

ИЗУЧЕНИЕ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОМПЛЕКСЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ

INVESTIGATION OF MICROBIOLOGICAL PROCESSES IN THE COMPLEX OF ENGINEERING SURVEYS

МАКСИМОВИЧ Н.Г.

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

ХАЙРУЛИНА Е.А.

Ведущий научный сотрудник ЕНИ ПГНИУ, к.г.н.,
г. Пермь, elenakhay@gmail.com

ДЕМЕНЕВ А.Д.

Младший научный сотрудник, аспирант ЕНИ ПГНИУ,
г. Пермь, demenevartem@gmail.com

MAKSIMOVICH N.G.

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

KHAYRULINA E.A.

Leading staff scientist of the Institute of Natural Sciences of Perm State National Research University (INS PSNRU), PhD (candidate of science in Geography), Perm, elenakhay@gmail.com

DEMENEV A.D.

Junior staff scientist, postgraduate student of the Institute of Natural Sciences of Perm State National Research University (INS PSNRU), Perm, demenevartem@gmail.com

Ключевые слова: грунты; подземные воды; микробиологические процессы; инженерно-геологические изыскания; инженерно-экологические изыскания; нормативная база.

Key words: grounds; groundwater; microbiological processes; engineering-geological surveys; engineering-ecological surveys; normative base.

Аннотация: жизнедеятельность микроорганизмов способна вызывать изменения параметров геологической среды. В статье дано краткое описание влияния микроорганизмов на твердую, жидкую, газовую фазы грунтов и их инженерные характеристики. В этом отношении рассмотрены нормативные документы по инженерно-геологическим и инженерно-экологическим изысканиям. Сделан вывод об отсутствии четких критериев необходимости проведения микробиологических исследований в ходе инженерных изысканий. Предложены некоторые параметры, характеризующие микробиологические процессы, которые необходимо исследовать при изысканиях.

Abstract: vital activity of microorganisms is able to cause changes of parameters of the geological environment. The article briefly describes influence of microorganisms on solid, liquid and gas phases of soils. In this regard, normative documents on engineering-geological and engineering-ecological surveys are considered. The authors draw the conclusion about absence of clear criteria of the necessity of microbiological investigations for engineering surveys. Some parameters characterizing microbiological processes that should be investigated for engineering surveys are offered.

Инженерные изыскания (кроме инженерно-топографических) прямо или косвенно предполагают изучение микробиологической составляющей грунтов, подземных и поверхностных вод. Скорость протекания микробиологических процессов при определенных условиях может быть очень высокой, в отличие от химических и физических процессов. Техногенное воздействие нарушает условия протекания в геологической среде многих природных процессов, в том числе микробиологических. При этом нередко наблюдается существенное ускорение некоторых нежелательных микробиологических процессов.

Степень воздействия микроорганизмов на параметры геологической среды сложно спрогнозировать. Как следствие, определенные количественные и качественные характеристики геологической среды, полученные при инже-

нерных изысканиях, могут существенно изменяться в ходе строительства и эксплуатации сооружений. Это может привести к ухудшению экологической обстановки, повлиять на свойства грунтов и в конечном счете на безопасность сооружения.

Микроорганизмы широко распространены в грунтах разного генезиса и состава. В процессе жизнедеятельности они используют такие элементы, как Na, K, Ca, Mg, Fe, P, C, N, S и многие другие, и обладают почти универсальной способностью выполнять те или иные геохимические функции.

Исключительную роль микроорганизмов в биогеохимических процессах отмечали многие отечественные исследователи [3, 4, 10, 12]. Особенности физиологии микроорганизмов, их способность воздействовать на минералы, органические и неорганические вещества обуславливают их значительное влия-

ние на свойства грунтов, их минеральный состав, структуру, дисперсность, напряженное состояние и др. [8, 9, 13, 15, 17, 30].

При решении ряда инженерно-геологических задач изучение живого компонента грунтов — микроорганизмов — является очень важным. Деятельность микроорганизмов может приводить к изменениям механических показателей грунтов, мобилизации и выносу из них тех или иных веществ.

Значение микробиологической составляющей грунта может существенно возрасти при техногенном воздействии [11].

При изысканиях необходимо исследовать грунты на интенсивность протекания в них микробиологических процессов: не только установить присутствие различных физиологических групп микроорганизмов, но и дать оценку степени их потенциальной опасности.

Однако в существующих нормативных документах, например, ничего нет про оценку степени агрессивности микробиоты грунтов по отношению к строительным материалам. Сложность такой оценки обусловлена тем, что агрессивность микробиоты подземного пространства зависит не только от ее количества и видового состава, но и от параметров геологической среды (температуры, влажности, аэрации, наличия или отсутствия в грунте органических веществ, антропогенных факторов и т.д.). Большое разнообразие микроорганизмов в грунте, их способность адаптироваться к меняющимся условиям среды значительно усложняют задачу. Для принятия технических решений по защите инженерных сооружений от агрессивного воздействия микробиоты грунтов и подземных вод указанная оценка необходима.

Рассмотрим роль оценки микробиологических процессов при различных видах изысканий.

Инженерно-экологические изыскания регламентируют изучение микробиологического состава грунтов, поверхностных и подземных вод чаще всего по отношению к санитарно-гигиенической ситуации. Необходимость таких исследований грунтов и воды связана с близостью населенных пунктов или использованием водных ресурсов для питьевого водоснабжения. Согласно СП 47.13330.2012 [25] для вод питьевого назначения утверждён список допустимых показателей — количества сапрофитных бактерий, лактозоположительных кишечных палочек, возбудителей кишечных инфекций (сальмонелл, шигелл, энтеровирусов), колифагов, энтерококков, фитопланктона. В рамках газогеохимических исследований рекомендовано проводить послыйный отбор проб грунтов для выполнения микробиологического анализа активности метаногенерирующей и метанооксилирующей микрофлоры [21]. Для оценки санитарного состояния грунтов населенных мест в зависимости от их функционального назначения регламентируется анализ содержания лактозоположительных кишечных палочек, энтерококков, патогенных микроорганизмов, яиц и личинок гельминтов, цист кишечных патогенных простейших, личинок и куколок синантропных мух [19].

Опыт исследований авторов показывает, что для характеристики и прогноза экологического состояния водных объектов, грунтов и оценки протекающих в них процессов перспективным является использование микробиоло-

гических критериев — численности сапрофитных, галофильных и нефтеокисляющих бактерий, являющихся биоиндикаторами различных типов загрязнений. В качестве дополнительных санитарных показателей при оценке качества воды используются также дифференцированный учет численности мезофильных и психрофильных сапрофитных микроорганизмов и определение уровня трофности по соотношению копиотрофных и олиготрофных сапрофитных микроорганизмов.

Инженерно-гидрометеорологические изыскания предусматривают общую оценку современного экологического состояния водной и воздушной экосистем и их устойчивости к возможным воздействиям [25]. Необходимость анализа микробиологического состояния поверхностных вод в российских нормативных документах не определена.

Инженерно-геологические изыскания согласно нормативным документам должны обеспечивать комплексное изучение инженерно-геологических условий района проектируемого строительства, включая составление прогноза возможных изменений инженерно-геологических условий в сфере взаимодействия проектируемых объектов с геологической средой [22–25]. При нормировании более приоритетны свойства грунтов, так как именно от условий окружающей среды зависит развитие микробного сообщества. В процессе его развития будут происходить изменения геологической среды, интенсивность и направление которых и будут определяться микробным сообществом, поэтому нормирование свойств микробиоты также является необходимым при изысканиях.

По мнению авторов, значимыми с инженерно-геологической точки зрения, а значит подлежащими нормированию, могут считаться свойства микробиоты грунтов, связанные с образованием:

- кислот или щелочей;
- газов;
- поверхностно-активных веществ;
- слизей;
- хелатирующих веществ.

Аналізу (и нормированию) также подлежат те характеристики грунта, которые благоприятствуют развитию в нем микроорганизмов или могут измениться при их развитии, а именно:

- содержание доступных для микроорганизмов органических веществ;
- наличие химических элементов с переменной валентностью (железа, мар-

ганца, ванадия, мышьяка и др.) в доступной для микроорганизмов форме;

- устойчивость (реакционноспособность) минералов грунта при смене окислительно-восстановительной и кислото-щелочной обстановки.

Отдельные методы, которые могут быть использованы с этой целью, были описаны авторами в составе комплексного метода исследования активности микробиоты грунтов в работе [16].

Нормативными документами рекомендуется оценивать биоагрессивность подземных вод по отношению к различным металлическим конструкциям, бетону, оболочкам кабелей связи и т.д. В районах распространения органоминеральных и органических грунтов рекомендуется проводить дополнительные исследования по определению содержания органических веществ, степени их разложения, зольности, ботанического состава растительных остатков и т.д. [24, 25]. Свойства органоминеральных и органических грунтов следует устанавливать с учетом их возможного уплотнения, осушения и инженерной подготовки территории. Агрессивность грунтов в инженерной геологии рассматривается как негативное химическое, бактериологическое или физико-химическое влияние на различные строительные конструкции. Рекомендуется оценивать биоагрессивность грунта по качественным признакам — окраске грунта и наличию восстановленных соединений серы, а также по наличию грибов и тионовых бактерий. Предполагаются также меры по защите от биокоррозии [6, 20]. Таким образом, в нормативных документах федерального уровня отражены только отдельные аспекты влияния микробиологических процессов на параметры геологической среды, однако в соответствии с этими документами необходим прогноз возможных изменений инженерно-геологических условий территории, хотя нормативная база для этого, по существу, отсутствует.

Во временных строительных нормах, действующих на территории г. Санкт-Петербурга [18], в дополнение к общепринятым методам исследований инженерно-геологических условий предлагается более детальное изучение микробиологических процессов. На стадии изысканий для строительства новых зданий и сооружений необходимо определить степень микробной пораженности грунтов (по суммарному количеству белка), степень агрессивности грунтовых вод, вызванной жизнедеятельностью микроорганизмов, наличие условий для биохимической газогенера-

ции; наличие возможных источников питания для микроорганизмов, а также составить прогноз возможных изменений физико-механических свойств грунтов и развития различных процессов в основаниях зданий и сооружений под воздействием микроорганизмов. Для проведения биологического обследования состояния строительных конструкций, а также степени биоповреждений строительных материалов рекомендуется использовать специально разработанные методики. При проектировании и строительстве инженерных сооружений согласно РВСН 20-01-2006 необходимо уделять внимание мероприятиям по снижению отепляющего эффекта, оказываемого на грунт подземными частями зданий и сооружений, предотвращению загрязнений строительных конструкций органическими и иными веществами, способствующими развитию биодеструкторов, обустройству надежной гидроизоляции и т.д. Для различных стадий проектирования и видов строительства в указанном документе также предлагаются методики по предупреждению и ликвидации нежелательных последствий развития микробиологических процессов. В качестве справочной информации приводятся причины биоповреждений строительных материалов, конструкций, зданий и сооружений, а также некоторые аспекты влияния микробиологических процессов на свойства грунтов. Рассмотрена роль микробиологической деятельности в приобретении песчаными грунтами плавунных свойств, приведена зависимость коэффициента фильтрации песков от количества суммарного белка, отмечено воздействие анаэробных восстановительных условий и микрооргани-

мов на физико-механические свойства глинистых грунтов. В РВСН 20-01-2006 достаточно широко рассмотрено влияние микробиологических процессов на строительные конструкции, здания и сооружения, подчеркнута необходимость прогноза изменений гидрохимической обстановки территории и физико-механических свойств грунтов в процессе эксплуатации инженерных сооружений, однако методики исследований для составления прогноза возможных изменений физико-механических свойств грунтов, необходимого для обеспечения безопасной эксплуатации инженерных сооружений, не приводится.

Рассмотрим некоторые наиболее типичные ситуации и последствия *влияния микроорганизмов на свойства грунтов*.

Изменения твердой фазы грунтов.

Все микроорганизмы воздействуют на твердый компонент грунта, используя для своего питания содержащиеся в нем минеральные элементы. Микроорганизмы способны разрушать важнейшие минеральные компоненты горных пород, такие как силикаты, алюмосиликаты и карбонаты [27]. Вынос элементов из минералов в присутствии микроорганизмов в два-три раза выше, чем под действием воды или «мертвого» органического вещества. Особенности выноса элементов определяются прочностью связей атомов в структуре кристаллической решетки, типом микроорганизмов и условиями разложения [31]. Более активное воздействие на грунт обусловлено способностью микроорганизмов окислять и восстанавливать элементы с переменной валентностью, входящие в состав кристаллических решеток минералов, влиянием метаболитов (неорга-

нических и органических кислот и щелочей, слизей, сероводорода и др.). Минерал при этом может быть полностью разрушен либо трансформирован в другой при избирательном выносе элементов. Случаи полного микробного разрушения были установлены для нефелина, биотита, карбонатов [2]. Примерами трансформаций могут служить: вермикулитизация биотита; окислительная трансформация антимонита в сенармонтит; окислительная трансформация пирита в минералы типа натроязита; в анаэробных условиях — пиритизация таких сульфатных минералов, как ярозит, натроярозит, алуниит и др. [2, 5, 26 и др.]. Возможно и микробиологическое новообразование минералов, что было показано для ряда карбонатных, сульфидных, бокситовых, железистых (гетита, гематита) отложений, имеющих в некоторых случаях масштабы месторождений [1, 28] (например, рис. 1).

Микроорганизмы оказывают влияние на электроповерхностные свойства частиц дисперсных грунтов, изменяя их заряды при адсорбции на них отрицательно заряженных бактериальных клеток или продуктов метаболизма бактерий. Развитие микробиологической составляющей увеличивает содержание тонкодисперсной фракции, способствует формированию тонкой пористости, снижению проницаемости и водоотдачи песчаных грунтов. Сорбция бактериальных клеток и продуктов их метаболизма на глинистых частицах приводит к формированию биопленок, что значительно ослабляет интенсивность молекулярных взаимодействий между частицами, приводит к снижению прочности и показателей деформационных свойств [7] (например, рис. 2). В присутствии гуму-

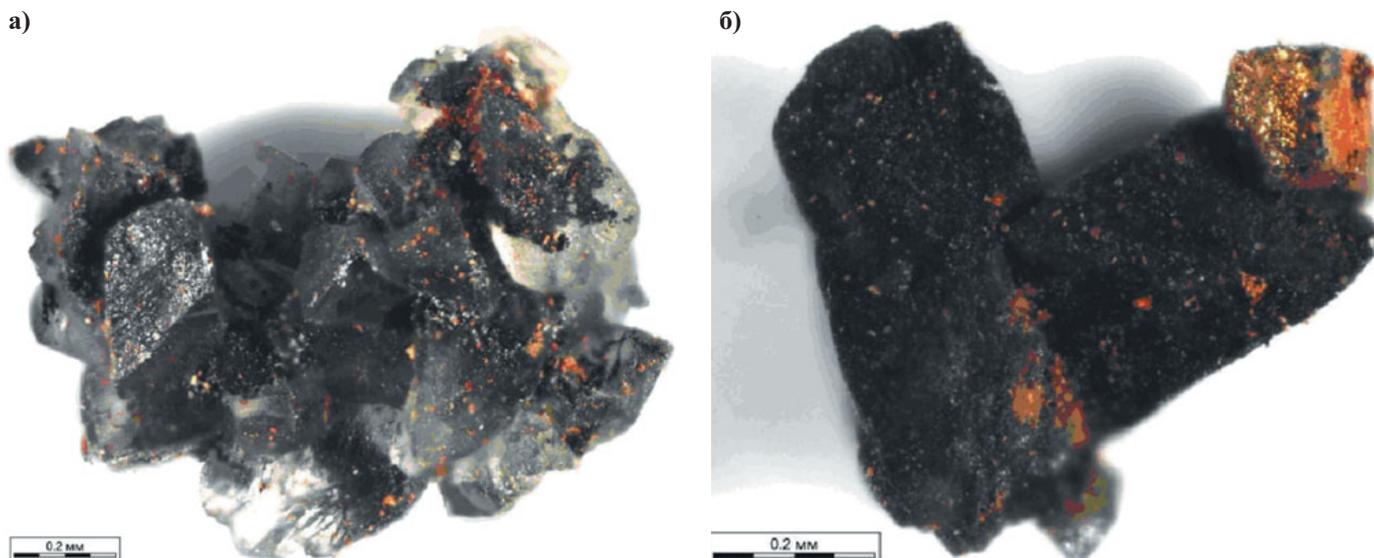


Рис. 1. Минералы, образовавшиеся в результате бактериального процесса сульфатредукции в колодце вертикального дренажа земляной плотины: а — агрегат зерен кальцита; б — сросток зерен кальцита и пирита

совых веществ микроорганизмы восстанавливают такие устойчивые соединения трехвалентного железа, которые они не могут восстановить в отсутствие гумуса (например, кристаллические оксиды железа или структурное железо в глинистых минералах [29]). В ряде случаев под действием живого компонента изменяются пористость и водопроницаемость грунтов благодаря заполнению пор клеточной биомассой или нерастворимыми продуктами обмена (карбонатами, окислами), образовавшимися при трансформации твердого компонента. Уменьшение прочности грунтов при развитии микроорганизмов может быть связано с разрушением гидроокисного и органического цементов поверхностно-активными веществами бактериального происхождения.

Изменение газовой фазы грунтов. Трансформации твердого компонента часто сопряжены с потреблением или выделением газов и, таким образом, с изменениями газовой состава грунта. Разложение органических веществ, бикарбонатов, сульфатов в зависимости от условий, в которых оно происходит, ведет к выделению углекислого газа, азота, аммиака, сероводорода, метана, летучих органических веществ и др. За интенсивное газообразование при разложении органических веществ в грунтах ответственны все гетеротрофные микроорганизмы. Газонасыщенность среды может возрастать в результате метаногенеза или восстановления нитрит- и нитрат-ионов (например, рис. 3). Установлено [17], что микроорганизмы в закрытой системе грунта могут увеличивать поровое давление и придавать ему плавучие свойства.

Изменение жидкой фазы грунта. Изменения твердого и газового компонентов грунта отражаются и на особенностях жидкой составляющей, влияя на ее состав, ионную силу, pH, окислительно-восстановительный потенциал и др. К закислению среды ведут, например, накопление в ней продуктов неполного разложения растворенных в воде органических веществ (летучих жирных кислот), процессы брожения, восстановление ионов железа (III). Значительное закисление поровых вод может быть вызвано также тионовыми и нитрифицирующими бактериями. Защелачивание среды может происходить в результате процессов метаногенеза и восстановления нитрит-, нитрат- и сульфат-ионов. Изменения окислительно-восстановительных условий среды будут происходить по мере исчерпания микроорганизмами веществ,

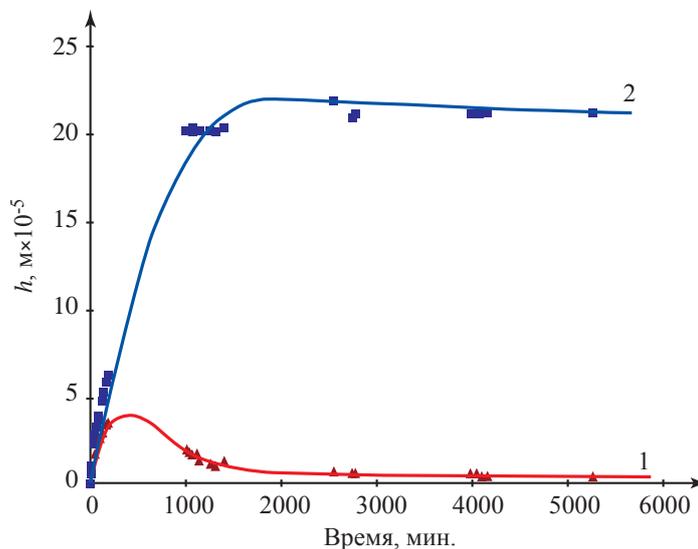


Рис. 2. Изменение абсолютной высоты h образца суглинки при набухании в процессе исследования в приборе свободного набухания грунтов (ПСНГ) производства ООО «Щекино-ВНИР»: 1 — контрольный образец (увлажненный дистиллированной водой); 2 — опытный образец (увлажненный питательной для микроорганизмов средой)

используемых ими в качестве конечных акцепторов электронов для окисления органических веществ. Кроме того, эти изменения могут быть вызваны выделением микроорганизмами продуктов метаболизма, поглощением ими различных элементов из минералов и жидкой фазы, изменением под их влиянием минералов, состава обменных катионов, жидкой и газовой фаз, ионной силы растворов [27]. Таким образом, бактериальное воздействие на твердый компонент грунта будет приводить к изменениям и в его жидкой составляющей. И наоборот, бактериальное изменение состояния жидкой компоненты за счет экзометаболитов будет приводить к изменениям в твердом компоненте грунта.

Несмотря на очевидность возможного негативного влияния микробиологических процессов на инженерно-геологические характеристики грунтовых массивов и состояние окружающей среды, в настоящее время нет нормативных документов, четко регламентирующих методики изучения влияния жизнедеятельности микроорганизмов на эти параметры.

Авторами предлагается нормировать определение содержания в грунтах кислот или щелочей, газов, поверхностно-активных веществ, слизи, хелатирующих веществ, образующихся в результате микробиологической активности. Среди свойств грунта, которые благоприятствуют развитию в нем микроорганизмов или могут измениться при

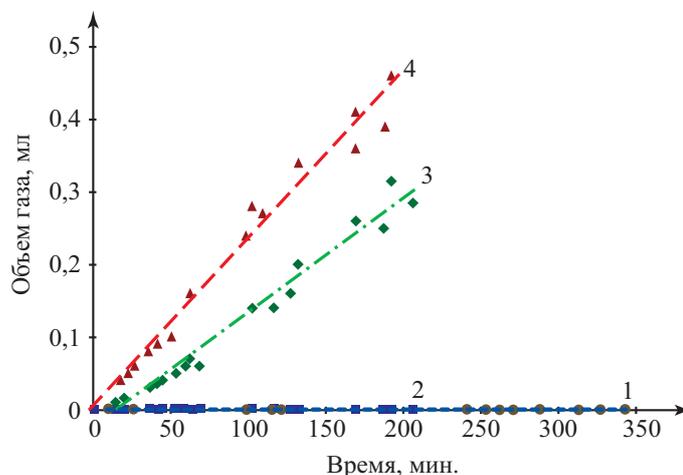


Рис. 3. Образование газа при добавлении к 50 г воздушно-сухого образца глины 100 мл модельной жидкости: 1 — 0,01% раствора глюкозы и 0,5% фенола; 2 — дистиллированной воды; 3 — 0,01% раствора глюкозы; 4 — 0,01% раствора глюкозы и 0,1% KNO_3

их развитии, необходимо анализировать содержание доступных для микроорганизмов органических веществ, наличие химических элементов с переменной валентностью (железа, марганца, ванадия, мышьяка и др.) в доступной для микроорганизмов форме, устойчивость (реакционноспособность) минералов

грунта при смене окислительно-восстановительной и кислото-щелочной обстановки.

Кроме того, разработка и принятие нормативной базы по исследованию микробиоты и ее активности в грунтах необходимы и для последующих шагов, а именно для разработки биогеотехно-

логических методов воздействия на грунты [14] с целью улучшения их инженерно-геологических характеристик. 

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант а_15-05-07461).

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., Сергеев Е.М. Микробиологические исследования в инженерной геологии // Инженерная геология. 1987. № 5. С. 3–17.
3. Вернадский В.И. Проблемы биогеохимии // Труды биогеохимической лаборатории. Том 16. М.: Наука, 1980. 320 с.
4. Виноградский С.Н. Микробиология почвы. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 792 с.
5. Горбунова К.А., Молоштанова Н.Е., Максимович Н.Г., Яцина И.И. Геохимически измененные породы и вторичные минеральные образования Кунгурской пещеры // Кунгурская ледяная пещера. Пермь: Изд-во ПГУ, 1995. С. 26–58. URL: http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng_0159.pdf.
6. ГОСТ 9-602-2005. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. М.: МГС СНГ, 2006.
7. Дашко Р.Э., Александрова О.Ю., Котюков П.В., Шидловская А.В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. № 13. С. 25–71.
8. Дашко Р.Э., Шидловская А.В. Биотическая и абиотическая компоненты в подземной среде: их генезис и влияние на состояние и свойства песчаных отложений // Записки Горного института. 2012. Т. 197. С. 209–215.
9. Дашко Р.Э., Шидловская А.В., Панкратова К.В., Жукова А.М. Техногенная трансформация основных компонентов подземного пространства мегаполисов и ее учет в геомеханических расчетах (на примере Санкт-Петербурга) // Записки Горного института, 2011. Т. 190. С. 65–71.
10. Исаченко Б.Л. Избранные труды. Том 2. М.: Изд-во АН СССР, 1951. 431 с.
11. Кофф Г.Л., Кожеева Л.С. Роль микроорганизмов в изменении геологической среды // Инженерная геология. 1981. № 6. С. 63–74.
12. Кузнецов С.И., Иванов М.В., Ляликова Н.Н. Введение в геологическую микробиологию. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 239 с.
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://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/2012/0394.pdf>.
14. Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т. Биотехнологии в инженерной геологии // Инженерная геология. 2014. № 3. С. 18–25. URL: <http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/2014/0432.pdf>.
15. Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т. Микробиологические процессы в грунтовых плотинах // Инженерные изыскания. 2013. № 9. С. 66–72. URL: <http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/2013/0410.pdf>.
16. Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т., Лаздовская М.А., Демев А.Д. Комплекс методов исследования микробиологической активности в грунтовых плотинах // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7. Геология. География. 2014. № 4. С. 88–100. URL: <http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/2014/0435.pdf>.
17. Радина В.В. Роль микроорганизмов в формировании свойств грунтов и их напряженного состояния // Гидротехническое строительство. 1973. № 9. С. 22–24.
18. РВСН 20-01-2006 (ТСН 20-303-2006). Защита строительных конструкций, зданий и сооружений от агрессивных химических и биологических воздействий окружающей среды. СПб.: Правительство Санкт-Петербурга, 2006.
19. СанПиН 2.1.7.1287-03. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы. М.: Минздрав РФ, 2003.
20. СНиП 2.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии. М.: Госстрой СССР, 1985.
21. СП 11-102-97. Инженерно-экологические изыскания для строительства. М.: Госстрой России, 1997.
22. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть I. Общие правила производства работ. М.: Госстрой России, 1997.
23. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. М.: Госстрой России, 2000.
24. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть III. Правила производства работ в районах распространения специфических грунтов. М.: Госстрой России, 2000.
25. СП 47.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 11-02-96). Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. М.: Госстрой России, 2012.
26. Чухров Ф.В., Ляликова Н.Н., Горшков А.И. О роли микроорганизмов в образовании ярозитов // Доклады АН СССР. 1978. Т. 241. № 4. С. 929–932.
27. Ehrlich H.L. Geomicrobiology. New York: Marcel Dekker Inc., 1996. 719 p.
28. Fortin D., Langley S. Formation and occurrence of biogenic iron-rich minerals // Earth-Science Reviews. 2005. V. 72. № 1-2. P. 1–19.
29. Lovley D.R., Fraga J.L., Blunt-Harris E.L., Hayes L.A., Phillips E.J.P., Coates J.D. Humic substances as a mediator for microbially catalysed metal reduction // Acta Hydrochimica et Hydrobiologica. 1998. V. 26. № 3. P. 152–157.
30. Maksimovich N.G., Khmurchik V.T. The influence of microbiological processes of subsurface waters and grounds in river dam basement / Engineering Geology for Society and Territory. Vol. 6. Applied Geology for Major Engineering Projects (ed. by G. Lollino et al.). Springer, 2015. P. 563–565.
31. Maurice P.A., Vierkorn M.A., Hersman L.E., Fulghum J.E. Dissolution of well and poorly ordered kaolinites by an aerobic bacterium // Chemical Geology. 2001. V. 180. № 1–4. P. 81–97.