

УДК 624.131.1:620.193.8:556.315

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ КАК РЕЗУЛЬТАТ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МИКРООРГАНИЗМОВ (НА ПРИМЕРЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО РЕГИОНА)

© 2023 г. Р. Э. Дашко^{1,*}, А. Г. Карпенко¹, Д. Л. Колосова¹

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
21 линия Васильевского острова, 2, Санкт-Петербург, 199106 Россия

*E-mail: regda2002@mail.ru

Поступила в редакцию 28.08.2023 г.

После доработки 28.08.2023 г.

Принята к публикации 14.09.2023 г.

В краткой форме показаны становление учения о подземных микроорганизмах и использование его научных обобщений и экспериментальных данных в теории и практике инженерно-геологических и гидрогеологических исследований с применением прямых и косвенных методов, в том числе современного метагеномного анализа 16S рРНК. Установлены основные источники поступления микроорганизмов в подземное пространство Санкт-Петербурга, которые систематизированы по масштабу их воздействия и генезису. Анализ и оценка инженерно-геологических процессов как результата деятельности подземной микробиоты отражают основные аспекты, определяющие уровень безопасности освоения и использования подземного пространства мегаполиса для различных целей: проектирования, строительства и эксплуатации подземных сооружений (перегонных тоннелей метрополитена) на различных глубинах, проходки глубоких котлованов для наземного строительства и др. Результаты исследований деятельности подземных микроорганизмов дают возможность сделать вывод о необходимости расширения инженерно-геологического, гидрогеологического и инженерно-экологического изучения подземного пространства различных регионов с целью познания степени опасности деятельности подземной микробиоты и снижения числа аварийных и предаварийных ситуаций.

Ключевые слова: *подземное пространство, микробиологические исследования, источники поступления микроорганизмов, контаминация, природно-техногенные процессы, прогнозирование*

DOI: 10.31857/S086978092305003X, EDN: IGFMRС

ВВЕДЕНИЕ

Современные достижения в междисциплинарных науках дали возможность оценить значимость и необходимость всестороннего изучения подземных микроорганизмов, активность деятельности которых подтверждается на больших глубинах – до 4–5 км [18]. Их деятельность проявляется в формировании состава и состояния подземных вод, преобразовании песчано-глинистых грунтов [8, 30], развитии опасных инженерно-геологических процессов на различных глубинах, что фиксируется при освоении и использовании подземного пространства мегаполисов, крупных городов, а также при разработке полезных ископаемых [16, 21, 31]. Становление науки о деятельности подземных микроорганизмов происходило, начиная с периода активного развития микробиологии в конце XIX в. Большую роль в изучении деятельности микроорганизмов как участников геологических процессов и явлений сыграли микробиологи

и геологи, работавшие на стыке наук (С.Н. Виноградский, А.А. Иностранцев, Г.А. Надсон, В.Л. Омелянский и др.). Первые отечественные работы в связи с изучением влияния микроорганизмов на формирование осадочных отложений были опубликованы в начале XX в. [26]. В первой четверти прошлого столетия в Петрограде Б.Л. Исаченко исследовал причины разрушения кирпичной кладки стен оранжерейного комплекса тропических растений Ботанического сада и городской водонапорной башни на Шпалерной улице, деструктором которых оказались нитрифицирующие бактерии и продукты их метаболизма [15]. Им же впоследствии были начаты первые работы в СССР по вопросам коррозии бетонов гидротехнических сооружений Волховстроя и Свирьстроя в 1931 г. [14].

В 1924 г. Т.Л. Гинзбург-Карагичева доказала наличие богатого биоценоза и метаболитов на глубине свыше 1 км в пределах газонефтяных ме-

сторождений [5], а позднее, во второй половине XX в., А.Е. Крисс проанализировал влияние высоких давлений воды и пород на рост и активность микроорганизмов [18].

Большую роль в изучении геологической деятельности микроорганизмов сыграл академик В.И. Вернадский, который в первой четверти XX в. сформировал новую междисциплинарную науку – биогеохимию, введя представление о живом веществе и его роли в земной коре. Активное развитие данного направления началось в послевоенные годы и было связано с вопросами влияния микробиоты на формирование минералов и горных пород, а также месторождений полезных ископаемых, что отражено в работах В.О. Таусона [32], Б.Л. Исаченко [13]; С.И. Кузнецова, М.В. Иванова, Н.Н. Ляликовой [20]; Л.Е. Крамаренко [17] и др. Тогда же впервые рассматривалась роль микроорганизмов в преобразовании состава, состояния и свойств грунтов [27]. В 1980-х гг. школой МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством академика Е.М. Сергеева в теорию и практику инженерной геологии был внедрен ряд принципов микробиологии [3, 28].

Начиная со второй половины XX в., рядом советских ученых был сделан прорыв в изучении биокоррозии конструкционных материалов, актуальность этих исследований не потеряла своей остроты и в наши дни [2, 25, 29].

В 1996 г. на международном симпозиуме в Давосе на основании решения мирового сообщества специалистов и ученых, работающих в разных областях знаний (микробиологи, геологи, биотехнологи, биохимики, биофизики, радиобиологи и др.), была выделена самостоятельная междисциплинарная наука “Подземная микробиология” (Subsurface microbiology) [7].

На кафедре гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского горного университета первые микробиологические исследования были начаты в 1988 г. в связи с вопросами длительной устойчивости сооружений промышленной гидротехники, расположенных в водоохранной зоне р. Луга, впадающей в Балтийское море. В разрезе оснований сооружений и их примыкания с помощью посевов был выделен богатый микробиоценоз, который способствовал полному самоочищению грунтовых вод от нефтепродуктов – соляного масла. Было установлено, что деятельность подземных микроорганизмов сопровождается накоплением большого количества микробной массы в песчано-глинистых грунтах, что приводит к снижению их сопротивления сдвигу. Этот факт был использован в расчетах устойчивости дамб хвостохранилищ при подъеме отметки намыва.

С 1990-х гг. опыт, полученный на хвостохранилище, был направлен на исследование опасных

процессов, вызванных микробной деятельностью в подземном пространстве Санкт-Петербурга и в некоторых горнопромышленных регионах России [7, 9, 35]. Накопление и анализ полученных материалов полевых и лабораторных исследований на различных объектах позволили включить подземные микроорганизмы и их метаболиты в значимый компонент подземного пространства при его освоении и использовании. Такой подход дает возможность повысить научно-практический уровень прогнозирования безопасности освоения и использования подземного пространства городов и горнопромышленных регионов.

МЕТОДЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Примененные в прошлом и используемые в настоящее время микробиологические методы исследования биоценозов грунтов, подземных вод и разрушенных материалов можно разделить на косвенные и прямые. В конце XX – начале XXI вв. в практику исследований сотрудниками кафедр гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского горного университета (далее СПб Горный университет) под руководством профессора Р.Э. Дашко были внедрены косвенные методы. Они базировались на биохимическом определении микробного белка, поскольку клетки микроорганизмов и частично продукты их метаболизма, за исключением газов, спиртов и кислот, – представлены белками (энзимами) на 40–70%. Для численного определения содержания микробного белка (далее – МБ), или микробной массы (далее – ММ) применялись методы: М. Бредфорда, Т.М. Лоури и Хартри-Петерсона. Впервые метод М. Бредфорда был адаптирован для определения МБ в грунтах на кафедре грунтоведения и инженерной геологии Санкт-Петербургского государственного университета [23]. Этот метод дает наиболее низкие значения показателя МБ (ММ), поскольку для отделения биопленок от дисперсных частиц (после которого определяется величина белка в супернатанте) при центрифугировании используют 1.5 тыс. g (g – ускорение свободного падения), реже 2 тыс. g, что недостаточно для полного отделения биомассы от твердой поверхности [12]. Наиболее достоверные результаты были получены при использовании метода Хартри-Петерсона, в котором определение белка производится путем полного отделения биопленки электрофорезом.

Начиная с 2003 г., наряду с косвенными методами сотрудники кафедры гидрогеологии и инженерной геологии СПб Горного университета стали широко использоваться прямые методы определения физиологических групп и численности микроорганизмов путем посевов на питательные среды для грунтов, подземных вод и раз-

рушенных конструкционных материалов [7]. С 2018 г. профессор Р.Э. Дашко начала применять метагеномный анализ 16S рРНК, который позволяет определить таксономические группы (филы), рода и виды микроорганизмов в исследуемых пробах без их выделения и культивирования на питательных средах, тем самым получая наиболее полный состав микробиоценозов (с точностью до $10^{-6}\%$). Все прямые методы микробиологических исследований проводятся в Ресурсном центре Санкт-Петербургского государственного университета под руководством профессора, доктора биологических наук Д.Ю. Власова.

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОСТУПЛЕНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ В ПОДЗЕМНОЕ ПРОСТРАНСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Анализ проведенных исследований в XX–XXI вв. позволил выделить основные источники поступления микроорганизмов в подземное пространство мегаполиса на региональном, локальном и объектном уровнях. При этом важно отметить, что при этом была проведена и градация источников по генезису на природные и природно-техногенные.

К региональным источникам поступления аборигенных (природных) микроорганизмов, развитым повсеместно в пределах Санкт-Петербурга, относятся *болота*, занимавшие до 1703 г. около 70% площади современного города. По мере развития Санкт-Петербурга болота мощностью 2–3 м снимались, а при большей – частично снимались и засыпались песками или строительным мусором. Начиная с 1960-х гг., для подъема уровня земной поверхности на болотные образования намывались пески подводных месторождений Невской губы. В результате к настоящему времени на территории города они погребены под техногенными отложениями. Еще ранними работами было установлено, что инфильтрация болотных вод по разрезу способствует его обогащению органическими соединениями абиотического и биотического генезиса, анаэробными и факультативными микроорганизмами (аммонифицирующими, сульфатредуцирующими, железоредуцирующими, целлюлозоразлагающими, метангенерирующими, водородообразующими и денитрифицирующими бактериями), а также продуктами их метаболизма (газами, кислотами), которые способствуют снижению окислительно-восстановительного потенциала $Eh < 0$ мВ, водородного показателя $pH < 7$ и повышению величины БПК₅ в подземных водах, а также трансформации состава, состояния и свойств грунтов. Негативное воздействие на компоненты подземного пространства наблюдается до глубины более 30 м.

Грунтовые воды, имеющие повсеместное распространение в пределах города, рассматриваются как природно-техногенный источник поступления различных таксонов микроорганизмов в его подземное пространство. Их контаминация происходила при воздействии болотных вод и позднее, в период развития мегаполиса – за счет *утечек из канализационных систем* малой и средней глубины заложения [40]. Кроме того, системы водоотведения представляют собой региональный техногенный источник привноса микроорганизмов, а также органических и неорганических соединений [37, 39]. В зависимости от заложения сетей водоотведения и их состояния канализационные стоки могут оказывать негативное воздействие не только на грунтовые воды, но и на более глубокие водоносные горизонты при определенном гидродинамическом режиме [7].

Опробование грунтовых вод в конце XX–начале XXI вв. в островной части города по 64 режимным скважинам показало, что в большинстве случаев Eh характеризуется отрицательными значениями, достигая самых низких величин на Безымянном и Васильевском островах ($Eh < -127$ мВ), что указывает на преобладание глубоко восстановительной обстановки в подземной среде Санкт-Петербурга [7]. Исследование грунтовых вод в основании ряда архитектурно-исторических памятников (Исаакиевский собор, комплекс зданий Зимнего дворца, Нового Эрмитажа, Биржи и др.) с целью определения их химического состава и агрессивности по отношению к материалам подземных несущих конструкций (фундаментов) указывает на их высокую контаминированность за счет утечек из поврежденной канализационной сети города, что вызывает рост минерализации до 6–7 г/дм³ (в районе комплекса зданий Зимнего дворца). При этом отмечается повышение содержания едких щелочей (Na^+ , K^+), щелочноземельных элементов (Ca^{2+} , Mg^{2+}), хлоридов и сульфатов. Увеличение содержания Ca^{2+} и Mg^{2+} вызвано процессами выщелачивания и разрушения старинных фундаментов (постелистый бут известняка, известковые растворы кирпичной кладки).

Исследование подземных вод с помощью метагеномного анализа 16S рРНК было выполнено в районе Пески, где зафиксирован наиболее длительный период контаминации (более 500 лет) подземного пространства. Основную долю в микробиоценозе составляют анаэробные микроорганизмы, среди которых доминируют водородообразующие бактерии *Hydrogenophaga*; бактерии рода *Pseudomonas* и *Sphingomonas* обычно связаны с техногенными загрязнениями (табл. 1).

Установленное сообщество микроорганизмов способно оказывать негативное воздействие на грунты, их напряженно-деформированное состо-

Таблица 1. Результаты метагеномного анализа грунтовых вод в районе Пески (Ресурсный центр СПбГУ, 2017 г.)

Таксономы (крупные филы)	Доля в пробе, %
Bacteria, Firmicutes, Clostridia, Natranaerobiales, Anaerobranceae	14.7
Bacteria, Proteobacteria, Alphaproteobacteria, Sphingomonadales, Sphingomonadaceae, Sphingomonas	9.5
Bacteria, Proteobacteria, Betaproteobacteria, Burkholderiales, Comamonadaceae	9.3
Bacteria, Proteobacteria, Betaproteobacteria, Burkholderiales, Comamonadaceae, Hydrogenophaga	28.2
Bacteria, Proteobacteria, Gammaproteobacteria, Pseudomonadales, Pseudomonadaceae, Pseudomonas	7.1

Примечание. Таксоны в каждой строке приведены в следующем порядке: царство, фила, класс, порядок, семейство, род.

яние (далее – НДС), а также на конструкционные материалы.

Интересные результаты метагеномного анализа 16S рРНК были получены при исследовании проб грунтовых вод, отобранных в основании Большого драматического театра им. Г.А. Товстоногова (далее – БДТ) в ходе проведения экспертизы причин разрушения гидроизоляции и повышения проницаемости бетонов при углублении подвалов для создания дополнительных помещений. Результаты микробиологических исследований грунтовых вод дают своеобразную картину таксонов микроорганизмов (табл. 2).

Следует отметить, что грунтовые воды в период проведения экспертизы имели рН = 12.25, определенного *in situ* с помощью селективных электродов. В процессе отбора проб бетона при бурении с целью исследования его соответствия заявленной марке по водонепроницаемости был отмечен выброс газоводопесчаной смеси с характерным запахом сероводорода H_2S . Однако известно, что сульфатредуцирующие бактерии функционируют в диапазоне рН от 3–4 до 10. Микробиологические исследования не подтвердили их наличие в грунтовых водах. Однако около 1/3 от общего содержания филлов составляют таксоны Dethiobacteria, способные в сильнощелочных условиях продуцировать агрессивный по отношению к бетонам и металлам H_2S . Бактерии группы Babeliae (более 14%) характерны для торфяных

болот (данная территория до основания Санкт-Петербурга была заболочена), мест с высокой концентрацией соединений серы, а также стоков. Следовательно, биоценоз грунтовых вод богат факультативными и анаэробными таксонами микроорганизмов, выступающими биодеструкторами конструкционных материалов.

В 2018 г. после проведения микробиологических исследований к региональным источникам поступления микроорганизмов в подземное пространство города был отнесен *нижнекотлинский водоносный горизонт* – основной в составе вендского водоносного комплекса. Глубина залегания его кровли варьируется от 100 до 130 м. Горизонт характеризуется высокими напорами (>100 м). В некоторых районах Санкт-Петербурга, например, в Приморском районе, его пьезометрическая поверхность приближается к дневной поверхности, в остальных – отмечается на глубине 5–10 м. Исследование химического и микробиологического составов нижнекотлинского водоносного горизонта проводилось на пробах воды, отобранных из эксплуатационной скважины на территории Полостровского завода по разливу минеральных вод, имеющем 3 зоны санитарной охраны, что гарантирует отсутствие загрязнения подземных вод и устойчивость их химического состава. Воды по составу хлоридные натриевые, сухой остаток достигает 4.93 г/дм³, среди микрокомпонентов присутствуют бальнеологические элементы (Br, F, Se, V), повышающие их лечебные свойства. При отборе пробы воды с помощью селективных электродов были замерены Eh = –35 мВ, а также рН = 7.4. Содержания органических соединений: перманганатная окисляемость (далее – ПО) 7.1 мгО₂/дм³, ХПК = 61 мгО₂/дм³ и БПК₅ = 6.3 мгО₂/дм³. Стоит отметить, что о наличии восстановительных условий в водоносном горизонте также указывал слабый запах H_2S , что имеет принципиальное значение при оценке содержания таксонов микроорганизмов. Наличие достаточно богатого микробиоценоза подтверждено метагеномным анализом 16S рРНК (табл. 3).

Весьма интересные результаты по содержанию таксонов микроорганизмов в нижнекотлинском

Таблица 2. Фрагмент результатов метагеномного анализа грунтовых вод в основании БДТ (Ресурсный центр СПбГУ, 2021 г.)

Таксономы (крупные филы)	Доля в пробе, %
Proteobacteria	32.6
Bacteroidia	5.4
Clostridia	6.6
Babeliae	14.6
Dethiobacteria	32.0
Unclassified	1.6
Thermoanaerobacteria	5.6

Таблица 3. Результаты метагеномного анализа образцов вод вендского водоносного комплекса (Ресурсный центр СПбГУ, 2021 г.)

Тахоному (крупные филы)	Доля в пробе, %	Тахоному (крупные филы)	Доля в пробе, %
Proteobacteria	82.39	Omnitrophia	0.75
Campylobacteria	6.15	<i>Desulfovibrionia</i>	0.47
Сyanobacteria	3.93	Unclassified	0.39
Bacteroidia	1.71	Poluanguia	0.35
Actinobacteria	0.98	Clostridia	0.29
Bacilli	0.96	<i>Desulfotomaculia</i>	0.18
<i>Desulfobulbia</i>	0.91	<i>Desulfobacteria</i>	0.16

Примечание. Курсивом отмечены сульфатредуцирующие бактерии, восстанавливающие сульфаты до сульфидов с конечным продуктом реакции H_2S .

водоносном горизонте показали посева на воду и взвеси [8]. Численность микробиоты в воде на 2–3 порядка ниже, чем на твердых частицах взвеси, что объясняется наличием у микроорганизмов приспособительной функции существования и переноса, как правило, на твердых поверхностях. Основные таксоны микроорганизмов, выявленные при посевах: сульфатредуцирующие, железоредуцирующие, восстанавливающие Fe^0 и Fe^{3+} до Fe^{2+} ; аммонифицирующие, водородные, силикатные, в небольшом количестве – тионовые и нитрифицирующие бактерии. Содержание этих форм в воде варьирует в пределах 10^4 – 10^6 клеток/мл; на твердых поверхностях – достигает 10^7 – 10^8 клеток/г [8].

Еще ранее, исследованиями под руководством Р.Э. Дашко было установлено, что под действием высоконапорных вод нижнекотлинского водоносного горизонта наблюдается разрушение несущих обделок перегонных тоннелей метрополитена, более 70% которых проложено в верхнекотлинских глинах верхнего венда. Эти глины представляют собой трещиновато-блочную среду, обладающую водопроницаемостью, которая зависит от интенсивности ее трещиноватости и повышается в зонах тектонических разломов [8, 7]. Кроме того, по данным геотехнического мониторинга, воды этого горизонта в настоящее время взаимодействуют с фундаментами комплекса зданий Лахта-центр [33].

В качестве локальных природных источников поступления микроорганизмов в подземное пространство Санкт-Петербурга можно выделить *межморенные водоносные горизонты: верхний (полюстровский) и нижний*, а также *межморенные миктулинские отложения*.

Полюстровский водоносный горизонт развит на севере и северо-востоке Санкт-Петербурга. Водовмещающими грунтами выступают озерно-ледниковые и флювиогляциальные пески, залегающие между московской и ошашковской моренами. Воды этого горизонта характеризуются как

напорные. В зависимости от глубины залегания величина напоров варьируется от 2 до 38 м, при этом в некоторых зонах при бурении скважин наблюдается самоизлив вод горизонта либо образование грифонов на земной поверхности. Результаты исследования проб воды полюстровского (верхнего межморенного) горизонта, отобранных на Полюстровском заводе, показали, что по составу воды гидрокарбонатные кальциево-натриевые. Величина сухого остатка составляет 468 мг/дм³. Показатели содержания органических соединений: ХПК – 29.0 мгО₂/дм³, ПО – 3.9 мгО₂/дм³, БПК₅ – 3.0 мгО₂/дм³. При отборе проб в полевых условиях с помощью селективных электродов были измерены физико-химические показатели: Eh = –25 мВ и pH = 6.9. На восстановительную обстановку в подземных водах при отборе проб также указывал характерный запах H₂S, выступающий индикатором присутствия сульфатредуцирующих бактерий, наличие которых подтверждено результатами метагеномного анализа 16S рРНК (табл. 4).

Среди выявленных микроорганизмов преобладают факультативно-анаэробные бактерии с различными типами метаболизма. В пробе полюстровского горизонта значительную часть микробиоты составляют железовосстанавливающие бактерии – факультативные анаэробы, которые способны восстанавливать Fe^{3+} до Fe^{2+} , а также развиваться в анаэробных условиях с использованием органических компонентов широкого спектра (ацетата, лактата, пропионата, бензотата и др.). Очевидно, что данные бактерии в бескислородной обстановке могут быть весьма опасны по отношению к железосодержащим конструкциям ввиду их способности восстанавливать железо до формы Fe^{2+} (соединения восстановленного железа растворимы). Наряду с железовосстанавливающими, в полюстровском горизонте в значительном количестве отмечены сульфатредуцирующие и железooksисляющие бактерии. В целом данные метагеномного анализа 16S рРНК

Таблица 4. Результаты метагеномного анализа образцов вод полостровского водоносного горизонта (Ресурсный центр СПбГУ, 2021 г.)

Тахоному (крупные филы)	Доля в пробе, %	Тахоному (крупные филы)	Доля в пробе, %
Proteobacteria	79.07	Gracilibacteria	0.54
Bacteroidia	6.91	Parcubacteria	0.47
<i>Desulfobacteria</i>	4.85	<i>Desulfovibrionia</i>	0.43
Ignavibacteria	1.70	Acidobacteria	0.40
<i>Desulfobulbia</i>	1.41	<i>Desulfirobacteria</i>	0.22
Vampirivibrionia	0.82	Syntrophia	0.22
Dehalococcoidia	0.58	Spirochaetia	0.21
Unclassified	0.56	Прочие (<0.2%)	1.61

Примечание. Курсивом отмечены сульфатредуцирующие бактерии, восстанавливающие сульфаты до сульфидов с конечным продуктом реакции H_2S .

указывают на существование довольно сложного по составу и структуре микробного сообщества, которое может играть заметную роль в процессах биокоррозии подземных конструктивных материалов.

Ввиду высоких напоров верхнего межморенного горизонта при восходящем перетекании вод возможно обогащение вышележащей осташковской морены аборигенными микроорганизмами, что необходимо учитывать при устройстве подземных конструкций и сооружений, особенно выполненных из бетонов и железобетонов, а также металлов.

Нижний межморенный водоносный горизонт распространен в северной и юго-восточной частях Санкт-Петербурга. Воды этого горизонта характеризуются как высоконапорные (величина напоров составляет 20–70 м), что необходимо учитывать при подземном строительстве, в первую очередь, при эксплуатации перегонных тоннелей “Площадь Мужества-Лесная” в связи с возможным развитием биокоррозии несущих обделок. Для определения химического состава нижнего межморенного водоносного горизонта и его микробиологических показателей была отобрана проба из самоизливающейся режимной

Таблица 5. Результаты метагеномного анализа проб нижнего межморенного водоносного горизонта (Ресурсный центр СПбГУ, 2022 г.)

Тахоному (крупные филы)	Доля в пробе, %
<i>Gamma</i> proteobacteria, из них:	75
Thiotrichaceae	7
Pelomonas	3
Massilia	3
Acinetobacter	<1
<i>Alpha</i> proteobacteria	25

Примечание. Курсивом отмечены классы бактерий.

скважины (ул. Байконурская, 12), оборудованной для общего потребления населением в виде галереи. По составу воды пресные гидрокарбонатные кальциевые, сухой остаток составляет 164.0 мг/дм^3 . Показатели содержания органических соединений характеризуются низкими значениями: ХПК = $20.0 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$, ПО = $3.6 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$, БПК₅ = $2.3 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$. Кроме того, *in situ* были замерены pH = 8.0 и Eh = –161.2 мВ, что почти в 5 раз ниже, чем в глубоком нижнекотлинском горизонте. Несмотря на столь уникальные условия для развития анаэробных таксонов микроорганизмов, метагеномный анализ 16S рРНК иллюстрирует своеобразие микробиоценоза (табл. 5).

Хотя нижний межморенный водоносный горизонт из-за высоких напоров имеет высокую защищенность от техногенных воздействий, анализ результатов метагеномного анализа 16S рРНК позволяет утверждать обратное. Согласно его результатам, отмечается присутствие даже психрофильных бактерий, которые не характерны для водоносных горизонтов вне зон многолетнемерзлых пород. Аномалии химического состава подземных вод и таксонов микроорганизмов служат показателем высокой техногенной нагрузки на водоносный горизонт. В 1970-х гг. именно в этом горизонте проходилась перегонный тоннель в массиве песков, замороженном с помощью рассольного метода. В 1974 г. произошла авария – прорыв водонасыщенного песка через льдогрунтовое ограждение, что привело к затоплению пройденной выработки. На дневной поверхности образовался глубокий провал, сопровождавшийся разрывом подземных коммуникаций, поступлением загрязненных грунтовых вод и канализационных стоков в подземное пространство. Для ликвидации аварии и проведения дальнейших горнопроходческих работ было выполнено замораживание водонасыщенной грунтовой толщи жидким азотом [4]. Перед этим были сделаны попытки подъема дневной поверхности путем на-



Рис. 1. Процесс утилизации органического вещества микроорганизмами [36].

гнетания воды. Отсюда вполне объяснимо появление психрофильных групп и контаминантов, определяющих генезис микроорганизмов, характерных для зон техногенных загрязнений.

Следующий этап техногенного воздействия на данный водоносный горизонт был в 1994–1995 гг., когда полностью были разрушены гидроизоляция, чугунные тубинги за счет температурных напряжений в замороженной жидким азотом грунтовой толще и частично железобетонная обделка перегонных тоннелей. В результате в перегонный тоннель началось поступление подземных вод, а затем, по мере развития трещин в обделке, и водонасыщенных песков. Под действием гравитационных сил продолжались деформации прогиба тоннеля и обогащение подземных вод продуктами разрушения бетонов и металлов. Впоследствии тоннель был обрезан в местах его выхода из глин венда в зону погребенной долины. В настоящее время эта часть тоннеля находится в подошве водоносного горизонта, продолжая взаимодействовать с водами нижнего межморенного горизонта, тем самым влияя на специфику формирования его биохимических, физико-химических и химических характеристик. Стоит отметить, что опробуемая скважина расположена в 6 км от станции метро “Площадь Мужества”, что дает основание утверждать: результаты химического и микробиологического исследований данного горизонта представляют собой отзвук тех драматических событий, которые развернулись в подземном пространстве в Калининском районе Санкт-Петербурга в 1974–1975 и 1994–1995 гг. Кроме того, объяснимо столь низкое снижение Eh подземных вод: длительное существование льдогрунтового целика с различными технологиями замораживания обеспечивало отсутствие водообмена.

Межморенные микулинские отложения, обогащенные битуминозной органикой (до 20%), распространены преимущественно в восточном, юго-восточном и частично в южном районах Санкт-Петербурга, а также в северных пригородах (Мурино), где залегают на глубинах до 35 м от земной поверхности. Микулинские отложения рассматриваются как природный источник поступления метана (CH₄), а также небольшого количества молекулярного азота (N₂) и диоксида углерода (CO₂) во вмещающие их породы и подземные воды. С потоком газов переносятся анаэробные формы микроорганизмов – метангенерирующие, денитрифицирующие, а при загрязнении микулинских

отложений – и сульфатредуцирующие бактерии. Метаболизм микробиоты этих образований направлен на усвоение и использование битумной органики, что накладывает определенные ограничения на применение материалов, содержащих органические соединения, при проектировании подземных сооружений в районах развития микулинских отложений [7].

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Процессы, развивающиеся в подземном пространстве мегаполиса, вызваны как деятельностью самих микроорганизмов, так и их метаболитами. Жизнедеятельность гетеротрофных подземных микроорганизмов направлена на потребление органических соединений с длиной органической цепи C₁₇ – C₂₂, реже до C₂₄. Полициклические образования медленно утилизируются в условиях анаэробной среды и повышенной температуры, комфортной для мезофильных групп микроорганизмов (t = 29–35°C). Еще ранее было установлено, что биохимическая утилизация органических веществ может быть полной (до образования газов) и неполной (до органических кислот) (рис. 1).

Полная утилизация органических соединений гетеротрофными микроорганизмами протекает в несколько стадий с упрощением структурного строения конечного продукта, при этом каждый газ биохимического генезиса формируется из определенной кислоты.

В практике современных инженерных исследований определение газовой составляющей ведется только в процессе инженерно-экологических изысканий (СП 502.1325800.2021). Газовые съемки ограничиваются весьма небольшой глубиной до 0.8 м в шурфах, а в скважинах при наличии техногенных грунтов на всю их мощность с заглублением в подстилающие отложения на 0.5–1.0 м [1, 22]. В процессе газохроматографического анализа, согласно вышеназванному нормативному документу, определяется содержание CH₄, CO₂, молекулярного кислорода O₂, водорода H₂ и азота N₂, а наличие H₂S (наиболее опасного газа по отношению к конструкционным материалам) проводится только по требованию заказчика. Стоит отметить, что CH₄, H₂ и N₂ – газы, характерные только для анаэробных условий, CO₂ – продукт дыхания микроорганизмов, поэтому O₂ может присутствовать только в незначительных ко-



Рис. 2. Макропоры в образцах тиксотропных супесей ледникового генезиса, залегающих над микулинскими газогенерирующими отложениями (фото А.М. Лебедевой).

личествах, его определение не отвечает физико-химическим условиям генерации CH_4 , H_2 , N_2 и H_2S .

По результатам выполненных нами микробиологических исследований, в том числе метагеномного анализа, по всей глубине осадочной толщи подземного пространства Санкт-Петербурга до глубин свыше 100 м (воды глубокого нижнекотлинского водоносного горизонта) повсеместно обнаружены газогенерирующие таксоны микроорганизмов. Следовательно, при решении задач освоения и использования подземного пространства необходимо определение газовой составляющей в зависимости от глубины положения сооружения.

Для прогнозирования опасных последствий биохимического газообразования необходимо учитывать растворимость газов. В пределах рассматриваемых глубин к малорастворимым газам относят CH_4 , H_2 и N_2 , к среднерастворимым — CO_2 , а к хорошо растворимым — H_2S и аммиак (NH_3). Депонирование малорастворимых газов приводит к изменению НДС в грунтовых толщах с малой газопроницаемостью, поскольку пузырьки этих газов сосредоточены в поровом пространстве песчано-глинистых грунтов. Малый размер пор определяет величину диаметра газовых пузырьков и значение их поверхностного натяжения. Согласно закону Лапласа и определениям газодинамики, такие пузырьки относятся к твердым несжимаемым [44]. Гидрофобные пузырьки газа не сорбируются на гидрофильной поверхности твердых частиц, и в процессе их накопления в грунтах наблюдается повышение газодинамического давления. Согласно проведенным замерам в подземном пространстве Санкт-Петербурга, его величина в микулинских отложениях достигала 3 атм. При проходке подземных выработок в таких толщах может наблюдаться выброс водогазонасыщенной смеси, а при наличии CH_4 — самовозгорание газов.

В результате диссипации газов водонасыщенные грунты превращаются в водогазонасыщенные, что приводит к их разуплотнению и появлению макропор в глинистых грунтах (рис. 2). Как уже отмечалось ранее, в газовом потоке происходит перенос микроорганизмов и продуктов их метаболизма, приводящего к вторичному обогащению микробиотой подстилающих и перекрывающих толщ грунтов.

Присутствие газовой составляющей в глинистых грунтах вызывает изменение характера перераспределения давления в тонкодисперсных отложениях. Еще ранее профессор Ю.К. Зарецкий обосновал, что при степени водонасыщения грунтов (S_r) менее 0.95, поровое давление в них не возникает, и все деформации грунтов происходят только за счет проявления свойств ползучести скелета [11].

Изменение НДС толщ при депонировании либо диссипации малорастворимых газов вызывает большие и неравномерные деформации разных знаков перегонных тоннелей Петербургского метрополитена, в кровле которых прослеживаются газогенерирующие микулинские отложения. Анализ деформаций тоннелей дал возможность установить закономерности их развития: 1) подъемы перегонного тоннеля в результате депонирования малорастворимых газов (CH_4 , N_2); 2) оседание, вплоть до просадок, в результате диссипации газов в водонасыщенных дисперсных грунтах (рис. 3).

Средне- и хорошо растворимые газы способствуют преобразованию физико-химических характеристик подземных вод (изменению кислотности среды), а также формированию их агрессивности по отношению к конструкционным материалам.

Расселение микроорганизмов в грунтах необходимо рассматривать в зависимости от степени их литификации. В отложениях малой и частично

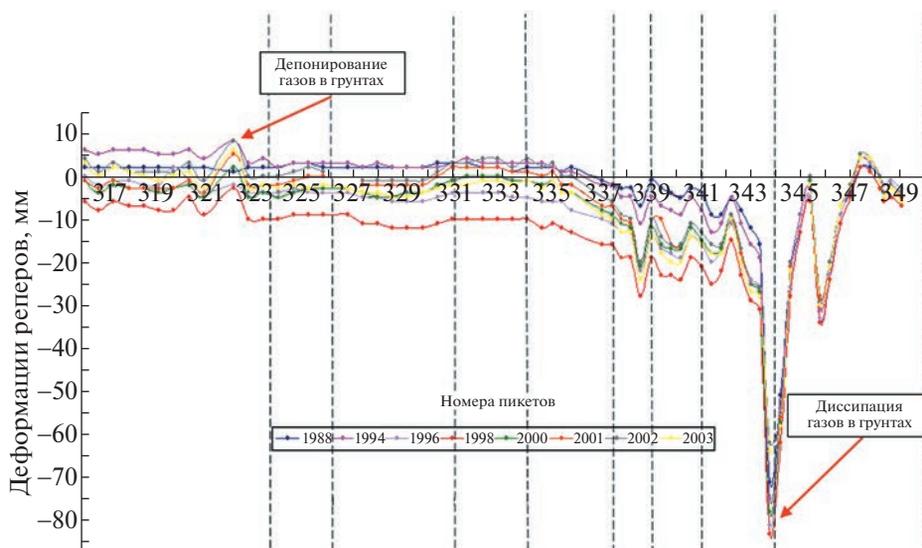


Рис. 3. Развитие деформаций подъема и оседания по трассе перегонного тоннеля (по данным “Ленметрогипротранс”, ТОИС).

средней степени уплотнения расселение микроорганизмов происходит в поровом пространстве с образованием биопленок вокруг твердых частиц [24]. В литифицированных трещиновато-блочных грунтах микроорганизмы расселяются по микро- и макротрещинам: величина ММ в трещинах нижнекембрийских синих глин составила 70 мкг/г, а в плотных блоках — только 10 мкг/г, что было на грани точности определения данного показателя по методу М. Бредфорда [7].

Наиболее негативное воздействие оказывают микроорганизмы на состояние и свойства песков, а также некоторых плотных глинистых грунтов — моренных отложений, которые рассматриваются в разрезе Санкт-Петербурга как надежный несущий горизонт для свайных фундаментов. Формирование биопленок на твердых частицах водонасыщенных песков способствует снижению угла внутреннего трения (ϕ), и при отсутствии сцепления (c) наблюдается их постепенный переход в состояние тяжелой жидкости (плывуна). При наличии твердых пузырьков малорастворимых газов, действующих как шарикоподшипники, ϕ песков снижается до нулевых значений. В таких песках статическое зондирование показывает минимальные значения лобового сопротивления.

Жилые и административные здания, возведенные на свайных фундаментах, несущим горизонтом которых служат моренные отложения, испытывают длительные и неравномерные осадки в течение 10 лет и более [42]. Специальные исследования показали, что глинистые морены в восстановительных условиях, залегающие под более молодыми четвертичными отложениями, а также под болотами и хозяйственно-бытовыми свалками,

характеризуются наличием большой численности анаэробных микроорганизмов. Формирование биопленок, а также редукция цементирующих соединений Fe^{3+} приводит к преобразованию структурных связей, что способствует снижению сцепления до 0.04 МПа и менее, а ϕ до $5-7^\circ$. По результатам обратных расчетов модуль общей деформации (E_0) таких морен составляет 3 МПа и менее. Следовательно, подобные морены должны рассматриваться как квазипластичная среда (рис. 4) [7].

Морена, залегающая у дневной поверхности в аэробных условиях, характеризуется высокими ϕ ($15-25^\circ$ и более), а сцепление обычно превышает 0.08 МПа за счет ее цементации гидроксидами железа [7].

Биокоррозия конструкционных материалов — бетонов, железобетонов, металлов, чугунов и др. протекает под влиянием самих микроорганизмов в биопленках на поверхности конструкций и их метаболитов: энзимов, кислот и газов [19, 41].

Как уже отмечалось выше, отрицательные значения Eh подземной среды определяют наличие анаэробных форм микроорганизмов, из них наиболее опасны сульфатредуцирующие, генерирующие H_2S , диссоциация которого в водной среде происходит согласно уравнению [7]:



Накопление H^+ формирует кислую среду, способствующую разрушению гидроксидов кальция и магния в составе цементов, в результате чего наблюдается рост объема пор в бетонах. Кроме того, атомарный водород в силу исключительно малых размеров способен проникать в кристаллическую решетку металла на глубину 30–40 мкм и вступать



Рис. 4. Характер разрушения образцов ошашковской морены в условиях возможности их бокового расширения, отобранных с глубины: а – 16.0–16.4 м; б – 17.8–18.0 м (фото из архива Р.Э. Дашко).

с ним в реакцию с образованием гидридов Me_mH_n , что способствует увеличению объема и разуплотнению поверхностного слоя конструкций [6]. Природа разрушения металлических конструкций под воздействием H_2 (продукта деятельности водородообразующих бактерий) аналогична развитию процесса при накоплении атомарного водорода. Такой процесс называется наводороживанием металлов: он способствует повышению их хрупкости и преждевременному разрушению конструкций [38, 43]. Чугунные конструкции (тюбинги перегонных тоннелей метрополитена) разрушаются под действием железоредуцирующих бактерий, которые переводят железо из Fe^0 в Fe^{2+} с последующим его выносом из обделки. В результате наблюдается процесс графитизации чугуна, сопровождающийся его расслоением и высокой хрупкостью.

Как было показано на рис. 1, утилизация органического вещества анаэробными микроорганизмами приводит к образованию более чем 150 органических кислот, которые активно понижают величину рН подземных вод до 4 и менее и создают условия для коррозии (утончения) металлических конструкций, а также развития питтинга [7].

В аэробных условиях в подземном пространстве активно действуют тионовые, нитрифицирующие и железooksисляющие бактерии. Тионовые таксоны, вырабатывающие серную кислоту, приводят к развитию сульфатной коррозии бетонов при формировании этtringита ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$), генерации кристаллизационного давления за счет его образования более 10 МПа и последующей дезинтеграции бетона [10, 34]. Нитрифицирующие бактерии создают агрессивные для металлов и цементов кислые среды при действии азотной кислоты.

Железобактерии поселяются на стенках увлажненных металлических конструкций с об-

разованием слизистых скоплений. В сформированной железобактериями среде наблюдаются разуплотнение и “вспучивание” металла с формированием гидроксидов железа [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показана роль отечественных специалистов в становлении и развитии междисциплинарной науки – подземной микробиологии. Отражены основные направления деятельности известных ученых: В.И. Вернадского, Г.А. Надсона, Б.Л. Исаченко и других исследователей, которые в своих работах показали важность и необходимость научно-практического изучения деятельности микроорганизмов в различных областях геологии. Подчеркнуто пионерное значение проведения таких исследований московской школой инженерной геологии под руководством академика Е.М. Сергеева. Продемонстрированы результаты применения и внедрения микробиологических методов и методик при исследовании длительной устойчивости и эксплуатационной надежности различных объектов в подземном пространстве Санкт-Петербурга.

2. Изучены основные источники поступления микроорганизмов в подземное пространство Санкт-Петербурга. Среди региональных источников первостепенное значение имеют болота, влияние которых прослеживается на глубину до 30 м и более за счет переноса микроорганизмов, метаболитов, а также абиотических органических компонентов при нисходящей инфильтрации болотных вод. Впервые установлено, что глубокие и хорошо защищенные водоносные горизонты служат источником поступления подземной микробиоты. К региональным источникам микроорганизмов в подземное пространство относятся грунтовые воды, повсеместно контаминированные утечками из систем водоотведения неглубо-

кого заложения. Охарактеризованы локальные источники поступления микроорганизмов, среди которых принципиальное значение имеют межморенные микулинские газогенерирующие песчано-глинистые битуминозные отложения. Показано, что при проходке и эксплуатации подземных сооружений в микулинских отложениях и в грунтах, подстилающих и перекрывающих их, наблюдается активная биокоррозия несущих обделок. К локальным источникам поступления микробиоты в подземную среду города также отнесены верхний (полуостровский) и нижний межморенные водоносные горизонты.

3. Проанализированы наиболее опасные инженерно-геологические процессы в подземном пространстве Санкт-Петербурга, которые развиваются под воздействием различных таксонов микроорганизмов. Особое внимание уделено гетеротрофным анаэробным формам, генерирующим биохимические газы. Депонирование малорастворимых газов оказывает влияние на формирование напряженно-деформированного состояния грунтовых толщ. При диссипации таких газов (CH_4 , H_2 , N_2) водонасыщенные пески переходят в состояние пльвунов, а глинистые грунты – в квазипластичные разности. Накопление микробной массы, состоящей из живых и мертвых клеток, а также продуктов метаболизма приводит к формированию биопленок вокруг минеральных зерен и последующей негативной трансформации прочности и деформационной способности песчано-глинистых отложений. Среди опасных инженерно-геологических процессов отмечена биокоррозия конструкционных материалов, протекающая за счет метаболитов (газов, кислот, энзимов) и непосредственной деятельности микроорганизмов, образующих биопленки на поверхности подземных конструкций. Особенно опасен для подземных конструкций сероводород.

Проведенные исследования деятельности микроорганизмов в подземной среде Санкт-Петербурга, а также на других объектах подтверждают необходимость включения в нормативные документы по инженерно-геологическим исследованиям изучение деятельности подземной микробиоты с целью повышения безопасности освоения и использования подземного пространства городов и горно-промышленных регионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абелев М.Ю., Бахронов Р.Р., Каралли Д.Л.* Особенности устройства оснований зданий на газогенерирующих насыпных грунтах // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 7. С. 26–31. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.07.26-31>
2. *Андреюк Е.И., Билай В.И., Коваль Э.З.* и др. *Микробная коррозия и ее возбудители*. Киев: Наук. думка, 1980. 287 с.
3. *Болотина И.Н., Сергеев Е.М.* Микробиологические исследования в инженерной геологии // *Инженерная геология*. 1987. № 5. С. 3–17.
4. *Волохов Е.М., Мукминова Д.З.* Оценка деформаций при строительстве эскалаторных тоннелей метрополитена способом искусственного замораживания грунтов для стадии формирования ледопородного ограждения // *Записки Горного института*. 2021. Т. 252. С. 826–839. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.5>
5. *Гинзбург-Карагичева Т.Л.* Микробиологические очерки: 1. Нефтяные микробы и возбуждаемые ими биохимические процессы. 2. О бесцветных и пурпурных серобактериях. М., Л.: Гос. науч.-техн. нефт. изд-во, 1932. 96 с.
6. *Голдобина Л.А., Орлов П.С.* Анализ причин коррозионных разрушений подземных трубопроводов и новые решения повышения стойкости стали к коррозии // *Записки Горного института*. 2016. Т. 219. С. 459. <https://doi.org/10.18454/pmi.2016.3.459>
7. *Дашко Р.Э., Власов Д.Ю., Шидловская А.В.* Геотехника и подземная микробиота. С-Пб.: ПИ Геореконструкция, 2014. 279 с.
8. *Дашко Р.Э., Лохматиков Г.А.* Верхнекотлинские глины Санкт-Петербургского региона как основание и среда уникальных сооружений: инженерно-геологический и геотехнический анализ // *Записки Горного института*. 2022. Т. 254. С. 180–190. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.13>
9. *Дашко Р.Э., Романов И.С.* Прогнозирование горно-геологических процессов на основе анализа подземного пространства рудника Купол как многокомпонентной системы (Чукотский автономный округ, Анадырский р-н) // *Записки Горного института*. 2021. Т. 247. С. 20–32. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.3>
10. *Духанина У.Н.* Влияние бактериальных микроорганизмов на развитие биокоррозии бетона // *Вестник науки*. 2023. Т. 5. № 6 (63). С. 472–476.
11. *Зарецкий Ю.К.* Теория консолидации грунтов. М.: Наука, 1967. 270 с.
12. *Звягинцев Д.Г.* Взаимодействие микроорганизмов с твердыми поверхностями. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. 176 с.
13. *Исаченко Б.Л.* Геологическая деятельность микробов // *Природа*. 1950. № 8. С. 34–37.
14. *Исаченко Б.Л.* О коррозии бетонов. Избранные труды. 1951. Т II. С. 254–256.
15. *Исаченко Б.Л.* О нитрификации на стенах и о разрушении вследствие этого кирпича. Избранные труды. 1951. Т. I. С. 101–105.
16. *Колотова О.В., Могилевская И.В.* Процессы микробного биоповреждения в подземных горных выработках // *Известия Тульского государственного университета. Сер. Науки о Земле*. 2020. № 2. С. 44–66.
17. *Крамаренко Л.Е.* Геохимическое и поисковое значение микроорганизмов подземных вод. Л.: Недра, 1983. 181 с.
18. *Криси А.Е.* Жизненные процессы и гидростатическое давление. М.: Наука, 1973. 272 с.

19. Кудина А.В., Сокоров И.О. Коррозия-биотехническая система разрушения технических объектов, снижающая их качество и надежность // Наука и техника. 2020. № 6. С. 512–520.
<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-512-520>
20. Кузнецов С.И. Введение в геологическую микробиологию. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1962. 239 с.
21. Куликов А.А., Харламова Т.А., Хабарова Е.И. К вопросу оценки влияния микробиологических биоценозов на геологические и геотехнические риски горных предприятий // Уголь. 2022. № 4. С. 67–71.
<https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-4-67-71>
22. Куликова Н.В., Данильев С.М., Ефимова Н.Н. и др. Моделирование данных сейсмомографии и электротомографии для песчано-глинистого разреза с наличием приповерхностных скоплений газа // Мониторинг. Наука и технологии. 2020. № 2 (44). С. 26–30.
<https://doi.org/10.25714/MNT.2020.44.004>
23. Ларионов А.К., Нижерадзе Т.Н., Лаздовская М.А. Выявление природы и степени оглеености глинистых грунтов как результат жизнедеятельности микроорганизмов // Вестник ЛГУ. Сер. 7. 1987. № 4 (№ 28). С. 35–41.
24. Максимович Н.Г., Деменев А.Д., Хмурчик В.Т. Трансформация минерального состава дисперсного грунта в условиях микробиологического воздействия // Вестник Пермского университета. Сер. Геология. 2021. Т. 20. № 1. С. 24–32.
<https://doi.org/10.17072/psu.geol.20.1.24>
25. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н. и др. Коррозия бетона и железобетона, Методы их защиты. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
26. Надсон Г.А. Микроорганизмы, как геологические деятели: О сероводородном брожении в Вейсовом соляном озере и об участии микроорганизмов в образовании черного ила (лечебной грязи). С-Пб.: Тип. П.П. Сойкина, 1903. 98 с.
27. Радина В.В. Патент “Способ закрепления пльвунов”. Заявлено 29.12.1967 (№ 1207196/29–14). Опубликовано 24.05.1972. Бюллетень № 17.
28. Роот П.Э., Хлебникова Г.М., Болотина И.Н. и др. Численность и роль микроорганизмов в грунтах // Инженерная геология. 1982. № 6. С. 72–78.
29. Рубенчик Л.И. Микроорганизмы как фактор коррозии бетонов и металлов. Киев: Изд-во Акад. наук Укр. ССР, 1950. 65 с.
30. Созина И.Д., Данилов А.С. Микробиологическая ремедиация нефтезагрязненных почв // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 297–312.
<https://doi.org/10.31897/PMI.2023.8>
31. Сторожева М.Е., Денисова Я.В. Биокоррозия подземных сооружений: основные причины и защита конструкций // Ученые Записки Сахалинского государственного университета. 2020. № 15–16. С. 109–113.
32. Таусон В.О. Великие дела маленьких существ. М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР в М., 1948. 116 с.
33. Травиш В.И., Шулятьев О.А., Шулятьев С.О. и др. Анализ результатов геотехнического мониторинга башни “Лахта Центр” // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2019. № 2. С. 15–21.
34. Bryukhanov A.L., Vlasov D.Y., Maiorova M.A., et al. The Role of Microorganisms in the Destruction of Concrete and Reinforced Concrete Structures // Power Technology and Engineering. 2021. V. 54. № 5. P. 609–614.
<https://doi.org/10.1007/s10749-020-01260-5>
35. Dashko R.E., Vlasov D.Yu., Voronov A.S. Negative impact of microorganisms on multicomponent underground space of St. Petersburg: engineering, geological and geotechnical aspects // Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. V. 90. № 9001.
<https://doi.org/10.18720/CUBS.90.1>
36. Fonken G.S., Johnson R.A. Chemical oxidations with microorganisms. New York, M. Dekker, 1972, 292 p.
37. Guo B., Liu C., Gibson C., Frigon D. Wastewater microbial community structure and functional traits change over short timescales // Science of The Total Environment. 2019. V. 662. P. 779–785.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.207>
38. Lahme S., Mand J., Longwell J., et al. Severe corrosion of carbon steel in oil field produced water can be linked to methanogenic archaea containing a special type of [NiFe] hydrogenase // Applied and Environmental Microbiology. 2021. V. 87. № 3. P. e01819–20.
<https://doi.org/10.1128/AEM.01819-20>
39. LaMartina E.L., Mohaimani A.A., Newton R.J. Urban wastewater bacterial communities assemble into seasonal steady states // Microbiome. 2021. V. 9. Iss. 1. P. 1–13.
<https://doi.org/10.1186/s40168-021-01038-5>
40. Lebedeva Y., Kotiukov P., Lange I. Study of the Geo-Ecological State of Groundwater of Metropolitan Areas under the Conditions of Intensive Contamination Thereof // J. of Ecological Engineering. 2020. V. 21. Iss. 2. P. 157–165.
<https://doi.org/10.12911/22998993/116322>
41. Little B.J., Blackwood D.J., Hinks J., et al. Microbially influenced corrosion – Any progress? // Corrosion Science. 2020. V. 170. P. 108641.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108641>
42. Loseva E., Osokin A., Mironov D., et al. Specific features of the construction and quality control of pile foundations in engineering and geological conditions of Saint Petersburg // Architecture and Engineering. 2020. V. 5. № 2. P. 38–45.
<https://doi.org/10.23968/2500-0055-2020-5-2-38-45>
43. Narenkumar J., AlSalhi M.S., Prakash A.A., et al. Impact and Role of Bacterial Communities on Biocorrosion of Metals Used in the Processing Industry // ACS Omega. 2019. № 4 (25). С. 21353–21360.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02954>
44. Pereiro I., Fomitcheva Khartchenko A., Petrini L., et al. Nip the bubble in the bud: a guide to avoid gas nucleation in microfluidics // Lab on a Chip. 2019. V. 19. № 14. P. 2296–2314.
<https://doi.org/10.1039/C9LC00211A>

ENGINEERING GEOLOGICAL PROCESSES AS A RESULT OF MICROORGANISMS ACTIVITY (ON THE EXAMPLE OF St. PETERSBURG SUBSURFACE)

R. E. Dashko^{a,#}, A. G. Karpenko^a, and D. L. Kolosova^a

^aSt. Petersburg Mining University, 21st Line 2, St. Petersburg, 199106 Russia

[#]E-mail: regda2002@mail.ru

The history of microbiological research in various geological sciences is analyzed in brief. Development of the doctrine about underground microorganisms and its use in various engineering geological schools is shown on the basis of experimental studies, including modern metagenomic analysis. The primary sources of the microorganisms' penetration into the underground space of St. Petersburg have been identified and systematized according to different principles. The analysis of engineering geological processes as a result of microorganisms and products of their vital activity provides the main aspects that control safety of subsurface exploration and use for various purposes, including the design, construction and operation of underground structures (subway tunnels) at different depths, as well as running deep foundation pits for ground structures. The results of experimental studies of the subsurface microorganisms' activity make it possible to infer that it is necessary to extend engineering geological, hydrogeological and engineering ecological research of the urban underground space in order to assess the hazard of the underground microorganisms' activity and to mitigate emergency cases for engineering structures.

Keywords: *underground space, methods of microbiological research, sources of the microorganisms' penetration, contamination, natural and human activities processes, forecasting*

REFERENCES

1. Abelev, M.Yu., Bakhronov, R.R., Karalli, D.L. [Specific features of arranging bases of buildings on gas-generating bulk soils]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2020, no. 7, pp. 26–31. (in Russian)
2. Andreyuk, E.I., Bilai, V.I., Koval', E.Z. et al. [Microbial corrosion and its pathogens]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1980, 287 p. (in Russian)
3. Bolotina, I.N., Sergeev, E.M. [Microbiological research in engineering geology]. *Inzhenernaya geologiya*, 1987, no. 5, pp. 3–17. (in Russian)
4. Volokhov, E.M., Mukminova, D.Z. [Assessment of deformations upon construction of subway escalator tunnels using artificial freezing of soil for the stage of ice wall formation]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2021, vol. 252, pp. 826–839. (in Russian)
5. Ginzburg-Karagicheva, T.L. [Microbiological essays: 1. Petroleum microbes and the biochemical processes they induce. 2. About colorless and purple thiobacillus]. Moscow, Leningrad, State Sci. and Techn. Oil Publ., 1932, 96 p. (in Russian)
6. Goldobina, L.A., Orlov, P.S. [Analysis of causes of corrosion destruction in underground pipelines and new solutions for increasing corrosion steel's resistance]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2016, vol. 219, pp. 459. (in Russian)
7. Dashko, R.E., Vlasov, D.Yu., Shidlovskaya, A.V. [Geotechnics and subsurface microbiology]. St. Petersburg, Georekonstruktsiya Publ., 2014, 279 p. (in Russian)
8. Dashko, R.E., Lkhmatikov, G.A. [The upper Kotlin clays in St. Petersburg region as a foundation and enclosing medium for unique engineering facilities: the engineering-geological and geotechnical analysis]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2022, vol. 254, pp. 180–190. (in Russian)
9. Dashko, R.E., Romanov, I.S. [Forecasting of mining and geological processes based on the analysis of the underground space of the Kupol deposit as a multicomponent system (Chukotka Autonomous Region, Anadyr district)]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2021, vol. 247, pp. 20–32. (in Russian)
10. Dukhanina, U.N. [Influence of bacterial microorganisms on the development of concrete biocorrosion]. *Vestnik nauki*, 2023, vol. 5, no. 6 (63), pp. 472–476. (in Russian)
11. Zaretskii, Yu.K. [Theory of soil consolidation]. Moscow, Nauka Publ., 1967, 270 p. (in Russian)
12. Zvyagintsev, D.G. [Interaction of microorganisms with hard surfaces]. Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1973, 176 p. (in Russian)
13. Isachenko, B.L. [Geological activity of microorganisms]. *Priroda*, 1950, no. 8, pp. 34–37. (in Russian)
14. Isachenko, B.L. [About concrete corrosion. Selected works]. 1951, Part II, pp. 254–256. (in Russian).
15. Isachenko, B.L. [About nitrification on walls and the resultant destruction of bricks. Selected works]. 1951, Part I, pp. 101–105. (in Russian)
16. Kolotova, O.V., Mogilevskaya, I.V. [The microbial bio-damage processes in the underground galleries]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2020, no. 2, pp. 44–66. (in Russian)
17. Kramarenko, L.E. [Geochemical and prospecting significance of groundwater microorganisms]. Leningrad, Nedra Publ., 1983, 181 p. (in Russian)
18. Kriss, A.E. [Vital processes and hydrostatic pressure]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 272 p. (in Russian)
19. Kudina, A.V., Sokorov, I.O. [Corrosion as a biotechnical system for destruction of engineering structures re-

- ducing their quality and reliability]. *Nauka i tekhnika*, 2020, no. 6, pp. 512–520. (in Russian)
20. Kuznetsov, S.I. [Introduction to geological microbiology]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1962, 239 p. (in Russian)
 21. Kulikov, A.A., Kharlamova, T.A., Khabarova, E.I. [On the issue of assessing the impact of microbiological biocenoses on the geoecological and geotechnical risks of mining enterprises]. *Ugol'*, 2022, no. 4, pp. 67–71. (in Russian)
 22. Kulikova, N.V., Danil'ev, S.M., Efimova, N.N., Kulikov, A.I. [Simulation of seismotomography and electrotomography data for a sand-clay section with the presence of subsurface gas accumulations]. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*, 2020, no. 2 (44), pp. 26–30. (in Russian)
 23. Larionov, A.K., Nizheradze, T.N., Lazdovskaya, M.A. [Identification of origin and gleying degree of clay soils as a result of microbial vital activity]. *Vestnik LGU. Seriya 7*, 1987, no. 4 (28), pp. 35–41. (in Russian)
 24. Maksimovich, N.G., Demenev, A.D., Khmurchik, V.T. [Transformation of mineral composition of dispersed soil under microbiological impact]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2021, vol. 20, no. 1, pp. 24–32. (in Russian)
 25. Moskvina, V.M., Ivanov, F.M., Alekseev, S.N. et al. [Corrosion of concrete and reinforced concrete. Methods of their protection]. Moscow, Stroizdat Publ., 1980, 536 p. (in Russian)
 26. Nadson, G.A. [Microorganisms as geological actors: about hydrogen sulfide fermentation in the Weiss salt lake and about the participation of microorganisms in the formation of black silt (therapeutic mud)]. St. Petersburg, P.P. Soikin Publ., 1903, 98 p. (in Russian)
 27. Radina, V.V. [Method of stabilizing quicksand]. Patent RF, no. 1207196/29–14, 1972. (in Russian)
 28. Root, P.E., Khlebnikova, G.M., Bolotina, I.N. et al. [The number and role of microorganisms in soils]. *Inzhenernaya geologiya*, 1982, no. 6, pp. 72–78. (in Russian)
 29. Rubenchik, L.I. [Microorganisms as a corrosion factor of concrete and metals]. Kyiv, Academy of Sciences of the Ukrainian SSR Publ., 1950, 65 p. (in Russian)
 30. Sozina, I.D., Danilov, A.S. [Microbiological remediation of oil-contaminated soils]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2023, vol. 260, pp. 297–312. (in Russian)
 31. Storozheva, M.E., Denisova, Ya.V. [Bio-corrosion of underground structures: main causes and protection of structure]. *Uchenye zapiski Sakhalinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 15–16, pp. 109–113. (in Russian)
 32. Tauson, V.O. [Great deeds of little creatures]. Moscow, Leningrad, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1948, 116 p. (in Russian)
 33. Travush, V.I., Shulyat'ev, O.A., Shulyat'ev, S.O. et al. [Analysis of the result of geotechnical monitoring of “Lakhta Center” tower]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2019, no. 2, pp. 15–21. (in Russian)
 34. Bryukhanov, A.L., Vlasov, D.Y., Maiorova, M.A. et al. The role of microorganisms in the destruction of concrete and reinforced concrete structures. *Power Technology and Engineering*, 2021, vol. 54, no. 5, pp. 609–614.
 35. Dashko, R.E., Vlasov, D.Yu., Voronov, A.S. Negative impact of microorganisms on multicomponent underground space of St. Petersburg: engineering, geological and geotechnical aspects. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2020, vol. 90, no. 9001.
 36. Fonken, G.S., Johnson, R.A. Chemical oxidations with microorganisms. New York, M. Dekker, 1972, 292 p.
 37. Guo, B., Liu, C., Gibson, C., Frigon, D. Wastewater microbial community structure and functional traits change over short timescales. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 662, pp. 779–785.
 38. Lahme, S., Mand, J., Longwell, J., et al. Severe corrosion of carbon steel in oil field produced water can be linked to methanogenic archaea containing a special type of [NiFe] hydrogenase. *Applied and Environmental Microbiology*, 2021, vol. 87, no. 3, pp. e01819–20.
 39. LaMartina, E.L., Mohaimani, A.A., Newton, R.J. Urban wastewater bacterial communities assemble into seasonal steady states. *Microbiome*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 1–13.
 40. Lebedeva, Y., Kotiukov, P., Lange, I. Study of the geoecological state of groundwater of metropolitan areas under the conditions of intensive contamination thereof. *Journal of Ecological Engineering*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 157–165.
 41. Little, B.J. et al. Microbially influenced corrosion—Any progress? *Corrosion Science*, 2020, vol. 170, pp. 108641.
 42. Loseva, E. et al. Specific features of the construction and quality control of pile foundations in engineering and geological conditions of St. Petersburg. *Architecture and Engineering*, 2020, vol. 5, no. 2, pp. 38–45.
 43. Narenkumar, J., AlSalhi, M.S., Prakash, A. et al. Impact and role of bacterial communities on biocorrosion of metals used in the processing industry. *ACS Omega*, 2019, no. 4 (25), pp. 21353–21360.
 44. Pereiro, I., Fomitcheva-Khartchenko, A., Petrini, L. et al. Nip the bubble in the bud: a guide to avoid gas nucleation in microfluidics. *Lab on a Chip*, 2019, vol. 19, no. 14, pp. 2296–2314.