

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГРУНТОВ

**Н. Г. Максимович, В. Т. Хмурчик**

Естественнаучный институт Пермского государственного национального  
исследовательского университета, г. Пермь, 614990, ул. Генкеля, 4.

E-mail: nmax54@gmail.com

Микроорганизмы широко распространены в грунтах разного генезиса и могут оказывать значительное влияние на их свойства. При этом обнаруживаемые в грунтах микроорганизмы могут функционировать на всех этапах формирования и изменения грунтов [1, 3, 6, 8]. При стабильном состоянии грунтов микроорганизмы способны нивелировать колебания газового состава, состава поровых вод и твердого компонента, возникающие при изменениях атмосферного давления и движении газов из мантии к поверхности, при подтоке подземных вод и нисходящем движении атмосферных вод. Значение микробиологической деятельности может существенно возрастать при нарушении стабильного состояния грунта, а также при техногенном воздействии [2, 4, 7]. Таким образом, исследование биотических свойств грунтов приобретает важное значение в ходе инженерно-геологических изысканий. Особую значимость приобретают микробиологические процессы, протекающие в гидротехнических сооружениях, так как они могут изменить стабильное состояние грунтов, а, следовательно, и устойчивость самих сооружений [2, 4, 5, 7]. Однако, до настоящего времени нет единого методического подхода к исследованию грунтов, который бы принимал во внимание наличие и деятельность в них микробиологической составляющей, что вынуждает исследователей при возникновении проблем искать собственные подходы для решения ряда узконаправленных конкретных задач, а не проблемы в целом.

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, превышающее нормативные показатели. Для выяснения причин обнаруженного явления, а также возможного его влияния на устойчивость грунтов тела и основания плотины был проведен комплекс полевых и лабораторных работ, включающий гидрохимические, минералогические, газогеохимические, аквабитуминологические и микробиологические исследования.

Визуальное обследование показало, что источником осадка, повышающего показатель мутности дренажных вод, 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.

Минералогический анализ донных отложений колодца вертикального дренажа показал преобладание в них минералов аутигенного комплекса (кальцит, аморфный гидроксид железа (III), гетит, гидрогетит и пирит) над аллотигенным комплексом (кварцевые минералы). Было выявлено новообразование минералов кальцита и пирита, что может свидетельствовать о развитии в аллювиальном водоносном горизонте анаэробной глеевой геохимической обстановки. По нашему мнению, 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 фильтрации проб, когда водорастворенные ионы  $Fe^{2+}$  могли вступать в непосредственный контакт с кислородом воздуха и окисляться до ионов  $Fe^{3+}$ . Возможность возникновения глеевой обстановки в аллювиальных отложениях в результате жизнедеятельности микроорганизмов была доказана в лабораторном эксперименте.

Химический анализ водорастворенного органического вещества в пробах воды из колодцев вертикального дренажа показал, что для аллювиального водоносного горизонта было характерно повышенное содержание органического углерода, в 2–3 раза превышающее фоновые значения для региона.

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  $NH_4^+$ . В пределах этой зоны в аллювиальном водоносном горизонте также выделяется очаг повышенного содержания ионов  $Fe^{2+}$ , 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 [9]. 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.

При натурном обследовании колодцев вертикального дренажа в некоторых из них было обнаружено выделение газов в свободном виде, которое усиливалось при ударе пробоотборного оборудования о дно колодцев. В этих колодцах были установлены газосборные ловушки, однако, отобрать пробы газа не удалось в связи с прекращением газовыделения. Попытка отбора проб свободновыделяющихся 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 состава газов в воздухе колодцев вертикального дренажа. В составе воздуха обнаружено присутствие метана, в составе воздуха всех колодцев обнаружены углеводородные газы  $C_1$ - $C_5$  и летучие органические соединения. Максимальные концентрации летучих органических соединений отмечены в восточной части земляной плотины, что, вероятно, связано с поступлением в тело и основание земляной плотины 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 нами и обнаружена зона повышенного содержания ионов  $Fe^{2+}$  в аллювиальном водоносном горизонте. Полученные результаты, по нашему мнению, также являются подтверждением того, что в аллювиальном водоносном горизонте получила развитие глеевая геохимическая обстановка, благоприятствующая миграции водорастворенных ионов  $Fe^{2+}$ , образовавшихся при разложении железосодержащих минералов.

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 и породы 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 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 пород, и изменяющих физикомеханические показатели их прочности.

Был проведен ряд лабораторных экспериментов, которые показали, что микроорганизмы вод и грунтов аллювиального водоносного горизонта способны образовывать газы при использовании органического вещества, выщелачивать железо из грунтов, а также изменять прочностные свойства грунтов.

В целом, проведенные исследования показали, что процессы, имеющие внешние признаки суффозионных, могут и не являться таковыми: источником повышения мутности дренажных вод явился не механический вынос частиц грунта из тела и основания плотины, 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 механическую прочность грунтов;

- под действием микроорганизмов изменяется микроагрегатный и химический состав грунтов, в них происходит диспергация глинистых агрегатов, повышается гидрофильность грунтов, снижается их фильтрационная способность, прочность и модуль общей деформации;

- образуемые микроорганизмами экзометаболические продукты, проявляющие поверхностно-активные свойства, снижают прочность структурных связей в грунтах.

В связи с этим при проведении инженерно-геологических изысканий существует необходимость в исследовании поведения микроорганизмов в геологической среде и их реакции на внешние воздействия. Это позволит оценить роль микробных процессов в изменении инженерно-геологических свойств грунтов, а также прогнозировать ход инженерно-геологических процессов. В существующих нормативных документах отсутствует оценка степени влияния микробиоты грунтов на сами грунты и на используемые строительные материалы. Сложность таких оценок обусловлена тем, что степень влияния микробиоты зависит не только от количества и видового состава микроорганизмов, но и от 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 делают количественную оценку микробиоты, с точки зрения опасности для строительных материалов и сооружений, практически неразрешимой задачей. Но для принятия технических решений по защите инженерных сооружений от негативного воздействия микрофлоры грунтов и подземных вод такая оценка необходима.

Разработка единой методологии исследований в грунтах процессов, вызванных жизнедеятельностью микроорганизмов, может быть первым шагом на пути к принятию нормативных документов, так необходимых при инженерно-геологических и геоэкологических исследованиях.

### Литература

1. Болотина И.Н. Физико-химические явления с участием биотического компонента // теоретические основы инженерной геологии. Физико-химические основы. - М.: Недра, 1985.

2. Болотина И.Н., Максимович Н.Г. Изучение роли микроорганизмов подземных вод при химическом уплотнении гипсоносных пород основания плотины // Тез. докл. науч.-практ. конф. «Координация исследований на водохранилищах Камского каскада для разработки

Максимович Н. Г., Хмурчик В. Т. Теоретические и методические аспекты микробиологических исследований грунтов // Сергеевские чтения. Развитие научных идей академика Е. М. Сергеева на современном этапе. Юбилейная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения академика Е. М. Сергеева. Вып. 16. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (21 марта 2014 г.). – Москва: РУДН, 2014. – С. 62-66.

мероприятий по улучшению экологических условий в водоемах и на прилегающих территориях». - Пермь, 1984. - С. 44-45.

3. *Болотина И.Н., Сергеев Е.М.* Микробиологические исследования в инженерной геологии // Инженерная геология. - 1987. — № 5. - С. 3-17.

4. *Болотина И.Н., Воронкевич С.Д., Максимович Н.Г.* О возможности техногенных био-геохимических явлений при силикатизации гипсоносных пород // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. - 1986. - № 4. - С. 49-53.

5. *Кофф Г.Л., Кожевина И.С.* Роль микроорганизмов в изменении геологической среды // Инженерная геология. - 1981. - № 6. - С. 63-74.

6. *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.

7. *Максимович Н.Г., Меньшикова Е.А., Казакевич С.В.* Исследование возможности повышения агрессивности подземных вод при строительстве на пиритсодержащих глинистых грунтах // Мат. Межд. симп. «Инженерно-геологические проблемы урбанизированных территорий». - Екатеринбург, Аква-Пресс, 2001. - Т. 2. - С. 545-551.

8. *Радина В.В.* Роль микроорганизмов в формировании свойств грунтов и их напряженного состояния // Гидротехническое строительство. - 1973. - № 9. - С. 22-24.

9. *Bonneville S., Van Cappelen P., Behrends T.* Microbial reduction of iron (II) oxyhydroxides: effects of mineral solubility and availability // Chemical Geology. - 2004. - Vol. 212. - P. 255-268.