Записки Санкт-Петербургского горного института им.Г.В.Плеханова.
Т. 133. СПб, 1992

УДК 624:131.43

Р.Э.ДАШКО, Е.С.РУДЕНКО

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РОЛИ БИОТИЧЕСКОГО КОМПОНЕНТА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ХВОСТОХРАНИЛИЩ ПО "ФОСФОРИТ"

Эксплуатация сооружений промышленной гидротехники типа хвостохранилищ ПО "Фосфорит" предполагает решение комплекса задач, связанных с прогнозом воздействия этих сооружений на геологическую среду, а также с обеспечением надежности их функционирования и, в первую очередь, устойчивости на весь период эксплуатации. Одной из важных задач является оценка роли и значимости биотического компонента в процессах техногенного преобразования пород, формирования химического состава подземных вод и их самоочищения в связи с возможной активизацией микробиологической жизни в толще пород основания и законтурной зоне хвостохранилищ в условиях длительного непрерывного воздействия промстоков накопителя. Значению биоты в формировании состава и свойств пород при техногенных воздействиях долгое время должного внимания в инженерной геологии не уделялось. Тем не менее общеизвестно, что в осадочных породах различного возраста и генезиса широко распространены микроорганизмы. Их численность может достигать нескольких миллионов и даже миллиардов клеток на один грамм воздушно-сухой породы, а биомасса – нескольких миллиграммов на килограмм. Физиологические особенности микроорганизмов позволяют им проникать на большие глубины, причем высокий уровень численности (несколько десятков тысяч в 1 г породы) отмечается вплоть до глубины 90 м, а в районе газовых и нефтяных месторождений – до нескольких тысяч метров [7].

В процессе жизнедеятельности микроорганизмы воздействуют на твердую, жидкую и газообразную компоненты микросреды их обитания, извлекая необходимые для развития питательные субстраты. При этом органическая и минеральная части породы разрушаются и трансформируются. Одновременно происходит выделение в среду продуктов жизнедеятельности микробов: различных метаболитов белковой и небелковой природы, газов, поверхностно-активных веществ, что сопровождается часто изменением окислительно-восстановительного потенциала и pH среды. Подобные процессы не могут не влиять на состав и свойства пород, где наблюдается развитие микробных сообществ. Однако активность воздействия микрофлоры на породы может резко возрасти, если загрязняющими компонентами пород являются органические соединения, поступающие, например, со сточными бытовыми или промышленными водами [12]. Именно такая ситуация имеет место на

"Фосфорит", где сбрасываемые флотационные воды содержат благоприятные для развития микроорганизмов органические и неорганические соединения (см. таблицу).

Химический состав прудковых вод хвостохранилищ ПО "Фосфорит"

Год опробования	Содержание компонентов, мг/л												pH	Общая минерализация, г/л
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$Na^{+}+K^{+}$	Cl^{-}	SO_4^{2-}	HCO_3^{-}/CO_3^{2-}	F^{-}	NH_4^{+}	NO_3^{-}	PO_4^{3-}	Талловое мыло	Нефтепродукты		
1986	15	15	759	60	200	1647/1800	4,4	-	-	6,2	-	-	9,0	5,0
1988	24	11	747	177	73	488/84	2,6	-	-	37,5	168,0	16,9	8,9	1,7
1989	16	9	850	199	134	1366/192	2,9	12,6	-	34,3	-	7,4	9,1	1,6
1990	24	4	831	253	111	1232/204	6,4	3,6	8,7	28,5	8	16,4	9,4	2,7

В связи с решением проблемы устойчивости и оценкой роли биоты в процессах техногенного преобразования глинистых отложений большой интерес представляют данные микробиологического изучения естественной толщи пород в контурной и законтурной частях накопителя, где техногенное воздействие промстоков проявляется в наибольшей степени. Активность микробиологической жизни оценивалась прямыми и косвенными методами. Прямое изучение предполагало выявление и количественный учет бактерий различных физиологических групп, численность которых определялась по профилям от дренажной канавы к р.Лугу на различных глубинах от дневной поверхности (рис.I). Физиологические группы микроорганизмов (ФГМ) выявлялись в образцах глинистых пород, а также в пробах воды первого от поверхности водоносного горизонта, приуроченного к тем же отложениям. Кроме того, проводилась оценка ФГМ прудковых и дренажных вод. Косвенным методом ориентировочной оценки активности микрофлоры служил метод определения биомассы микроорганизмов, точнее - белковой массы или суммарного белка (СБ), который в настоящее время успешно используется в инженерной геологии для оценки изменения свойств пород в процессах глееобразования [II].

Для микробиологического изучения были выбраны шесть физиологических групп бактерий, относящихся к циклам круговорота важных биогенных элементов (углерода, азота и серы): сапрофиты, денитрифицирующие, сульфатредуцирующие, водородообразующие, метанообразующие и углеводородокисляющие бактерии, использующие в качестве единственного энергетического и клеточного субстрата соляровое масло. Определение ФГМ было проведено путем посева на элективные питательные среды с использованием метода предельных десятикратных разведений для количественного учета выявленных ФГМ* [8,9,10]. Следует отметить, что все общепринятые методы количественного учета микроорганизмов в природных объектах являются относительными, т.е. позволяют выявить и учесть только часть микроорганизмов, реально существующих в

* Определение ФГМ проведено в микробиологической лаборатории ВНИГРИ.

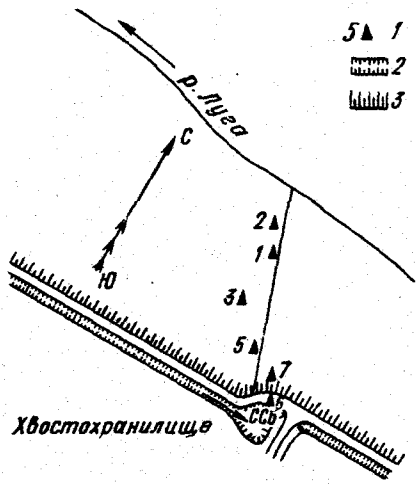


Рис.1. Схема расположения скважин 1 – скважина для отбора проб породы на определение биохимического газа ФГМ и ее номер; 2 – дренажная канава; 3 – откос насыпи пионерной дамбы; ССБ – Северный собирательный бассейн дренажных вод

этих объектах. В первую очередь это относится к методу посева на питательные среды. Более перспективным и надежным считается прямой микроскопический метод. Для выявления бактериальных клеток на поверхности твердых частиц сейчас с успехом используется метод *люминесцентной микроскопии* в падающем свете, который позволяет учесть в природном объекте на несколько порядков больше бактерий, чем метод посева на питательные среды. Причина такого значительного расхождения между показателями численности бактерий по данным микроскопии и посева проанализированы в работах Д.Г.Звягинцева и П.А.Кожевина [3,4]. Основные положения такого анализа могут быть представлены в виде равенства

$$M_1 - M_0 = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 ,$$

где M_1 – численность бактерий по данным микроскопии; M_0 – фон дисперсных частиц, ошибочно учитываемых при микроскопии как бактериальные клетки; P_1 – численность бактерий, выросших и учтенных на данной среде; P_2 – численность бактерий, которые имеют иные оптимальные условия развития (например, иные пищевые потребности) и поэтому не могут быть учтены на данной среде; P_3 – численность бактерий, *не учтенных из-за низкой скорости роста на данной среде*; P_4 – численность бактерий, не учитываемых при посеве вследствие возникновения стрессовых ситуаций при переходе микроорганизмов от естественных условий обитания к лабораторным, связанным, к примеру, с резким изменением "режима питания"; P_5 – численность мертвых клеток.

Действительно, микроорганизмы в породах существуют в условиях, совершенно отличных от создаваемых в лабораторном эксперименте при посеве на питательные среды, поэтому вклад P_2, P_3 и P_4 будет различным для разных ФГМ, но неизменно значительным. С этим связаны высокие значения коэффициента $K = M_1/P_1$. Особенно велико значение K для анаэробных форм бактерий и автотрофных микроорганизмов, где вклад компонентов P_2, P_3 и P_4 особенно весом. Значения K для такой микрофлоры могут достигать величины 10^5 и более. Это приходилось иметь в виду при анализе микробиологической обстановки по результатам посевов на питательные среды.

Несмотря на указанные недостатки, метод посева на питательные среды является важным методом изучения микрофлоры. Он позволяет выявить различные ФГМ, произвести приближенную количественную оценку выявленных микроорганизмов, дать сравнительную характеристику бактерий, относящихся к одной ФГМ.

Объектами микробиологического изучения на ПО "Фосфорит" служили озерно-ледниковые отложения, залегающие в зоне влияния накопителя, а также пробы воды первого от поверхности водоносного горизонта, приуроченного к этим отложениям. Была изучена также микрофлора прудка и ССБ. В первую очередь следует остановиться на результатах определения ФПМ в пробах воды. Численность сапрофитов,* содержание которых позволяет ориентировочно оценить общую численность бактерий, составила в изученных пробах воды 10^2-10^5 клеток на миллилитр. Постепенное снижение численности сапрофитов наблюдается при переходе от прудка к скважине 2 (рис.1), наиболее удаленной от прудковой зоны, и р.Луге, где численность названных бактерий составила 10^2 клеток на миллилитр (рис.2). Уменьшение содержания микробов связано скорее всего со снижением уровня загрязнения подземных вод по мере удаления от прудка как основного загрязнителя, так как большинство загрязняющих минеральных и органических компонентов подземного водоносного комплекса являются для микроорганизмов благоприятными питательными субстратами.

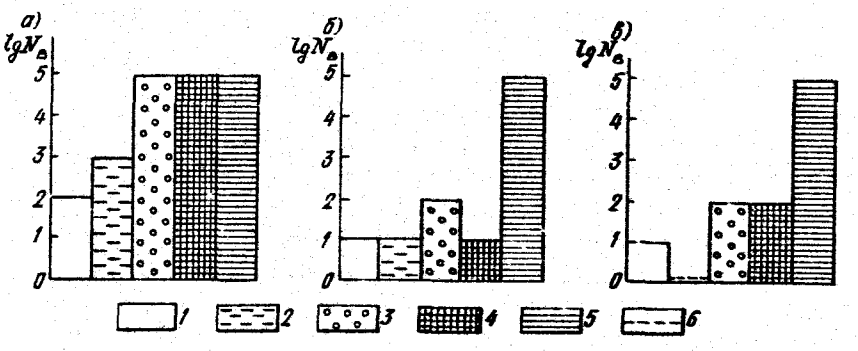


Рис.2. Гистограмма численности бактерий на 1 мл в пробах воды $N_в$: а – сапрофиты; б и в – углеводородокисляющие и сульфатредуцирующие бактерии
1–5 – места отбора проб: 1 – р.Луга; 2 – скважина 2; 3 – ССБ; 4 – скважина 5; 5 – прудок; 6 – единичные бактериальные клетки в скважине 2

Отдельно хотелось бы остановиться на одном важном вопросе. В цикле флотации обогащаемой породы на ПО "Фосфорит" в качестве гидрофобизатора используются нефтепродукты, представленные в основном соляровыми маслами. Известно, что сорбция аполярных веществ на поверхности минеральных зерен породы незначительна и закономерности их миграции не исследованы. В связи с этим нефтепродукты считаются наиболее опасными загрязняющими компонентами промстоков. Определение уровня углеводородного загрязнения и оценка фронта его распространения являются важной задачей на исследуемом объекте. Микробиологическим методом индикации углеводородного загрязнения может служить изучение численности углеводородокисляющих бактерий, развивающихся на конкретных углеводородах.

---

* Сапрофиты – микроорганизмы, получающие необходимый для жизнедеятельности углерод из органических соединений. Сапрофиты не синтезируют сами некоторые компоненты клетки и используют поэтому продукты жизнедеятельности других организмов или разлагающиеся животные и растительные ткани. К сапрофитам относится большинство бактерий.

Для оценки углеводородного загрязнения подземных вод на ПО "Фосфорит" была определена численность углеводородокисляющих бактерий, использующих соляровое масло в качестве единственного энергетического и клеточного субстрата. Высокое содержание углеводородокисляющих бактерий зафиксировано только для прудковой воды. Его значение (10^5 клеток на миллилитр) на 3-4 порядка превышает численность названных бактерий во всех остальных пробах (рис.2). Численность сульфатредуцирующих бактерий, утилизирующих в присутствии сульфатов разнообразные органические соединения, также оказалась в прудковой воде на 3-5 порядков выше численности этих бактерий в пробах воды из ССБ и водоносного горизонта законтурной части накопителя (рис.2). Активному развитию бактериальной флоры в прудковой зоне благоприятствует не только наличие питательных субстратов, включая дополнительный источник углеродного питания в виде нефтепродуктов, но и повышенная по сравнению с природными водами температура прудковых вод, что связано с круглогодичным сбросом подогреваемых флотационных вод.

Следует отметить, что реальный уровень численности бактерий названных физиологических групп, в соответствии с высказанными ранее соображениями, скорее всего, значительно выше содержания бактерий, определенного по результатам посевов. Однако характер изменения численности бактерий по каждой физиологической группе при переходе от прудка к другим пробам воды является объективным, т.е. отражает реальные закономерности, имеющие место в природных условиях.

Полученные результаты позволяют высказать некоторые предположения. Высокий уровень численности выявленных ФГМ в прудковой воде, в первую очередь, углеводородокисляющих бактерий, специализированных на утилизации соляровых масла, и резкое снижение численности этих бактерий при переходе от прудка к ССБ и водоносному горизонту законтурной части накопителя может свидетельствовать о формировании в прудке активного биоценоза, осуществляющего преобразование нефтепродуктов. В верхней, хорошо аэрируемой, зоне прудка происходит, вероятно, химическое окисление соляровых масел и других органических компонентов под действием ультрафиолетового облучения и начальная окислительная деструкция в результате деятельности углеводородокисляющих бактерий. В более глубоких слоях прудка, в зоне анаэробиоза, деградация нефтепродуктов углубляется анаэробными формами микроорганизмов. В итоге в техногенный водоносный комплекс, формирующийся в зоне основания накопителя и в толще намытых песков, попадают, главным образом, частично преобразованные нефтепродукты, в форме более доступной для микробиологического воздействия, чем исходные углеводороды, и в меньшем количестве. Следовательно, прудковую зону можно рассматривать как активный биохимический реактор, где происходит интенсивное самоочищение флотационных вод.

При таком предположении становятся понятными низкие значения численности углеводородокисляющих и сульфатредуцирующих бактерий в подземных водах законтурной зоны и ССБ. Они свидетельствуют об отсутствии значительного углеводородного загрязнения подземных вод и пород, залегающих в зоне фильтрации прудковых вод между дренажной канавой и р.Лугой. По-видимому, можно

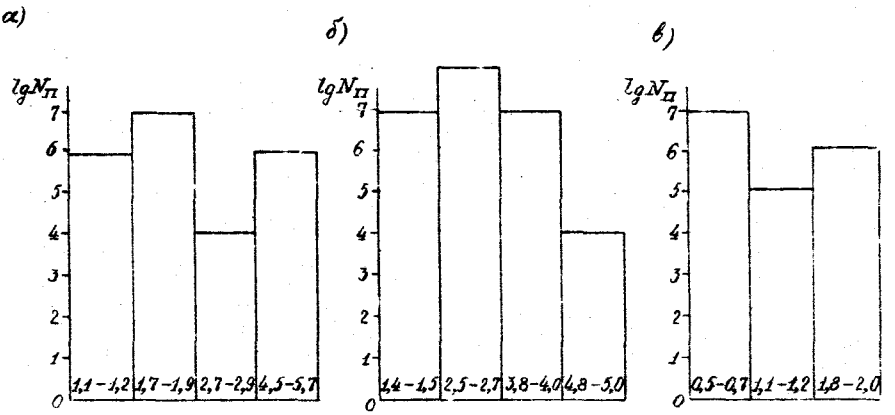


Рис.3. Гистограмма численности сапрофитов на 1 г в образцах пород $N_П$, отобранных из скважины 1 (а), скважины 5 (б), скважины 6 (в) (указана также глубина отбора проб породы в метрах)

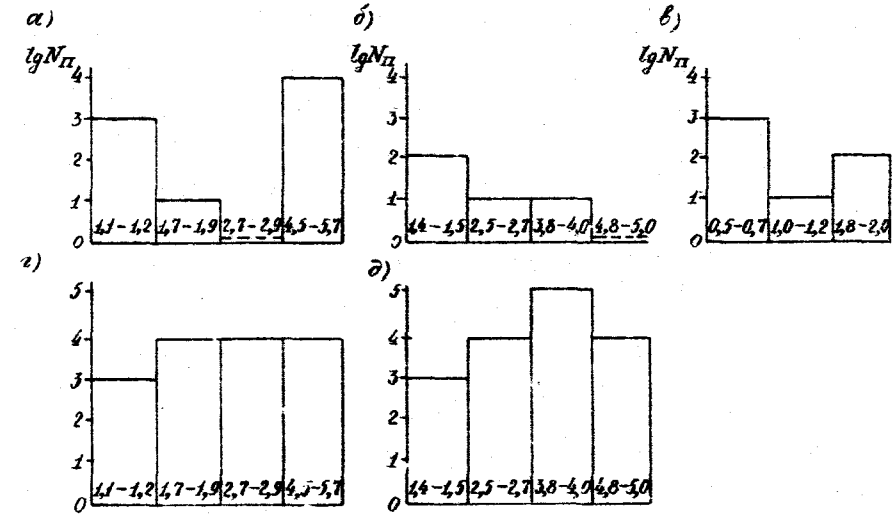


Рис.4. Гистограмма численности бактерий на 1 г в образцах пород $N_П$, отобранных из скважины 1 (а и г), скважины 5 (б и д), скважины 6 (в): а – в – углеводородокисляющие; г и д – денитрифицирующие (– – – – – единичные клетки)

говорить о наличии остаточного загрязнения, ареал распространения которого еще предстоит исследовать, сочетая для объективности и полноты исследований методы микроскопии и посева на питательные среды.

Результаты прямого изучения микрофлоры озерно-ледниковых отложений законтурной части накопителя промстоков ПО "Фосфорит" подтвердили наши

предположения. Действительно, хотя численность сапрофитов в образцах пород из скважин, расположенных между дренажной канавой и р.Лугой, равная 10^4–10^8 клеток на грамм (рис.3), говорит о наличии активной бактериальной жизни в толще пород, в то же время численность углеводородокисляющих бактерий, утилизирующих соляровое масло, невелика: от единичных клеток до 10^4 клеток на грамм (рис.4). Общая тенденция уменьшения численности названных бактерий с глубиной подтверждает приуроченность этих бактерий, строгих аэрофилов, к верхним, наиболее аэрированным горизонтам. Некоторый разброс значений, в частности всплеск численности углеводородокисляющих бактерий в образцах пород из скважины 1 на глубине 4,5–4,7 м и из скважины 6 на глубине 1,8–2,0 м, можно связать, по-видимому, с неоднородностью, слоистостью озерно-ледниковых отложений, с наличием песчаных прослоев с большими скоростями фильтрационного потока, что создает в этих горизонтах более благоприятный режим углеродного и кислородного питания. Невысокий уровень численности бактерий, утилизирующих соляровое масло, свидетельствует об активно протекающих в прудковой зоне процессах самоочищения, в первую очередь в отношении нефтепродуктов.

Денитрифицирующие бактерии выявлены в количестве 10^3–10^5 клеток на грамм (рис.4). Несколько повышенное содержание этих бактерий может быть связано с незначительным поступлением из контурной зоны накопителя продуктов микробиологической трансформации нефтепродуктов, которые могут быть использованы денитрификаторами.

Содержание анаэробных сульфатредуцирующих, метанообразующих и водородобразующих бактерий, определенное по результатам посевов на питательные среды, составило 10–10^3, единичные клетки и 10–10^4 клеток на грамм соответственно (рис.5). Низкая численность названных бактерий может явиться следст-

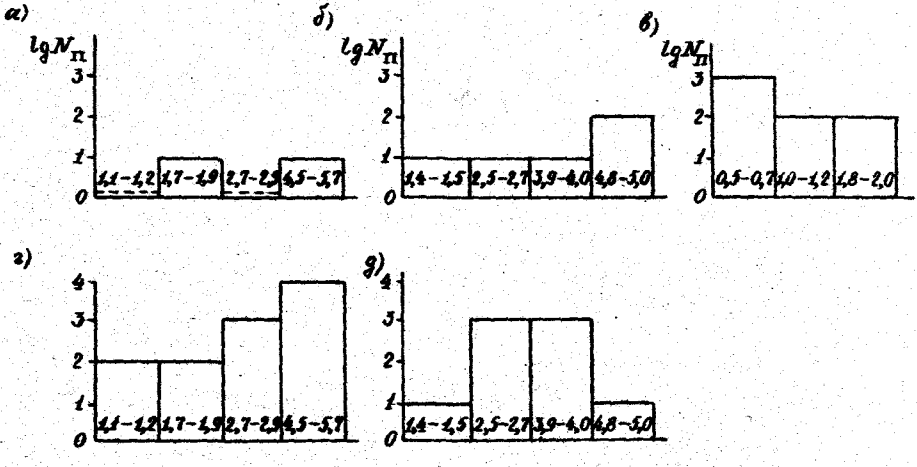


Рис.5. Гистограммы численности бактерий на 1 г в образцах пород $N_п$, отобранных из скважин 1 (а и г), 5 (б и д), 6 (в): а – в – сульфатредуцирующие, г и д – водородообразующие

вием неполноты учета анаэробных форм, однако свидетельствует о резком уменьшении содержания этих микроорганизмов при переходе от пород контурной части накопителя к законтурной зоне.

Оценивая суммарную численность бактерий в толще пород законтурной области хвостохранилищ ПО "Фосфорит", можно сделать вывод о высоком содержании микроорганизмов даже в этой зоне, испытывающей остаточное техногенное воздействие накопителя.

Постоянная микробиологическая деятельность при высоком уровне численности микроорганизмов приводит к накоплению в породах белковой массы, основными компонентами которой являются белки живых и мертвых клеток, а также продукты метаболизма белковой природы. Накопление биомассы - сложный процесс, зависящий, в первую очередь, от условий, определяющих активность развития микрофлоры: температурного и влажностного режимов, наличия питательных субстратов, pH и Eh среды, условий аэрации и др., а также от состава и свойств пород, обусловливающих их сорбционную активность по отношению к бактериальным клеткам. Необходимо принимать во внимание и гидродинамическую обстановку на изучаемом объекте, определяющую возможность переноса в фильтрационном потоке компонентов белковой массы.

Большинство бактериальных клеток неподвижно крепится на поверхности минеральных зерен породы, лишь незначительная часть (0,1-10 %) содержится в поровых растворах в свободном состоянии. Интенсивная сорбция микробных клеток обусловлена наличием отрицательного заряда на поверхности клеток (электронейтральные клетки встречаются редко), а также их малыми размерами (от нескольких долей микрона до нескольких микрон), что определяет высокое значение поверхностной энергии. Количество адсорбированных микроорганизмов может составлять миллионы и даже миллиарды на 1 г сорбента, представленного почвой или глинистой породой. Вполне понятно, что накопление таких значительных количеств микробных белков влияет на изменение состава и свойств глинистых отложений. Размеры бактериальных клеток соизмеримы с величиной тонкодисперсных частиц глинистых пород, поэтому накопление микробных клеток может привести к изменению дисперсного состояния пород в сторону увеличения содержания фракции с $d < 1 \div 2$ мкм, что способствует развитию тонкой пористости и сопровождается резким снижением проницаемости и водоотдачи. Снижение параметров механических свойств пород происходит за счет накопления белковых компонентов на поверхности минеральных зерен, что вызывает изменение характера структурных связей в породе.

На начальных этапах исследования изменения свойств пород в основании хвостохранилищ ПО "Фосфорит" отмечалось отсутствие повышения прочности пород под действием давления от намываемых песков [2]. По-видимому, накопление биомассы явилось фактором снижения проницаемости, что вызвало замедление процесса фильтрационной консолидации и явилось причиной преобразования характера структурных связей с тенденцией в сторону их ослабления.

Общих закономерностей корреляционной связи содержания суммарного белка с изменением, в частности, показателей проницаемости, прочности, дефор-

мационной способности не существует. В настоящее время связи между СБ и показателями физико-механических свойств установлены только для некоторых типов природноозлеенных пород Колхидской низменности [7]. По всей вероятности, определенные типы песчано-глинистых отложений разных регионов при различных техногенных воздействиях имеют неодинаковую чувствительность по отношению к микробиологической деятельности. Инженерно-геологические исследования в данном случае должны выявлять такие закономерности для прогноза изменения первоначальных природных условий.

В озерно-ледниковых отложениях ПО "Фосфорит", находящихся в зоне влияния накопителя, содержание СБ определялось по методике, изложенной в работе [5]. Это экспрессный метод, основанный на спектрофотометрическом определении белков в растворах, дающих специфическую окраску с веществами белковой природы. Названный метод имеет некоторые недостатки, связанные с возможной неполнотой учета СБ ввиду сложности количественной десорбции микробных белков с поверхности глинистых отложений и их крайне плохой растворимостью в водных средах. Тем не менее, он позволяет по мере накопления данных составить общую картину накопления и распределения СБ в толще глинистых отложений, а также провести сравнительную характеристику разных пород по интенсивности накопления белка.

Определения содержания белковой массы в озерно-ледниковых отложениях контурной и законтурной зон хвостохранилищ ПО "Фосфорит" дали следующие результаты, мкг/г:

Отложения	Супеси	Суглинки	Глины
В контурной зоне на глубине 0,5-4,0 м от подошвы намывных песков	59-60	82-120	135-189
В законтурной зоне*	50-110 / 80-235	70-150 / 100-580	- / 225-700

* В числителе и знаменателе соответственно выше и ниже уровня грунтовых вод.

Эти данные свидетельствуют о зависимости изменения содержания СБ при переходе от глин к супесям, что, очевидно, связано с их сорбционной способностью. Содержание СБ для законтурной части хвостохранилищ изменяется в широком диапазоне: от 70 до 700 мкг/г. При этом наблюдается тенденция увеличения СБ по глубине разреза с наибольшим содержанием белковой массы ниже уровня грунтовых вод. Содержание СБ максимально (580-700 мкг/г) в озерно-ледниковых отложениях, залегающих в зоне фильтрационного потока прудковых вод с северной стороны законтурной части хвостохранилищ. В породах законтурной зоны накопителя с южной стороны оно не превышает 150 мкг/г. Эти данные вполне соответствуют количеству поступающего органического и неорганического субстратов, так как основной фильтрационный поток направлен на север.

В целом разрез основания и озерно-ледниковых отложений законтурной части хвостохранилищ ПО "Фосфорит" можно охарактеризовать как зону высокой микробиологической пораженности за счет техногенного воздействия флотационных вод, содержащих нефтепродукты. Поэтому накопление данных по содержанию СБ и изменению показателей свойств глинистых отложений в зависимости от содержания в них белковой массы будут продолжены.

Накопление биомассы является фактором пассивного воздействия микрофлоры на породы. Более значительно влияние микроорганизмов на состав и свойства пород в процессе их жизнедеятельности.

Большой вклад в разрушение минералов пород, содержащих элементы с переменной валентностью (Fe, Mn, S и др.), вносят микробные ферменты. Это биохимические катализаторы белковой природы, экспортируемые клетками во внешнюю среду для подготовки легкоусвояемых питательных субстратов. Ферменты способствуют осуществлению окислительно-восстановительных процессов с участием названных элементов, что приводит к изменению минерального и гранулометрического состава, состояния и свойств породы. Известно, что ферментативную редукцию трехвалентного железа в анаэробных условиях могут осуществлять большинство гетеротрофных микроорганизмов [I].

В озерно-ледниковых отложениях, залегающих в зоне влияния хвостохранилищ ПО "Фосфорит", где высокая обводненность пород и активное микробиологическое окисление органических компонентов промстоков способствуют расширению зоны анаэробиоза, отмечается разрушение алюмосиликатов, сопровождающееся увеличением дисперсности пород и снижением сопротивления сдвигу, что может быть связано с ферментативным восстановлением трехвалентного железа и переходом его в подвижную двухвалентную форму (см. статью Ю.Г.Вишневской в этом томе).

Хотелось бы отметить один важный момент, определяющий активность ферментативного воздействия на породы. Все ферменты обладают свойствами гидрофильных коллоидов с высокой поверхностной энергией. В связи с этим при попадании в породу большинство ферментов сорбируется ею, что облегчает контакт ферментов с элементами кристаллических решеток минералов. С другой стороны, есть данные, что сорбированные ферменты, в отличие от свободных, приобретают повышенную устойчивость к высушиванию, ингибиторам, протеолитическим ферментам, действию микроорганизмов и высоких температур и, соответственно, сохраняют во времени высокую активность [I3]. Названные свойства сорбированных ферментов, а также наблюдаемые изменения в составе и свойствах глинистых отложений на ПО "Фосфорит" дают основание предположить о заметном вкладе ферментативного воздействия в преобразование техногенно-загрязненных пород исследуемого накопителя, однако этот вопрос требует отдельного исследования.

Среди микробных метаболитов, принимающих активное участие в преобразовании пород, важное место занимают газы. Биогенное газообразование широко распространено в природе. Образованием газов сопровождается микробиологическая трансформация многочисленных органических субстратов, а также раз-

личных содержащих азот и серу минеральных веществ. Для всех гетеротрофных микроорганизмов характерна способность к утилизации органических веществ с образованием газообразных продуктов метаболизма. Наиболее распространенными представителями биохимических газов являются CO_2, N_2, CH_4, H_2, H_2S и NH_3. Растворимые в воде газы (CO_2, H_2S, NH_3) могут оказывать на породы разнонаправленное химическое воздействие, образуя при растворении в поровой воде агрессивные среды. Воздействие малорастворимых газов (N_2, CH_4, H_2) имеет преимущественно механический характер.

Газообразование в глинистых породах сопровождается часто накоплением биогенных газов в толще пород, так как при коэффициенте фильтрации $K_ф < 1 \div 2$ м /сутки, характерном для глинистых отложений, отсутствует газопроницаемость по поровому пространству [8]. Скопление газов вызывает резкий рост порового давления, что влечет за собой изменение состояния газонасыщенной породы в результате разрушения структурных связей. Избыточное давление в порах породы вызывает ее разуплотнение, при этом уменьшается сопротивление сдвигу вследствие падения эффективного давления. Газонасыщение породы снижает также ее водопроницаемость. Таким образом, микробиологическое газообразование в глинистых породах действует в том же направлении, что и накопление микробных белков, - происходит снижение механических свойств глинистых отложений.

Вполне понятно, что в толще пород, залегающих в зоне влияния хвостохранилищ ПО "Фосфорит", где развитие микрофлоры стимулируется наличием органических и неорганических компонентов промстоков в подземных водах (см. рис.2-5), можно ожидать образования и накопления биохимических газов. Выделение биогенного газа зафиксировано в толще озерно-ледниковых отложений законтурной части хвостохранилищ и подтверждено результатами анализа газов, отобранных из скважины 5 (см. рис.I), расположенной в зоне фильтрационного потока прудковых вод около ССБ. Отбор газов осуществлялся в течение четырех месяцев. Результаты анализа двух порций биохимического газа следующие:

Газ	CO_2	$Ar+O_2$	CH_4	H_2	N_2	$He+Ne$
Содержание,* % по объему	10,60 / 6,90	3,30 / 1,20	0,35 / 0,18	0,62 / 0,057	85,13 / 91,66	0,001 / 0,001

* В числителе и знаменателе соответственно пробы, взятые 15 августа и 4 октября 1990 г.

Эти данные* и определение ФГМ в образцах породы из скважины 5 (см. рис.4, 5) показывают приспособленность микробного ценоза к денитрификации, так как численность денитрифицирующих бактерий превышает численность других ФГМ, а азот является основным компонентом газовой смеси.

* Анализ биохимического газа проведен в газовой лаборатории ВНИГРИ.

Образование биогенного азота является результатом жизнедеятельности факультативно-анаэробных денитрифицирующих бактерий, осуществляющих окислительную деструкцию различных органических веществ за счет кислорода нитратов или других окисленных форм азота. Нитраты при этом восстанавливаются, как правило, до газообразного азота. Схематически процесс денитрификации можно представить следующим образом:

$$5\,C_{орг} + 4NO_3^- \longrightarrow 2CO_3^{2-} + 3CO_2 + 2N_2.$$

Органический субстрат

Развитию денитрификации в толще озерно-ледниковых отложений законтурной части накопителя благоприятствует, по-видимому, поступление с подземными водами из прудковой зоны частично окисленных нефтепродуктов и нитратов.

Изучение процессов газообразования в законтурной части хвостохранилищ ПО "Фосфорит" представляет интерес, преимущественно, в научном плане, так как загрязнение пород и подземных вод законтурной зоны накопителя нефтепродуктами незначительно и интенсивность выделения биогенных газов невелика (около 50 мл/месяц). Однако при эксплуатации инженерных сооружений, где имеет место техногенное загрязнение глинистых отложений со значительным вкладом органических компонентов, и условия среды (pH, Eh, T, влажность и др.) благоприятны для развития микрофлоры, существует реальная угроза устойчивости сооружений в результате однонаправленного действия биотического компонента пород: накопление белковой массы, ферментативная деятельность микроорганизмов и биохимическое газообразование способствуют снижению механических свойств, ослаблению пород и снижению несущей способности оснований сооружений. Не менее важен и другой аспект деятельности биоты - возможность микробиологического самоочищения подземных вод.

Таким образом, прогноз воздействия биотического компонента на состояние и свойства пород и самоочищение природных вод при эксплуатации сооружений подобного типа должен стать составной частью инженерно-геологического анализа и оценки изменения природных условий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аристовская Т.В. Микробиология процессов почвообразования. Л.: Наука, 1980. 187 с.

2. Дашко Р.Э. Инженерно-геологический анализ консолидации водонасыщенных глинистых пород // Инженерная геология. 1981. № 1. С. 71-75.

3. Кожевин П.А. Микробные популяции в природе. М.: Изд-во МГУ, 1989. 173 с.

4. Кожевин П.А., Звягинцев Д.Г. Проблемы оценки численности почвенных микроорганизмов // Доклады АН СССР. 1980. Т. 250. № 2. 463 с.

5. Количественный учет влияния жизнедеятельности микроорганизмов на физико-механические свойства оглеенных пород: Методические указания. Л.: Изд-во ЛГУ, 1988. 25 с.

6. Кузнецов С.И. Экология микроорганизмов пресных водоемов. Л.: Наука, 1974. 194 с.

7. Кузнецов С.И., Иванов М.В., Ляликова Н.Н. Введение в геологическую микробиологию. М. Изд-во АН СССР, 1962. 239 с.

8. Лехтимяки Э.В. Инженерно-геологические условия кессонной проходки тоннелей в Ленинграде. Л.: Стройиздат, 1982. 123 с.

9. Родина А.П. Методы водной микробиологии. М.: Наука, 1965. 363 с.

10. Руководство по методам биологического анализа морской воды и донных отложений / Под ред. А.В.Цыбань. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 191 с.

11. Сравнительная оценка некоторых параматров биогенной активности оглеенных грунтов в связи с инженерно-геологическими задачами / А.К.Ларионов, Т.Н.Нижарадзе, О.М.Паринкина и др. // Вестник ЛГУ. Серия 7. Геология и география. 1989. Вып. 2. С. 30-37.

12. Численность и роль микроорганизмов в грунтах / П.Э.Роот, Г.М.Хлебникова, И.Н.Болотина, Е.А.Воробьева, Т.П.Кольчугина, С.Е.Горин // Инженерная геология. 1982. № 6. С. 72-78.

13. Экологическая роль микробных метаболитов / Отв. ред. Д.Г.Звягинцев. М.: Изд-во МГУ, 1986. С. 57-65.