

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГРУНТОВЫХ ПЛОТИНАХ

МАКСИМОВИЧ Н.Г.

Заместитель директора по научной работе Естественно-научного института Пермского государственного национального исследовательского университета (ЕНИ ПГНИУ), заведующий лабораторией геологии техногенных процессов, к.г.-м.н., г. Пермь
nmax54@gmail.com

ХМУРЧИК В.Т.

Ведущий научный сотрудник ЕНИ ПГНИУ, к.б.н., г. Пермь
vadim.khmurchik@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрены результаты комплексных исследований грунтов и подземных вод одной из земляных плотин Камско-Волжского каскада. Вода характеризовалась повышенным содержанием водорастворенного органического вещества техногенного происхождения. Были обнаружены зоны с повышенным содержанием ионов HCO_3^- , NH_4^+ и Fe^{2+} . В донных отложениях дренажных колодцев были выявлены новообразования кальцита и пирита, а в составе газов колодцев были обнаружены углеводороды $\text{C}_1\text{-C}_5$ и летучие органические соединения. Лабораторные эксперименты с образцами грунта плотины показали, что активизация жизнедеятельности микроорганизмов в грунте может привести к изменению его физико-механических свойств и, таким образом, повлиять на устойчивость плотины

Ключевые слова

Основание плотины; подземные воды; водорастворенное органическое вещество; глеевая геохимическая обстановка; микробиологическое выщелачивание ионов; миграция ионов; окислительный геохимический барьер

Введение

Микроорганизмы широко распространены в грунтах разного генезиса и могут оказывать значительное влияние на их свойства [1, 4, 9, 11]. Особое значение приобретают микробиологические процессы, протекающие в гидротехнических сооружениях, так как они могут изменить стабильное состояние грунтов, а следовательно, и устойчивость самих сооружений [2, 3, 6, 8].

В ходе плановых наблюдений за состоянием сооружений и внешней среды на одной из плотин Камско-Волжского каскада было обнаружено повышение мутности воды в дренажных устройствах плотины, величина которой превышала нормативные показатели. Для выяснения причин обнаруженного явления, а также возможного его влияния на устойчивость грунтов тела и основания плотины был проведен комплекс работ, включавший гидрохимические, минералогические, газогеохимические, аквабитуминологические и микробиологические исследования.

Объект исследований

В состав основных сооружений гидроузла входят: водосливная железобетонная плотина, совмещенная со зданием ГЭС, русловая и пойменная земляные плотины, шестикамерный двуниточный судоходный шлюз.

Земляные плотины возведены способом гидромеханизации из песчано-гравийных грунтов с намывным экраном из мелкозернистых песков. Русловая земляная плотина имеет протяженность по гребню 650 м. Ее наибольшая высота составляет 35 м. Верховой откос защищен от волнового

воздействия бетонными армированными плитами, а в его нижней части - каменной наброской на втрамбованном щебне. Крепление низового откоса осуществлено каменным мощением, а выше - посевом травы по растительному слою грунта.

Пойменная земляная плотина расположена между восточной пришлозовой дамбой и коренным берегом долины реки и имеет длину по гребню 1166 м, ширину 21 м наибольшую высоту 19 м. Ее верховой откос укреплен железобетонными плитами на слое щебня, а в его нижней части - наброской щебня. Низовой откос укреплен посевом трав по растительному слою грунта [5]. Естественным основанием плотины являются аллювиальные отложения, развитые по всей площади ее основания. Эти отложения сложены (сверху вниз) глинами и тяжелыми суглинками, мелкозернистыми песками и гравийно-галечниковыми образованиями. Глины и суглинки - слоистые, пылеватые, плотные, влажные, в них встречаются растительные остатки. Вся толща аллювиальных глин и суглинков содержит прослойки песка. Гравийно-галечная толща неоднородна по простиранию, по составу заполнителя и содержанию гравия и гальки. В толще наблюдаются линзы мелкозернистого песка и прослойки глин. Аллювиальный водоносный горизонт на участке плотины перекрыт и имеет местные напоры. Воды горизонта характеризуются гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевой гидрохимической фацией и минерализацией 0,4-0,9 г/л [10].

Для увеличения надежности и долговечности работы описанных сооружений проектом предусмотрен ряд противофильтрационных и дренажных мероприятий. Вдоль основания низового откоса выполнена дренажная канава треугольного профиля, дно и откосы которой облицованы каменным мощением на гравийно-галечной подсыпке. Дренажная канава служит для отвода в русло р. Камы воды, поступающей из всех дренажных устройств плотины. Также через стенки канавы фильтруется вода из низового клина, чем достигается дополнительное осушение низового откоса [5].

Результаты исследований

В ходе осуществления мероприятий по контролю состояния различных систем пойменной земляной плотины и процессов, протекающих в ее районе, на облицовке стенок и дна дренажной канавы обнаружен осадок охристого цвета (рис. 1). Визуальное обследование показало, что источником осадка явились воды аллювиального водоносного горизонта, частичная разгрузка которого осуществляется через колодцы вертикального дренажа. Образование осадка наблюдалось также в пробах воды из этого горизонта при их хранении в неплотно закупоренной таре, а также на фильтрах при пробоподготовке перед химическими анализами. По данным химического анализа осадок представлял собой гидроксид трехвалентного железа.



Рис. 1. Осадок гидроксида трехвалентного железа в дренажной канаве

Для выяснения возможного происхождения осадка были выполнены исследования минералогического состава донных отложений колодца вертикального дренажа. Отложения представляли собой песок мелко- и среднезернистый светло-серого цвета с крупными (более 1 мм) выделениями гидроксида железа (III). При гранулометрическом анализе было установлено преобладание песка среднезернистого размерного класса. Рассев на ситах привел к выделению монофракции гидроксида железа (III) в классе частиц более 1,0 мм. При уменьшении их размера наблюдалось сокращение количества таких зерен: в классе 0,50-0,25 мм оно составляло 1-3%. Среднезернистая часть отложений была представлена в основном кварцевыми минералами: горным хрусталем, халцедоном, жильным кварцем, яшмой, обломками кварцитов, кремнем. Все частицы были сильно окатанными. Крупнопесчаная часть отложений (класс 1,0-0,5 мм) была представлена кальцитом (21,51%), гидрогетитом (20,41%), кварцевыми минералами (19,62%), гетитом (18,21%), аморфным гидроксидом трехвалентного железа (18,05%), железисто-кварцевыми агрегатами (1,57%), пиритом (0,63%). Кальцит представлял собой агрегаты (друзы) разноориентированных кристаллов размером до 0,4 мм с идиоморфными гранями и часто отчетливо проявленной спайностью на их поверхностях (рис. 2, а). Цвет агрегатов - от темно-серого в центральной части до светло-серого по краям (рис. 2, б). Часто встречались бесцветные прозрачные кристаллы (рис. 2, в). Нередко пространство между индивидами в агрегате было заполнено гидроксидом железа (III), который мог также наблюдаться в виде примазок на поверхности кальцита и служить подложкой для кристаллов (рис. 2, г). Иногда наблюдались срастания зерен кальцита и пирита (рис. 2, д). Следы переноса на поверхности зерен отсутствовали. Проведенный рентгеноструктурный анализ показал наличие в составе друз кварца. Кварц, возможно, был захвачен кальцитом в процессе роста или являлся центром роста карбонатных кристаллов. Содержание кварца в друзах - 6%, кальцита - 94%. Аморфный гидроксид железа (III) представлял собой комковатые зерна рыжего, бурого и желто-бурого цвета, сильно пористые, рыхлые, обладающие низкой прочностью. Железисто-кварцевые агрегаты представляли собой зерна горного хрусталя, халцедона, жильного кварца размером до 0,25 мм, сцементированные гетит-гидрогетитовым веществом. Гетит был представлен таблитчатыми или почковидными зернами часто с металлическим блеском. На поверхности зерен были развиты пленки и налеты гидрогетита. Пирит-кварцевые агрегаты были представлены обломками кварцевых минералов, скрепленными новообразованным пиритом в одном общем центре. Кварцевые минералы были сильно окатаны. Среди них встречались горный хрусталь, дымчатый кварц, жильный кварц, халцедон. Преобладали минералы аутигенного комплекса (кальцит, аморфный гидроксид железа (III), гетит, гидрогетит и пирит) над аллотигенным комплексом (кварцевыми минералами).

а



б





Рис. 2. Техногенные минералы донных отложений колодца вертикального дренажа: а - зерна кальцита с идиоморфными гранями и ступенчатой поверхностью спайности; б - затемненный в центре и прозрачный по краям агрегат кристаллов кальцита; в - агрегат прозрачных зерен кальцита; г - агрегат кристаллов кальцита с налетом гидроксида железа (III) на поверхности; д - срастание зерен кальцита и пирита

Таким образом, выявление в донных отложениях колодца вертикального дренажа новообразованных минералов кальцита и пирита может свидетельствовать в пользу развития в аллювиальном водоносном горизонте анаэробной глеевой геохимической обстановки. По мнению авторов, образование отложений гидроксида трехвалентного железа в дренажной канаве стало возможным в результате выхода глеевых содержащих ионы Fe^{2+} вод аллювиального водоносного горизонта на дневную поверхность, где на окислительном геохимическом барьере происходило окисление ионов Fe^{2+} до ионов Fe^{3+} , миграционная способность которых ниже. Аналогичное явление наблюдалось при хранении проб в неплотно закупоренной таре, а также при их фильтрации, когда водорастворенные ионы Fe^{2+} могли вступать в непосредственный контакт с кислородом воздуха и окисляться до Fe^{3+} .

О возможности возникновения глеевой обстановки в аллювиальных отложениях в результате жизнедеятельности микроорганизмов свидетельствует следующий поставленный авторами лабораторный эксперимент. Пробу грунта, отобранного при бурении из основания земляной плотины, помещали в колбу и добавляли в нее стерильную среду для гетеротрофных микроорганизмов (мясопептонный бульон, разбавленный в 10 раз дистиллированной водой). В течение недели при комнатной температуре в колбе развивалась глеевая обстановка, о чем свидетельствовало отложение на ее стенках черного осадка сульфидов металлов. На стенках колбы вблизи границы раздела «среда - воздух», а также на поверхности среды наблюдалось образование еще одного осадка - гидроксида трехвалентного железа охристого цвета (рис. 3).

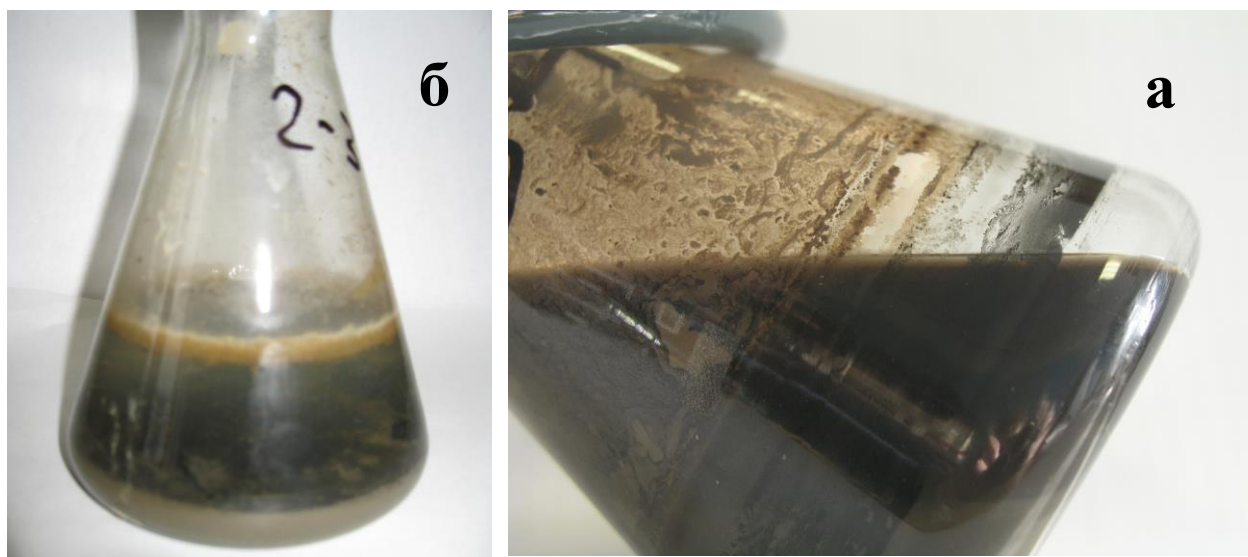


Рис. 3. Образование осадков черного и охристого цвета в результате развития в грунте микроорганизмов: а - осадок черного цвета на стенках колбы вблизи дна; б - осадок охристого цвета на стенках колбы вблизи границы раздела «среда – воздух»

По-видимому, добавление органических веществ инициировало развитие в грунте анаэробного процесса бактериальной сульфатредукции и вынос из грунта в результате жизнедеятельности микроорганизмов ионов металлов, в том числе Fe^{2+} . Те ионы Fe^{2+} , которые не были связаны в осадок с образующимися в процессе бактериальной сульфатредукции сульфид-ионами, окислялись кислородом воздуха до Fe^{3+} и отлагались на стенке колбы, а также образовывали тонкую пленку на поверхности среды.

Проведенный химический анализ проб воды из пьезометров аллювиального водоносного горизонта показал, что в этом горизонте может быть выделена зона, в которой происходит более интенсивное бактериальное разложение водорастворенного органического вещества, обнаруживаемое по повышению содержания ионов HCO_3^- и NH_4^+ (рис. 4, а, б). В пределах этой зоны в аллювиальном водоносном горизонте также выделяется очаг повышенного содержания ионов Fe^{2+} (рис. 4, в), образовавшихся, по-видимому, в результате разложения железосодержащих минералов и бактериального восстановления ионов Fe^{3+} водорастворенным органическим веществом до активно мигрирующих в водоносном горизонте ионов Fe^{2+} . Известно, что в аноксигенных условиях даже хорошо упорядоченные кристаллы оксидов железа (III) способны подвергаться восстановительному растворению [12]. Таким образом, появление очага повышенного содержания ионов Fe^{2+} в воде аллювиального водоносного горизонта может свидетельствовать о том, что в данном месте происходит трансформация водовмещающих пород, в которой принимают участие микроорганизмы.

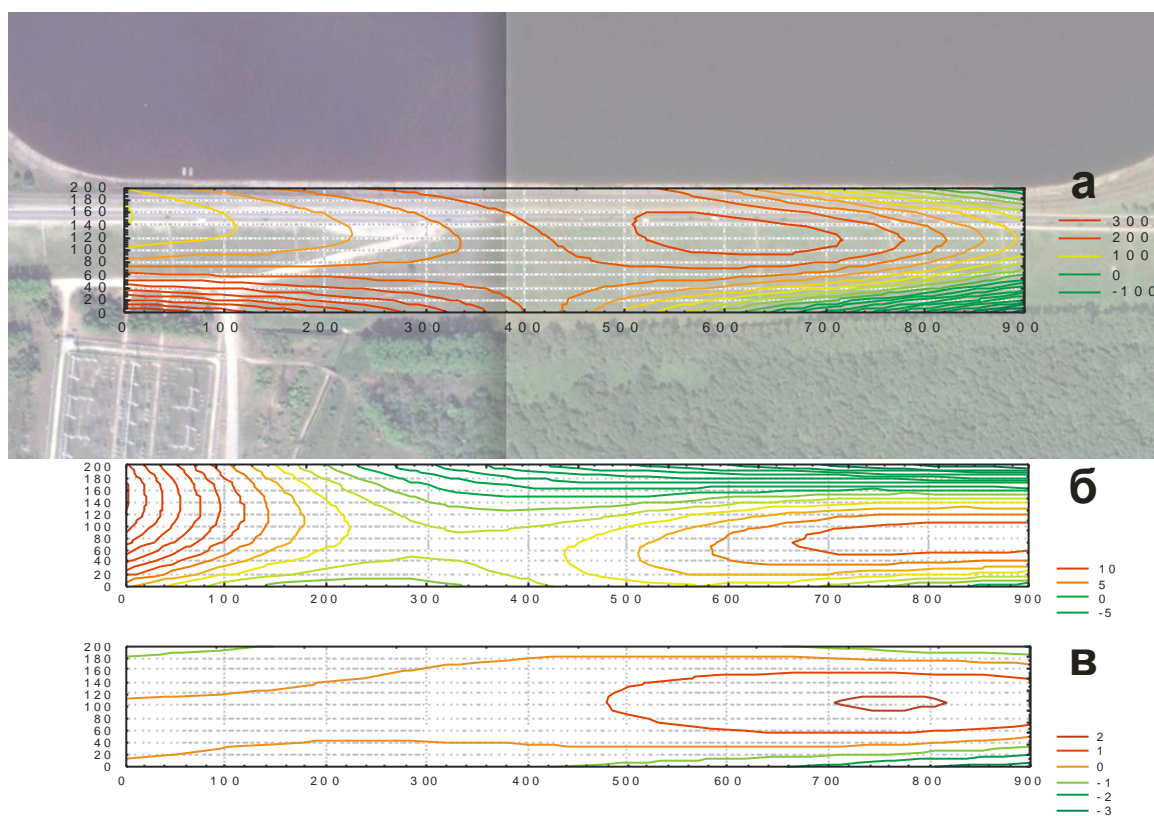


Рис. 4. Изменения содержания ионов в аллювиальном водоносном горизонте, мг/л: а - HCO_3^- ; б - NH_4^+ ; в - Fe^{2+} . Вертикальные оси - расстояние, м; горизонтальные оси - расстояние, м; изолинии разных цветов соответствуют разной концентрации указанных ионов, мг/л (см. легенды справа от рисунков)

Химический анализ водорастворенного органического вещества в пробах воды из колодцев вертикального дренажа показал, что для аллювиального водоносного горизонта было характерно повышенное содержание органического углерода ($C_{\text{орг}}$), составившее 108-122 мг/дм³, хотя в поверхностных и маломинерализованных грунтовых водах на территории Пермского края оно обычно не превышает 30-40 мг/дм³. Основными особенностями водорастворенного органического вещества являлись его неуглеводородный характер и преимущественно техногенное происхождение.

При натурном обследовании колодцев вертикального дренажа в некоторых из них было обнаружено выделение газов в свободном виде, которое усиливалось при ударе пробоотборного оборудования об их дно. В этих колодцах были установлены газосборные ловушки, однако отобрать пробы газа не удалось в связи с прекращением газовыделения. Попытка отбора проб свободно выделявшихся газов в следующем году также не увенчалась успехом. Низкая периодичность газообразования и зональность газовыделения могут быть косвенным доказательством бактериального происхождения газов, накапливающихся в аллювиальном водоносном горизонте.

Были проведены работы по газогеохимическому опробованию воздуха колодцев вертикального дренажа. В составе воздуха 19 из 23 опробованных колодцев было обнаружено присутствие метана (47-431 мг/м³), во всех колодцах присутствовали углеводородные газы C_1 - C_5 (13-409 мг/м³) и летучие органические соединения (1,0-18,5 мг/м³ в пересчете на содержание изобутилена). Максимальные концентрации летучих органических соединений отмечены в восточной части земляной плотины, что, вероятно, связано с поступлением в ее тело и основание не только вод Камского водохранилища, но и вод, содержащих доступное для микроорганизмов органическое вещество, фильтрующихся с левого берега р. Камы, к которому примыкает плотина. В этой части плотины авторами и была обнаружена зона повышенного содержания ионов Fe^{2+} в аллювиальном водоносном горизонте. Эти результаты, по мнению авторов, также являются

подтверждением того, что в аллювиальном водоносном горизонте получила развитие (не без участия микроорганизмов, так как метан в зоне гипергенеза имеет исключительно бактериальное происхождение [7]) глеевая геохимическая обстановка, благоприятствующая миграции водорастворенных ионов Fe^{2+} , образовавшихся при разложении железосодержащих минералов.

Для определения влияния, которое микроорганизмы могут оказывать на прочностные характеристики грунтов, авторами был поставлен лабораторный эксперимент. Пробы грунта, отобранные при бурении скважин на земляной плотине, обрабатывались в течение 14 суток культурами выделенных из этих грунтов гетеротрофных микроорганизмов, а затем проводился анализ их физико-механических свойств (табл. 1-2). После бактериальной обработки снизилась плотность грунтов, в том числе плотность скелета. Органическое вещество, содержащееся в грунтах, было полностью использовано микроорганизмами. В грунтах уменьшился угол внутреннего трения, а вот изменение силы сцепления между частицами грунта было противоположно направленным: в одном случае сила сцепления уменьшилась в три раза, а в другом она увеличилась.

Табл. 1

Изменение свойств глины легкой пылеватой, тугопластичной, с примесью органических веществ (скважина № 1, интервал отбора 11,2-11,5 м) после обработки аэробными гетеротрофными микроорганизмами

Показатель	До опыта	После опыта
Естественная влажность, %	31	34
Плотность, г/см ³	1,98	1,95
Плотность скелета, г/см ³	1,51	1,46
Плотность частиц грунта, г/см ³	2,72	2,72
Коэффициент пористости	0,800	0,869
Коэффициент водонасыщения	1,055	1,064
Относительное содержание органического вещества	0,05	0,00
Угол внутреннего трения	10	6
Сцепление, кПа	10	45
Модуль общей деформации, МПа	2,1	3,1

Табл. 2

Изменение свойств суглинка тяжелого пылеватого, мягкопластичного, с примесью органических веществ (скважина № 2, интервал отбора 9,5-9,8 м) после обработки аэробными гетеротрофными микроорганизмами

Показатель	До опыта	После опыта
Естественная влажность, %	31	34
Плотность, г/см ³	1,96	1,83
Плотность скелета, г/см ³	1,50	1,37
Плотность частиц грунта, г/см ³	2,71	2,72
Коэффициент пористости	0,811	0,933
Коэффициент водонасыщения	1,036	1,064
Относительное содержание органического вещества	0,06	0,00
Угол внутреннего трения	11	10
Сцепление, кПа	15	5
Модуль общей деформации, МПа	5,1	Нет данных

Таким образом, выполненный комплекс исследований показал, что в аллювиальном водоносном горизонте земляной плотины достаточно активно протекают микробиологические процессы, использующие водорастворенное органическое вещество и приводящие к созданию глеевой геохимической обстановки, благоприятной для миграции с током воды ионов двухвалентного железа. Источником ионов железа являются грунты как области питания, так и самого водоносного горизонта, выщелачивающиеся под действием микроорганизмов. Ионы трехвалентного железа при этом восстанавливаются микроорганизмами до миграционноспособного двухвалентного состояния за счет окисления водорастворенного органического вещества. При выходе глеевых вод на дневную поверхность (окислительный геохимический барьер) происходит окисление содержащихся в них ионов двухвалентного железа до трехвалентного состояния и выпадение последних в осадок. Количество образующегося осадка (наблюдаемые мутность вод и мощность слоя отложений в дренажной канаве) будет зависеть от интенсивности микробиологических процессов, приводящих к выщелачиванию ионов железа из грунтов, и изменяющих физико-механические показатели их прочности.

Заключение

Проведенные исследования показали, что протекающие в исследованной земляной плотине процессы, которые имеют внешние признаки суффозионных, могут и не являться таковыми: источником повышения мутности дренажных вод явился не механический вынос частиц грунта из тела и основания сооружения, а новообразование на окислительном геохимическом барьере осадка из ионов, находившихся до этого в водорастворенном состоянии.

Микробиологическая деятельность может привести к мобилизации и выносу вещества из тела и основания плотины за счет следующих процессов и факторов:

- образование газов повышает напряженное состояние и вызывает разрыхление грунтов;
- вынос отдельных элементов из грунтов, приводящий к разрушению их минерального скелета, снижает их механическую прочность;
- под действием микроорганизмов изменяется микроагрегатный и химический состав грунтов, в них происходит диспергация глинистых агрегатов, повышается гидрофильность грунтов, снижаются их фильтрационная способность, прочность и модуль общей деформации;
- образуемые микроорганизмами экзометаболиты, проявляющие поверхностно-активные свойства, снижают прочность структурных связей в грунтах.

В связи с этим можно сделать вывод, что при проведении инженерно-геологических изысканий существует необходимость в исследовании поведения микроорганизмов в геологической среде и их реакций на внешние воздействия. Это позволит оценивать роль микробных процессов в изменениях инженерно-геологических свойств грунтов и прогнозировать ход инженерно-геологических процессов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-05-31130 и гранта Министерства образования и науки РФ 14.В37.21.0603.

Список литературы

1. *Болотина И.Н.* Физико-химические явления с участием биотического компонента // Теоретические основы инженерной геологии. Физико-химические основы. М.: Недра, 1985. С. 65-70.

2. *Болотина И.Н., Воронкевич С.Д., Максимович Н.Г.* О возможности техногенных биогеохимических явлений при силикатизации гипсоносных пород // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 1986. № 4. С. 49-53.
3. *Болотина И.Н., Максимович Н.Г.* Изучение роли микроорганизмов подземных вод при химическом уплотнении гипсоносных пород основания плотины // Тезисы докладов научно-практической конференции «Координация исследований на водохранилищах Камского каскада для разработки мероприятий по улучшению экологических условий в водоемах и на прилегающих территориях». Пермь, 1984. С. 44-45.
4. *Болотина И.Н., Сергеев Е.М.* Микробиологические исследования в инженерной геологии // Инженерная геология. 1987. № 5. С. 3-17.
5. *Боряев Ф.И., Голубниченко П.Г., Южаков В.С.* Из опыта эксплуатации Камской ГЭС // Гидротехническое строительство. 1970. № 11. С. 5-9.
6. *Кофф Г.Л., Кожевина Л.С.* Роль микроорганизмов в изменении геологической среды // Инженерная геология. 1981. № 6. С. 63-74.
7. *Кузнецов С.И., Иванов М.В., Ляликова Н.Н.* Введение в геологическую микробиологию. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 239 с.
8. *Максимович Н.Г., Меньшикова Е.А., Казакевич С.В.* Исследование возможности повышения агрессивности подземных вод при строительстве на пиритсодержащих глинистых грунтах // Материалы Международного симпозиума «Инженерно-геологические проблемы урбанизированных территорий». Екатеринбург: Аква-Пресс, 2001. Т. 2. С. 545-551.
9. *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.
10. *Маменко Г.К.* Камская плотина на р. Каме // Геология и плотины. Т. 5. М.: Энергия, 1967.
11. *Радина В.В.* Роль микроорганизмов в формировании свойств грунтов и их напряженного состояния // Гидротехническое строительство. 1973. № 9. С. 22-24. [1](#)
12. *Bonneville S., Van Cappelen P., Behrends T.* Microbial reduction of iron (III) oxyhydroxides: effects of mineral solubility and availability // Chemical Geology. 2004. V. 212. P. 255-268.

Выходные данные: Журнал «Инженерные изыскания», №9/2013, С. 66-71