacterial Induced Calcite Precipitation*), т.е. «осаждение кальцита, индуцированное микроорганизмами (бактериями)». Данная технология была использована для заделки структурных трещин и восстановления поверхности бетона [27–29], ремонта и консервации зданий и памятников из известняка и камня [34, 50, 58, 60], упрочнения грунтов в сейсмоопасных зонах [37], а также снижения риска обрушения стенок скважин, пробуренных горизонтально в гравий-содержащих слоях грунта [71]. При этом на осаждение карбоната кальция оказывают влияние содержание в растворе гидрокарбонат-ионов и ионов кальция, а также pH среды. Клетки микроорганизмов могут играть роль центров нуклеации, как показано в уравнениях (5) и (6). Технология *MICP* основывается на использовании разных путей метаболизма бактерий.

**Уреолитический путь.** Цементация протекает в соответствии с уравнениями (2) и (3). Гидролиз мочевины в отличие от других метаболических путей достаточно легко управляем и позволяет образовать высокую концентрацию карбоната кальция за короткий промежуток времени (минуты или часы), что обусловило его широкое практическое применение [31]. Так, стимуляция автохтонных уреолитических бактерий почвы привела к увеличению содержания в почве кальцита до 13,2%, а прочности — до 5,3 МПа [41]. Авторы работы [76] сообщили о снижении размера открытых пор на 50% без полной их закупорки, что требуется для целей консервации исторических памятников и сооружений. Так как от типа бактериальной культуры и состава используемой среды зависит морфология образующихся кристаллов кальцита, поиск путей улучшения метода, повышения его эффективности постоянно продолжается [27, 30, 31].

**Аммонификационный путь.** Цементация протекает в соответствии с уравнением (2). Повышение pH среды до 8,5–8,7 происходит за счет ионов аммония, образующихся при окислительном дезаминировании аминокислот бактериями [60, 74]. Исследования показали, что форма образующихся кристаллов кальцита, их размер и морфология зависят от использованного источника кальция. Наилучшим оказался органический источник — глутамат кальция [74].

**Денитрификационный путь.** Предполагается, что процесс бактериальной денитрификации имеет потенциал для того, чтобы стать предпочтительным для технологии *MICP*, т.к. при денитрификации не образуются токсичные побочные продукты, процесс не требует водорастворенного вещества — донора электронов и использует его почти на 100%, не требует добавки источников органического азота, термодинамически более благоприятен, легко идет в анаэробных условиях и образует больше карбонатов в расчете на 1 моль субстрата, чем другие *MICP*-пути [44].

Технология *MICP* успешно применяется в последние десятилетия, однако ее широкомасштабное применение ограничено необходимостью культивирования и инъектирования специфических бактериальных штаммов. Поэтому будущее данной технологии во

многом зависит от возможности стимулирования автохтонных (населяющих данный грунт) микроорганизмов усиленно отлагать кальцит [41, 73].

#### **Методы цементации другими минеральными агентами биологического происхождения**

Цементация грунтов может происходить за счет образования в них не только кальцита, но и других минералов. В лабораторных условиях для этой цели использовали бактерии *Leptothrix discophora*, которые вызывают выпадение в осадок минералов железа и/или марганца. Предполагается возможность индуцирования данного процесса *in situ* за счет активизации автохтонной микрофлоры [73]. В полевых испытаниях инъекционного раствора, содержащего уреолитические микроорганизмы, мочевины и соли железа, зафиксировали снижение проницаемости грунта и увеличение силы сдвига в результате осаждения гидроксида железа (III) вследствие ферментативного гидролиза мочевины. Отмечено, что снижение проницаемости песчаного грунта на 2–3 порядка может быть достигнуто при увеличении содержания в грунте осажденного металла более чем на 1,5%, однако сила сдвига при этом не увеличится [23].

#### **Методы цементации полимерами, в том числе биологического происхождения**

Цементации грунтов можно добиться и путем использования растворов полимеров [4]. Вместо применения растворов возможно смешивание грунта с мелкими частицами полимера и последующий нагрев. Сообщается, что этим методом достигается увеличение прочности на один порядок по сравнению со случаем использования минерального связующего в количестве 2% [70].

В случае применения полимеров микробиологического происхождения говорят о биополимерах. Существует достаточно обширная научная литература, посвященная использованию биополимеров и продуцирующих их микроорганизмов. Обычно являясь высокомолекулярными полисахаридами, эти вещества безопасны для окружающей среды. Кроме цементации грунтов, т.е. связывания частиц грунта между собой, биополимеры обладают и другими полезными свойствами — они способны образовывать химические связи с металлами и таким образом удерживать их в грунте. Более того, биополимеры могут быть легко получены *in situ* инокуляцией в грунт соответствующих видов микроорганизмов, которые в дальнейшем могут размножиться и распространиться на значительное расстояние от места введения [35]. Показана способность биополимеров снижать проницаемость грунтов, образовывать широкий ряд непроницаемых барьеров и увеличивать силу сдвига грунтов [26, 53, 75]. Способность биополимеров связывать ионы металлов используется для обработки сточных вод, извлечения ионов металлов из водных растворов, предотвращения миграции тяжелых металлов из грунтов [32, 35, 38, 43, 48, 72]. Применяют биополимеры и для обработки ядерных отходов и веществ, содержащих радиоактивные изотопы [49, 67]. Исследования показали, что использование биополимеров в низкой концентрации ведет к снижению сжимаемости  $C_c$  глинистых грунтов (с 0,614 до 0,442), а в высокой — к повышению их сжимаемости



(с 0,614 до 1,058) за счет замещения глинистых частиц биополимером и электростатического отталкивания между биополимером и глинистыми частицами [56].

### **Биокольматация**

Процесс заполнения порового пространства грунта более мелкими частицами, находящимися во взвешенном состоянии в фильтрующейся воде, называется кольматацией. Кольматация происходит по двум причинам — в результате простого механического заполнения пор грунта и поверхностного взаимодействия частиц. Твердые взвешенные частицы суспензии могут механически задерживаться в порах грунтов, а также вступать в физико-химические взаимодействия со скелетом фильтрующего грунта и друг с другом с образованием коагуляционных связей [17].

Авторы работы [36] ввели в практику использование бактерий для активного осаждения карбоната кальция в качестве кольматирующего агента. Они использовали инъектирование микроорганизмов для осаждения аутигенных минералов в высокопроницаемых водопроводящих каналах. Осаждение минералов может осуществляться за счет использования бактерий в качестве пассивных центров нуклеации, в то время как инъектирование соответствующего раствора вызывает перенасыщение пластовых вод по отношению к определенной минеральной фазе и/или стимулирует метаболическую активность бактерий, способных вызывать такое перенасыщение. В результате эксперимента было достигнуто снижение проницаемости пород с 13,0 и 5,5 Д<sup>1</sup> ( $1,1 \times 10^{-2}$  и  $4,7 \times 10^{-3}$  см/с) до 2,8 и 0,9 Д ( $2,4 \times 10^{-3}$  и  $7,8 \times 10^{-4}$  см/с) соответственно [36]. В других исследованиях сообщается о снижении пористости и проницаемости пород на 50 и 90% соответственно при использовании бактерий и ростовой среды с добавлением раствора, содержащего CaCl<sub>2</sub> и NaHCO<sub>3</sub>, для обработки лабораторных колонок, заполненных стеклянными бусинами или песком [33]. Экспериментальные данные показали, что после обработки бактериями проницаемость песков может снизиться в 4 раза, а их несущая способность — увеличиться до существенных значений [24].

Биокольматация грунтов может происходить не только за счет образования минеральных частиц, но и за счет образования микроорганизмами биополимеров. Так, в лабораторном эксперименте с бактериями *Leuconostoc mesenteroides* после 41-суточной экспозиции проницаемость колонки с песком снизилась более чем на порядок за счет аккумуляции в песке такого биополимера, как декстран. Его накопление происходило в поровом пространстве, что вызвало снижение пористости и рост электрического сопротивления на 80–100% [66].

### **Образование биогазов**


Обводнение грунтов, особенно таких несвязных и малосвязных, как пески и хвосты горнодобывающих предприятий, может вызвать их катастрофическое разуплотнение. Одним из способов предотвращения этого является снижение насыщенности грунтов водой. В этом отношении существует несколько методов, основанных

на уплотнении или химической модификации грунта, однако наиболее экономически эффективным является метод, основанный на биогазообразовании. С этой целью наиболее часто используется процесс бактериальной денитрификации, т.к. образующийся газ азот плохо растворим в воде, химически инертен, не дает парникового эффекта, достаточно равномерно образуется внутри грунта, а размеры его образующихся пузырьков очень малы, что снижает возможность их потери из грунта. Исследования показали эффективность использования данного метода для водонасыщенных песков, находящихся в условиях статической монотонной нагрузки [45, 46], и для водонасыщенных песков, илов и глинистых песков в условиях циклической нагрузки [59].

### **Другое применение микробиологических методов**

Микробиологические методы могут найти применение и для решения других задач инженерной геологии, таких как: осаждение ионов кальция из водных растворов [35] с целью снижения жесткости природных вод или деминерализации пластовых вод нефтяных месторождений; снижение промышленных выбросов углекислого газа в атмосферу за счет фиксации углекислого газа в виде карбонатных солей; твердофазный захват неорганических контаминантов из воды и водоносных горизонтов с целью предотвращения дальнейшего распространения загрязнения; создание искусственных геохимических барьеров для природоохранных целей. Решение первых трех задач основывается на использовании описанного выше процесса микробиологического образования кальцита. Использование в природоохранных целях искусственных геохимических барьеров (в зарубежной литературе — проницаемых реактивных барьеров) получило распространение в связи с их низкой стоимостью. Для создания геохимических барьеров в зависимости от целей могут быть использованы очень разные материалы — металлическое железо, гуминовые вещества, оксиды, соли, модифицированные цеолиты и др. Обычно барьеры используют для удаления загрязняющих веществ из подземных и почвенных вод путем их иммобилизации на барьере или трансформации в менее токсичные продукты [63]. Процессы, происходящие на барьере, представляют собой сорбцию и осаждение, химические реакции и биологически опосредованные реакции. Более подробно принципы устройства и работы геохимических барьеров рассмотрены в книге [12].

### **Заключение**

В результате своих биологических особенностей, а именно лабильности метаболизма и широкого разнообразия типов обмена, микроорганизмы нашли широкое применение в различных технологических процессах. Эти же особенности в совокупности с практически повсеместным присутствием микроорганизмов в геологической среде позволяют использовать их и для решения целого ряда инженерно-геологических задач. Биотехнологические методы за рубежом получают все большее развитие (обзор некоторых из них авторы попытались сделать в настоящей статье), в то время как в нашей стране их применение крайне ограничено, хотя потребность в них, по мнению авторов, существует. 

<sup>1</sup> Дарси.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотина И.Н., Воронкевич С.Д., Максимович Н.Г. О возможности техногенных биогеохимических явлений при силикатизации гипсоносных пород // Вестник Московского университета. 1986. Серия 4. Геология. № 4. С. 49–53. URL: [http://www.nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng\\_0058.html](http://www.nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng_0058.html).
2. Вернадский В.И. Проблемы биогеохимии // Труды биогеохимической лаборатории. Т. 16. М.: Наука, 1980. 320 с.
3. Виноградский С.Н. Микробиология почвы. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 792 с.
4. Воронкевич С.Д. Инженерная геохимия с основами геохимии техногенеза. М.: Академическая наука, Геомаркетинг, 2011. 480 с.
5. Звягинцев Д.Г. Взаимодействие микроорганизмов с твердыми поверхностями. М.: Изд-во МГУ, 1973. 176 с.
6. Исаченко Б.Л. Избранные труды. Т. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1951. 431 с.
7. Кофф Г.Л., Кожевина Л.С. Роль микроорганизмов в изменении геологической среды // Инженерная геология. 1981. № 6. С. 63–74.
8. Кузнецов А.М. О газовых явлениях в основании бетонных плотин // Гидротехническое строительство. 1965. № 10. С. 33–37.
9. Кузнецов С.И., Иванов М.В., Ляликоса Н.Н. Введение в геологическую микробиологию. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 239 с.
10. Максимович Н.Г. Безопасность плотин на растворимых породах (на примере Камской ГЭС). Пермь: Изд-во ПГУ, 2006. 212 с. URL: <http://www.nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/2006/0298.pdf>.
11. Максимович Н.Г., Меньшикова Е.А., Казакевич С.В., Шлыков В.Г. Минералогия чеганских глин и ее инженерно-геологическое значение // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. Пермь: Изд-во ПГУ, 2000. С. 40–43. URL: [http://www.nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng\\_0222.html](http://www.nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng_0222.html).
12. Максимович Н.Г., Хайрулина Е.А. Геохимические барьеры и охрана окружающей среды. Пермь: Изд-во ПГУ, 2011. 248 с. URL: <http://www.nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/2011/0381.pdf>.
13. Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т. Влияние микроорганизмов на минеральный состав и свойства грунтов // Вестник Пермского университета. Сер. Геология. 2012. Вып. 3 (16). С. 47–54. URL: <http://www.nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/2012/0394.pdf>.
14. Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т. Микробиологические процессы в грунтовых плотинах // Инженерные изыскания. 2013. № 9. С. 46–51. URL: <http://www.nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/2013/0410.pdf>.
15. Мишустина Е.Н. Ассоциации почвенных микроорганизмов. М.: Наука, 1975. 107 с.
16. Тихонов И.В., Рубан Е.А., Грязнева Т.Н., Самуйленко А.Я., Гаврилов В.А. Биотехнология / под ред. Е.С. Воронина. СПб.: ГИОРД, 2005. 792 с.
17. Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А., Голодковская К.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров П.С. Грунтоведение. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
18. Хмурчик В.Т. Коррозия бетонных стен в потернах Камской ГЭС // Перспективы развития естественных наук в высшей школе. Пермь: Изд-во ПГУ, 2001. С. 126–130.
19. Bachmeier K.L., Williams A.E., Warmington J.R., Bang S.S. Urease activity in microbiologically-induced calcite precipitation // Journal of Biotechnology. 2002. V. 93. P. 171–181.
20. Barker W.W., Banfield J.F. Biologically versus inorganically-mediated weathering reactions: relationships between minerals and extracellular microbial polymers in lithobiontic communities // Chemical Geology. 1996. V. 132. P. 55–69.
21. Boquet E., Boronat A., Ramos-Cormenzana A. Production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a common phenomenon // Nature. 1973. V. 246. P. 527–529.
22. Castanier S., Le Métayer-Levrel G., Perthuisot J.-P. Ca-carbonates precipitation and limestone genesis — the microbiogeologist point of view // Sedimentary Geology. 1999. V. 126. № 1–4. P. 9–23.
23. Chu J., Ivanov V. Iron- and calcium-based biogrouts for soil improvement // Geo-Congress 2014. Technical Papers. P. 1596–1601.
24. Chu J., Ivanov V., He J., Naeimi M., Li B., Stabnikov V. Development of microbial geotechnology in Singapore // Geo-Frontiers. Advances in Geotechnical Engineering (ed. by J. Han, D.E. Alzamora). Geotechnical Special Publication (GSP). 2011. P. 4070–4078.
25. Clough G.W., Sitar N., Bachus R.C., Rad N.S. Cemented sands under static loading // Journal of the Geotechnical Engineering Division. 1981. V. 107. № 6. P. 799–817.
26. Cole D.M., Ringelberg D.B., Reynolds C.M. Small-scale mechanical properties of biopolymers // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2012. V. 138. № 9. P. 1063–1074.
27. De Muynck W., Cox K., De Belle N., Verstraete W. Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete // Construction and Building Materials. 2008. V. 22. P. 875–885.
28. De Muynck W., De Belie N., Verstraete W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review // Ecological Engineering. 2010. V. 36. P. 118–136.
29. De Muynck W., Debrouwer D., De Belie N., Verstraete W. Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials // Cement and Concrete Research. 2008. V. 38. P. 1005–1014.
30. De Muynck W., Leuridan S., Van Loo D., Verbeken K., Cnudde V., De Belie N., Verstraete W. Influence of pore structure on the effectiveness of a biogenic carbonate surface treatment for limestone conservation // Applied and Environmental Microbiology. 2011. V. 77. № 19. P. 6808–6820.
31. De Muynck W., Verbeken K., De Belie N., Verstraete W. Influence of urea and calcium dosage on the effectiveness of bacterially induced carbonate precipitation on limestone // Ecological Engineering. 2010. V. 36. P. 99–111.
32. Deans J.R., Dixon, B.G. Uptake of Pb<sup>2+</sup> and Cu<sup>2+</sup> by novel biopolymers // Water Research. 1992. V. 26, № 4. P. 469–472.
33. DeJong J.T., Fritzsche M.B., Nüsslein K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2006. V. 132. № 11. P. 1381–1392.
34. Dick J., De Windt W., De Graef B., Saveyn H., Van der Meeren P., De Belie N., Verstraete W. Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone by *Bacillus* species // Biodegradation. 2006. V. 17. P. 357–367.
35. Etemadi O., Petrisor I.G., Kim D., Wan M., Yen T.F. Stabilization of metals in subsurface by biopolymers: laboratory drainage flow studies // Soil and Sediment Contamination. 2003. V. 12. P. 647–661.
36. Ferris F.G., Stehmeier L.G., Kantzas A., Mourits F.M. Bacteriogenic mineral plugging // Journal of Canadian Petroleum Technology. 1996. V. 35. № 8. P. 56–61.
37. Filet A.E., Gadret J.-P., Loygue M., Borel S. Biocalcis and its applications for the consolidation of sands // Grouting and Deep Mixing. 2012. P. 1767–1780.
38. Findon A., McKay G., Blair H.S. Transport studies for the sorption of copper ions by chitosan // Journal of Environmental Science and Health. 1993. V. A28. № 1. P. 173–185.
39. Fortin D., Ferris F.G., Beveridge T.J. Surface-mediated mineral development by bacteria // Reviews in Mineralogy. 1997. V. 35. P. 161–180.



40. Gold T. The deep, hot biosphere // Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. 1992. V. 89. P. 6045–6049.
41. Gomez M., Anderson C., DeJong J., Nelson D., Lau X. Stimulating *in situ* soil bacteria for bio-cementation of sands // Geo-Congress 2014. Technical Papers. P. 1674–1682.
42. Graber E.R., Fine P., Levy G.J. Soil stabilization in semiarid and arid land agriculture // Journal of Materials in Civil Engineering. 2006. V. 18. № 2. P. 190–205.
43. Gutnick D.L., Bach H. Engineering bacterial biopolymers for the biosorption of heavy metals: New products and novel formulations // Applied Microbiology and Biotechnology. 2000. V. 54. № 4. P. 451–460.
44. Hamdan N., Kavazanjian E., Rittmann B.E., Karatas I. Carbonate mineral precipitation for soil improvement through microbial denitrification // Geo-Frontiers. 2011. P. 3925–3934.
45. He J., Chu J. Undrained responses of microbially desaturated sand under monotonic loading // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2014. V. 140. № 5.
46. He J., Chu J., Ivanov V. Remediation of liquefaction potential of sand using the biogas method // Geo-Congress 2013. Technical Papers. P. 879–887.
47. Hendry J.P. Calcite cementation during bacterial manganese, iron and sulphate reduction in Jurassic shallow marine carbonates // Sedimentology. 1993. V. 40. № 1. P. 87–106.
48. Jha I.N., Iyengar L., Prabhakara Rao A.V.S. Removal of cadmium using chitosan // Journal of Environmental Engineering. 1988. V. 114. № 4. P. 962–975.
49. Kosyakov V.N., Yakovlev N.G., Gorovoj L.F. Utilization of chitin-chitosan biosorbents for environmental deactivation and radioactive waste management // NATO Advanced Science Institutes Series. 1997. Ser. 2. V. 34. P. 119–131.
50. Le Métayer-Levrel G., Castanier S., Oriol G., Loubiere J.F., Perthuisot J.P. Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony // Sedimentary Geology. 1999. V. 126. P. 25–34.
51. Lee J.-Y., Choi Y.-K., Kim H.-S., Yun S.-T. Hydrologic characteristics of a large rockfill dam: Implications for water leakage // Engineering Geology. 2005. V. 80. № 1–2. P. 43–59.
52. Lee J., Kim K., Chun B. Strength characteristics of soils mixed with an organic acid material for improvement // Journal of Materials in Civil Engineering. 2012. V. 24. № 12. P. 1529–1533.
53. Li Y., Yang I.C.-Y., Lee K.-I., Yen T.F. Subsurface application of *Alcaligenes eutrophus* for plugging of porous media // Microbial Enhanced Oil Recovery — Recent Advances. E.T. Premuzic and A. Woodhead (Eds.). Amsterdam: Elsevier, 1993. P. 65–77.
54. Mitchell J.K., Santamarina J.C. Biological considerations in geotechnical engineering // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2005. V. 131. № 10. P. 1222–1233.
55. Nelson S.J., Launt P.D. Stripper well production increased with MEOR treatment // Oil and Gas Journal. 1991. V. 89. P. 114–118.
56. Nugent R.A., Zhang G., Gambrell R.P. The effect of exopolymers on the compressibility of clays // Geo-Frontiers. 2011. P. 3935–3944.
57. Pedersen K. Exploration of deep intraterrestrial microbial life: current perspectives // FEMS Microbiological Letters. 2000. V. 185. № 1. P. 9–16.
58. Piñar G., Jimenes-Lopez C., Sterflinger K., Ettenauer J., Jroundi F., Fernandez-Vivas A., Gonzalez-Muñoz M.T. Bacterial community dynamics during the application of a *Myxococcus xanthus*-inoculated culture medium used for consolidation of ornamental limestone // Microbial Ecology. 2010. V. 60. № 1. P. 15–28.
59. Rebata-Landa V., Santamarina J.C. Mechanical effects of biogenic nitrogen gas bubbles in soils // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2012. V. 138. № 2. P. 128–137.
60. Rodriguez-Navarro C., Rodriguez-Gallego M., Chekroun K.B., Gonzalez-Muñoz M.T. Conservation of ornamental stone by *Myxococcus xanthus*-induced carbonate biomineralization // Applied and Environmental Microbiology. 2003. V. 69. № 4. P. 2182–2193.
61. Ruiz-Agudo E., Putnis C.V., Rodriguez-Navarro C., Putnis A. Effect of pH on calcite growth at constant  $a\text{Ca}^{2+}/a\text{CO}_3^{2-}$  ratio and supersaturation // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2011. V. 75. № 1. P. 284–296.
62. Saxena S.K., Lastrico R.M. Static properties of lightly cemented sands // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 1978. V. 104. № 12. P. 1449–1464.
63. Scherer M.M., Richter S., Valentine R.L., Alvarez P.J.J. Chemistry and microbiology of permeable reactive barriers for *in situ* groundwater clean up // Critical Reviews in Microbiology. 2000. V. 26. № 4. P. 221–264.
64. Stocks-Fisher S., Galinat J.K., Bang S.S. Microbiological precipitation of  $\text{CaCO}_3$  // Soil Biology and Biochemistry. 1999. V. 31. № 11. P. 1563–1571.
65. Swart C.J.U., van Schalkwyk A. Subsurface grout barriers for ground stabilization in dolomite areas near Carletonville, South Africa // Environmental Geology. 2001. V. 40. № 4–5. P. 592–601.
66. Ta H.X., Kwon T.-H., Muhunthan B. Preliminary study of geophysical monitoring of bioclogging caused by bacterial biopolymer accumulation in sands // Geo-Congress 2014. Technical Papers. P. 1654–1663.
67. Teterin Y.A. Physico-chemical and adsorption properties of bio-sorbents and mechanisms of their interaction with radionuclides // NATO Advanced Science Institutes Series. 1997. Ser. 2. V. 34. P. 135–139.
68. Turkmen S. Treatment of the seepage problems at the Kalecik Dam (Turkey) // Engineering Geology. 2003. V. 68. № 3–4. P. 159–169.
69. Turkmen S., Özgüller E., Taga H., Karaogullarindan T. Seepage problems in the karstic limestone foundation of the Kalecik Dam (south Turkey) // Engineering Geology. 2002. V. 63. № 3–4. P. 247–257.
70. Valdes J.R., Cortes D.D. Heat-induced bonding of sands // Geo-Congress 2014. Technical Papers. P. 3721–3733.
71. van Paassen L.A., van Hemert W.J., van der Star W.R.L., van Zwieten G., van Baalen L. Direct shear strength of biologically cemented gravel // GeoCongress 2012. Technical Papers. P. 968–977.
72. Wan Ngah W.S., Liang K.H. Adsorption of gold (III) ions onto chitosan and n-carboxymethyl chitosan: equilibrium studies // Industrial and Engineering Chemistry Research. 1999. V. 38. P. 1411–1414.
73. Weaver T.J., Burbank M., Lewis A., Lewis R., Crawford R., Williams B. Bio-induced calcite, iron, and manganese precipitation for geotechnical engineering applications // Geo-Frontiers. 2011. P. 3975–3983.
74. Xu J., Yao W., Jiang Z. Non-ureolytic bacterial carbonate precipitation as a surface treatment strategy on cementitious materials // Journal of Materials in Civil Engineering. 2014. V. 26. № 5. P. 983–991.
75. Yang I.C.-Y., Li Y., Park J.K., Yen T.F. The use of slime-forming bacteria to enhance the strength of the soil matrix // Microbial Enhanced Oil Recovery — Recent Advances. (ed. by E.T. Premuzic, A. Woodhead). Amsterdam: Elsevier, 1993. P. 89–96.
76. Zamarreño D.V., Inkpen R., May E. Carbonate crystals precipitated by freshwater bacteria and their use as a limestone consolidant // Applied and Environmental Microbiology. 2009. V. 75. № 18. P. 5981–5990.





## BIOTECHNOLOGIES IN ENGINEERING GEOLOGY

### MAKSIMOVICH N.G.

Head of the Laboratory of Technogenic Processes Geology and deputy science director of the Institute of Natural Sciences of the Perm State National Research University (INS PSNRU), PhD (candidate of science in Geology and Mineralogy), Perm, nmax54@gmail.com

### KHMURCHIK V.T.

Leading staff scientist of the Institute of Natural Sciences of the Perm State National Research University (INS PSNRU), PhD (candidate of science in Biology), Perm, khmurchik.vadim@mail.ru

The technical melioration of grounds is widely used aiming to improve their characteristics. The interest to using biotechnology in these aims is arising. Unfortunately this scientific direction is not developing in the Russian Federation. The authors describe the potential of biotechnology (in general microbiological techniques) to show a range of engineering geology tasks.

Microorganisms are ubiquitous and most abundant inhabitants on our planet and can accomplish various geochemical functions to support stability of environmental parameters. Metabolic lability and wide variety of metabolic reaction types in microorganisms determine using microorganisms in many technological processes. The microbiological processes can be applied in geological technologies to solve a range of various tasks at present when human economic activity induces changes (including undesirable ones from the engineering standpoint) in environment. As many geotechnological techniques imitate the natural processes in geological environment the proper understanding of their mechanisms in nature is necessary to use the geotechnological techniques correctly. Microbiological techniques are widely used for cementation, colmatation and dewatering of grounds and for con-

struction of artificial biogeochemical barriers (permeable reactive barriers).

**Biocementation.** This process is widely distributed in nature. The mechanism of natural cementation with calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) is described. The techniques of artificial cementation with calcite and other cementing agents are observed. This part of the article is mainly focused on various microbiological techniques of cementation with calcite. Microbiological techniques using Fe- and Mn-minerals and biopolymers are observed too.

**Biocolmatation (bioclogging).** The mechanism of this process is described. The biocolmating agents and the techniques of microbial biocolmatation of various grounds are observed.

**Biological dewatering of grounds.** The techniques of biological dewatering of grounds are based on microbiological gas-forming processes: gas bubbles formed as microbial metabolic products substitute water in ground pores resulting to undersaturation of the ground with water. There are many microbiological gas-forming processes but the denitrification process is the most applicable of them.

The authors suppose that microbiological techniques can be used to solve many other engineering-geological tasks.

### SPISOK LITERATURY

1. Bolotina I.N., Voronkevich S.D., Maksimovich N.G. O vozmozhnosti tekhnogennykh biogekhimicheskikh yavleniy pri silikatizatsii gipsonosnykh porod // Vestnik Moskovskogo universiteta. 1986. Seriya 4. Geologiya. № 4. S. 49-53. [http://www.nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng\\_0058.html](http://www.nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng_0058.html) (rus.).
2. Vemadskiy V.I. Problemy biogekhimii // Trudy biogekhimicheskoy laboratorii. T. 16. M.: Nauka, 1980. 320 s. (rus.).
3. Vinogradskiy S.N. Mikrobiologiya pochvy. M.: Izd-vo AN SSSR, 1952. 792 s. (rus.).
4. Voronkevich S.D. Inzhenemaya geokhimiya s osnovami geokhimii tekhnogeneza. M.: Akademicheskaya nauka, Geomarketing, 2011. 480 s. (rus.).
5. Zvyagintsev D.G. Vzaimodeystvie mikroorganizmov s tverdyimi poverkhnostyami. M.: Izd-vo MGU, 1973. 176 s. (rus.).
6. Isachenko B.L. Izbrannye trudy. T. 2. M.: Izd-vo AN SSSR, 1951. 431 s. (rus.).
7. Koff G.L., Kozhevina L.S. Rof mikroorganizmov v izmenenii geologicheskoy sredy // Inzhenemaya geologiya. 1981. № 6. S. 63-74. (rus.).
8. Kuznetsov A.M. O gazovykh yavleniyakh v osnovanii betonnykh plotin // Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo. 1965. № 10. S. 33-37. (rus.).
9. Kuznetsov S.I., Ivanov M.V., Lyalikova N.N. Vvedenie v geologicheskuyu mikrobiologiyu. M.: Izd-vo AN SSSR, 1962. 239 s. (rus.).
10. Maksimovich N.G. Bezopasnost' plotin na rastvorimyykh porodakh (na primere Kamskoy GES). Perm': Izd-vo PGU, 2006. 212 s. <http://www.nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/2006/0298.pdf> (rus.).
11. Maksimovich N.G., Men'shikova E.A., Kazakevich S.V., Shlykov V.G. Mineralogiya cheganskikh glin i ee inzhenemo-geologicheskoe znachenie // Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo. Perm': Izd-vo PGU, 2000. S. 40-43. [http://www.nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng\\_0222.html](http://www.nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng_0222.html) (ms.).
12. Maksimovich N.G., Khayrulina E.A. Geokhimicheskie bar'ery i okhrana okmzhayushchey sredy. Perm': Izd-vo PGU, 2011. 248 s. <http://www.nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/2011/0381.pdf> (ms.).
13. Maksimovich N.G., Khmurchik V.T. Vliyaniye mikroorganizmov na mineral'nyy sostav i svoystva gmntov // Vestnik Permskogo universiteta. Ser. Geologiya. 2012. Vyp. 3 (16). S. 47-54. <http://www.nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/2012/0394.pdf> (ms.).
14. Maksimovich N.G., Khmurchik V.T. Mikrobiologicheskie protsessy v gmntovykh plotinakh // Inzhenemeye izyskaniya. 2013. № 9. S. 46-51. <http://www.nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/2013/0410.pdf> (ms.).
15. Mishustin E.N. Assotsiatsii pochvennykh mikroorganizmov. M.: Nauka, 1975. 107 s. (ms.).
16. Tikhonov I.V., Ruban E.A., Gryazneva T.N., Samuylenko A.Ya., Gavrilov V.A. Biotekhnologiya / pod red. E.S. Voronina. S-Pb.: GIORD, 2005. 792 s. (ms.).
17. Trofimov V.T., Korolev V.A., Voznesenskiy E.A., Golodkovskaya K.A., Vasil'chuk Yu.K., Ziangiurov R.S. Gmntovedenie. M.: Izd-vo MGU, 2005. 1024 s. (ms.).
18. Khmurchik V.T. Korroziya betonnykh sten v potemakh Kamskoy GES // Perspektivy razvitiya estestvennykh nauk v vysshey shkole. Perm': Izd-vo PGU, 2001. S. 126-130. (ms.).