

## ПРОБЛЕМЫ ГЕОЭКОЛОГИИ В ГЕОТЕХНИКЕ

*Р. Э. ДАШКО – профессор, Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г. В. Плеханова (Технический университет), Санкт-Петербург, Россия.*

Проанализированы особенности работы системы сооружение – основание с учетом влияния изменения напряженного состояния глинистых грунтов, воздействия проток и утечек из подземных систем водоотведения на развитие осмотических, диффузионных, сорбционных явлений, преобразования окислительно-восстановительной обстановки, а также процессов набухания глинистых грунтов. Рассмотрены проблемы активизации микробной деятельности в подземном пространстве под воздействием природных и техногенных факторов. Приведены примеры снижения прочности глинистых грунтов во времени при росте бактериальной массы. Показана позитивная и негативная роль деятельности микроорганизмов в подземной среде на основе рассмотрения процессов самоочищения.

### 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА РАБОТЫ СИСТЕМЫ СООРУЖЕНИЕ – ОСНОВАНИЕ

При анализе работы единой системы «наземное сооружение – основание» наибольшие сложности возникают при геотехнической оценке пород (грунтов) основания как самого важного элемента рассматриваемой системы. Известно, что развитие больших и неравномерных деформаций пород (грунтов) основания вызывает переход сооружения в аварийное состояние. Наиболее часто разрушения зданий наблюдаются в тех случаях, когда в зоне основания присутствуют песчано-глинистые грунты, которые характеризуются существенной неоднородностью и изменчивостью состава, а также показателей физико-механических свойств. Кроме того, такие грунты имеют высокий уровень чувствительности и уязвимости к изменению не только напряженного состояния, но и температурных условий, физико-химической и биохимической обстановки в основании эксплуатируемых зданий и сооружений. В настоящее время не существует единой теории устойчивости сооружений, хотя необходимость ее создания диктуется ежедневными запросами практики,

а также напряженной геоэкологической обстановкой в подземном пространстве крупных городов и промышленных регионов. Следует отметить, что несмотря на то, что российскими и зарубежными учеными проделана большая работа в направлении решения проблемы устойчивости оснований сооружений, ее физические основы только начинают разрабатываться. Современный синтез наук, используемых при анализе и оценке надежности функционирования зданий и сооружений и обеспечения их длительной устойчивости, на настоящем этапе развития дает базу для создания физической теории надежности сооружений. Теория надежности работы оснований сооружений должна базироваться на прогнозе закономерностей преобразования пород (грунтов), а также строительных материалов несущих и ограждающих конструкций под воздействием природных, природно-техногенных и техногенных факторов, которые определяют геоэкологическое состояние подземного пространства.

Геоэкология подземного пространства рассматривается как междисциплинарная наука, основной задачей которой является установление закономерностей трансформации основных компонентов подземного пространства – горных пород (грунтов), подземных вод, газовой составляющей и

микробиоты под влиянием преобразования напряженно-деформированного состояния массива пород (грунтов), гидродинамического и/или гидрохимического режима вод, загрязнения подземной среды, а также изменения термодинамических условий.

Полученные закономерности должны быть использованы при количественной оценке устойчивости зданий и сооружений и ее изменения во времени с учетом негативных трансформаций тех компонентов подземного пространства, численные параметры которых используются в расчетах.

За последние 15 лет накоплен значительный фактический материал по наблюдениям за изменением состава, состояния и физико-механических свойств песчано-глинистых грунтов в основании сооружений при воздействии различных техногенных факторов, и прежде всего контаминации подземного пространства. Кроме того, выполнен большой объем экспериментальных исследований по изучению влияния давления, действия различных промышленных и хозяйственно-бытовых стоков, температуры, активизации микробиологической деятельности в водонасыщенной толще песчано-глинистых грунтов, что позволяет прогнозировать общую тенденцию и направленность процессов, происходящих в грунтовой толще основания. Эти исследования позволяют оценить ряд явлений, которые имеют определяющее значение при рассмотрении изменения характера деформируемости и прочности грунтов основания и, как следствие, дать заключение об изменении устойчивости сооружений.

Скрытые и неуправляемые процессы в ходе строительства и эксплуатации сооружений происходят с породами (грунтами) основания. Принципиальное значение приобретают те процессы, которые вызывают ухудшение состояния и свойств пород (грунтов) основания, приводящее к росту абсолютной и относительной деформаций и снижению несущей способности грунтов. Следует иметь в виду, что с течением времени наблюдается постепенное и необратимое изменение свойств строительных материалов, особенно в подземной части сооружений, которое определяется старением, износом и разнообразными видами коррозии.

В настоящее время геотехнический прогноз устойчивости сооружений должен обязательно сопровождаться изучением комплексного воздействия основных факторов: давления, физико-химических и биохимических условий, температурного режима в двух аспектах: 1) изменение состояния и свойств грунтов во времени в зависимости от реальных условий их работы в основании; 2) изменение напряженного состояния грунтов под действием веса сооружения, а также протекания физико-химических, химических и биохимических процессов. Общая схема систематизации и воздействия факторов, влияющих на устойчивость основания сооружений, приведена на рис. 1.

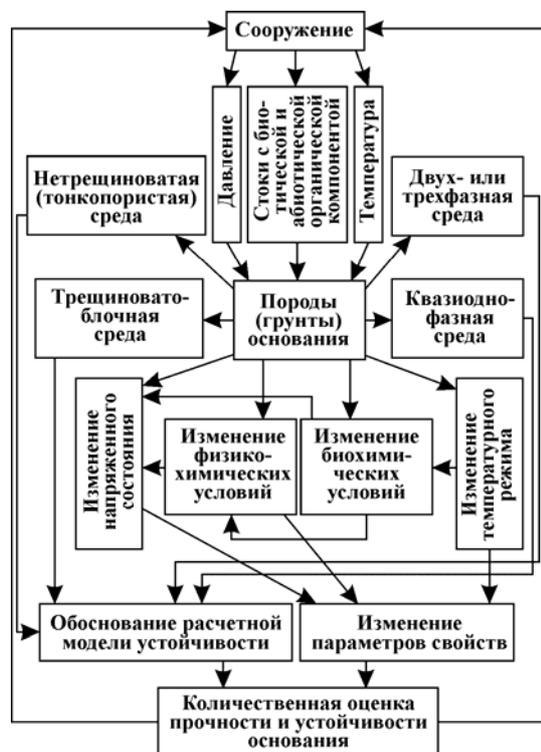


Рис. 1. Схема систематизации и воздействия факторов, влияющих на устойчивость основания сооружений

Главным звеном является выбор расчетной модели основания при действии определяющего фактора – давления от веса сооружения. Его роль будет меняться в зависимости от типа породы (грунта) и активности протекающих процессов при разнообразных техногенных воздействиях.

## 2. МОДЕЛИ ОСНОВАНИЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Построение расчетных моделей оснований реализуется на базе экспериментальных исследований, а также теоретических представлений инженерной геологии, геотехники и механики грунтов. Анализ поведения глинистых грунтов в основании сооружений необходимо вести как на макро-, так и на микроуровнях. При оценке работы глинистых толщ на макроуровне наибольшее значение имеет их трещиноватость. С учетом макростроения выделяют две группы расчетных моделей оснований. К первой группе относятся основания, глинистые породы которых должны быть представлены как трещиноватоблочная среда (среда с двойной пористостью). Трещины разбивают толщу основания на отдельные блоки, размер которых может значительно варьировать в зависимости от характера и интенсивности трещиноватости. В то же время каждый блок анализируется как дисперсная среда, имеющая лишь тонкую пористость, и все процессы, происходящие в таком блоке, следует рассматривать на микроуровне (рис. 2).



Рис. 2. Характер интенсивности трещиноватости нижекембрийских глин в свежем борту карьера «Красный Бор» в Ленинградской области

Ко второй группе относятся основания, в которых глинистые грунты рассматриваются как дисперсная среда, обладающая только тонкой пористостью (наличие микротрещиноватости при этом не исключается). Анализ работы основания в таком случае необходимо проводить на микроуровне.

Первая группа моделей охватывает глинистые грунты предельно высокой, высокой, а также частично средней степени литификации, для которых характерны твердая, полутвердая, тугопластичная консистенции, высокая плотность, малая влажность, прочные структурные связи.

Во второй группе моделей должны рассматриваться глинистые грунты малой и отчасти средней степени литификации, имеющие текучую, тугопластичную и мягкопластичную консистенции, повышенные значения влажности. Подчиненное значение в таких отложениях должны играть цементационные связи.

При оценке устойчивости сооружений на трещиноватых глинистых грунтах необходимо использовать параметры прочности и деформационной способности, полученные при полевых исследованиях. При отсутствии таких данных необходимо вводить понижающие коэффициенты с учетом масштабного эффекта в параметры механических свойств (сцепление, модуль общей деформации). При проведении экспериментов обязательным является определение прочности по отдельным трещинам при условии сохранения их заполнителя, а при отсутствии заполнителя – характерной поверхности трещин и вторичных пленок на ней.

При рассмотрении второй группы расчетных моделей предполагаются отсутствие трещиноватости в глинистых грунтах, относительно низкая их прочность и высокая деформационная способность. С учетом относительно слабых структурных связей таких глинистых отложений наиболее достоверным будет вариант, когда сжимающие напряжения ( $\sigma_z$ ) разрушают структурные связи в глинистом грунте, т.е. превосходят величину его структурной прочности на сжатие ( $\sigma_{стр}$ ). В этом случае необходимо проанализировать характер перераспределения сжимающих напряжений между поровой водой и скелетом грунта, который зависит от содержания глинистой фракции, ее минерального состава, плотности и влажности отложений, темпов роста давления, особенностей работы грунта в основании сооружений (с возможностью либо отсутствием бокового расширения).

В табл. 1 приведен общий характер изменения максимальной величины порового давления ( $U_{max}$ ) для малолитифицированных глинистых грунтов различного гранулометрического состава и физического состояния (показателя консистенции) по результатам экспериментальных работ для одномерной задачи (при отсутствии бокового расширения). Тонкодисперсная часть этих грунтов представлена глинистыми минералами средней активности – гидрослюдами. При анализе работы грунта в основании с возможностью бокового расширения необходимо предусмотреть снижение значений порового давления в 1,5...2 раза (меньшее значение относится к суглинкам, большее – к глинам). При ускоренном нагружении величина порового давления возрастает в 2...3 раза, причем менее интенсивное увеличение порового давления наблюдается в более тяжелых разностях глинистых грунтов. Содержание высокоактивных глинистых минералов приводит к снижению порового давления на 30...40 %, а малоактивных – к его увеличению на 25...30 % по сравнению с данными табл. 1.

Таблица 1. Изменение относительной величины порового давления ( $U_{max}/y_z$ ) от содержания глинистой фракции ( $M_c$ ) и показателя консистенции ( $I_L$ )

$M_c$ , %	$I_L$	$(U_{max}/y_z)$	Примечание
3–10	0,5–0,75	0,32–0,40	Приведенные результаты получены для глинистых грунтов четвертичного возраста петербургского региона
	0,75–1,0	0,40–0,57	
	1,0–2,0	0,58–0,70	
10–30	0,5–0,75	0,28–0,32	
	0,75–1,0	0,33–0,50	
	1,0–2,0	0,50–0,62	
30–60	0,5–0,75	0,03–0,28	
	0,75–1,0	0,28–0,33	
	1,0–2,0	0,32–0,38	

Относительно невысокие величины порового давления в глинах объясняются значительной структурированностью поровой воды за счет поверхностных активных центров глинистых частиц, что приводит к снижению трансляционного движения молекул воды и, соответственно, к уменьшению степени ее подвижности и восприятия внешнего давления. По результатам исследования подвижно-

сти поровой воды в глинистом грунте на установке ядерно-магнитного резонанса ЭХО-4 (физический факультет СПбГУ), время продольной релаксации протонов поровой воды  $T_1$  существенно уменьшается при возрастании содержания глинистой фракции и уменьшении влажности. Следует отметить, что величина  $T_1$  в капельно-жидкой чистой воде в зависимости от степени ее дегазации составляет 2,5...3,5 с. Та же вода в глинистых грунтах дает снижение  $T_1$  практически на 2...3 порядка (табл. 2).

Таблица 2. Зависимость времени продольной релаксации протонов поровой воды ( $T_1$ ) в гидрослюдистых глинистых грунтах от содержания фракции  $d < 0,002$  мм ( $M_c$ ) и влажности ( $W$ )

Величина влажности $W$	$M_c$ , %	$T_1$ , мс
1,1 $W_T$	25	14,0
	35	12,5
	45	11,8
$W_T$	25	12,8
	35	11,5
	45	10,8
$W_p < W < W_T$	25	11,5
	35	10,2
	45	9,1

Примечание.  $W_T$  и  $W_p$  – соответственно влажность на пределе текучести и пластичности.

В высокоактивных (бентонитовых) глинах при влажности, изменяющейся в пределах 80...120 %, величина  $T_1$  варьирует от 3 до 4,8 мс.

### 3. ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

#### 3.1. Особенности движения стоков в трещиноватых глинистых грунтах

Как уже отмечалось, прогноз устойчивости оснований сооружений не только зависит от правильно выбранной расчетной модели и параметров свойств грунтов при действии основного фактора – изменения напряженного состояния грунтов, но и определяется влиянием физико-химической обстановки, которая формируется в процессе эксплуатации соору-

жений при наличии утечек из инженерных коммуникаций, в том числе систем водоотведения. При рассмотрении проблемы физико-химического взаимодействия утечек с глинистыми грунтами одним из важных вопросов является исследование механизма их проникновения в грунтовую толщу. Обычно проникновение стоков в грунты основания происходит под действием ничтожно малых градиентов напора. Степень раскрытия трещин и размер блока определяют режим движения жидкой фазы в толще грунтов. Раскрытие трещин более 1,5 мм предполагает быстрое опускание стоков до глубины, где глинистые грунты обладают достаточно низкой водопроницаемостью. С течением времени наблюдается постепенный подъем уровня грунтовых вод, который будет интенсифицировать физико-химические и биохимические преобразования дисперсных блоков при их взаимодействии с техногенными водами.

При раскрытии трещин от 0,5 до 1,5 мм движение стоков замедляется, что сказывается на характере их взаимодействия с глинистыми грунтами. При этом возникает возможность значительного их преобразования уже на начальном этапе проникновения загрязненных вод в толщу основания. В этих двух случаях следует рассматривать преимущественно конвективное движение стоков в трещиноватой толще грунтов.

Уменьшение раскрытия трещин ниже 0,5 мм приводит к резкому уменьшению скорости движения утечек. Конвективный характер движения еще более замедляется, а интенсивность преобразования глинистых грунтов под действием жидких агрессивных сред возрастает.

Дальнейшее уменьшение размера трещин до величин, сопоставимых с размерами пор, определяет значительное влияние поверхностных явлений на характер движения стоков. В этом случае следует анализировать глинистую толщу как среду, обладающую тонкой пористостью. Такая же модель должна рассматриваться применительно к глинистым грунтам, в которых отсутствует трещиноватость. Рассмотрение и анализ модели глинистых грунтов основания как среды, обладающей только тонкой пористостью, предполагает необходимость сравнительной оценки дейст-

вующего градиента напора ( $I_d$ ) с начальным градиентом фильтрации ( $I_n$ ). Если  $I_d < I_n$ , проникновение стоков будет происходить диффузионным путем за счет градиента концентраций стоков и поровых вод глинистых грунтов. При коэффициентах фильтрации глинистых грунтов менее  $10^{-5}$  м/сут и  $I_d > I_n$  скорости конвективного и диффузионного движения стоков становятся сопоставимыми, и механизм их перемещения следует рассматривать как диффузионно-конвективный.

### 3.2. Осмотические и диффузионные процессы в глинистых грунтах

Заполнение трещин более минерализованными растворами (по сравнению с поровыми водами глинистых грунтов) приводит к появлению диффузионно-осмотических процессов за счет градиента концентраций. При этом необходимо отметить, что на глинистые грунты неправомерно распространять эффекты, наблюдаемые на мембранах. При рассмотрении физико-химических взаимодействий с трещиноватой толщей одним из кардинальных вопросов прогноза является возможность набухания либо усадки отдельных блоков глинистых грунтов. Набухание блоков предопределяет постепенное смыкание трещин, изменение несущей способности грунтов. Усадка увеличивает степень раскрытия трещин, что вызывает ослабление толщи и возможность более глубокого проникновения стоков в трещиноватые грунты. Усадка блоков происходит за счет процессов осмотического оттока влаги из них при существовании определенного градиента концентраций между фильтрующимся ( $C_f$ ) и поровым ( $C_n$ ) растворами при условии, что  $C_f > C_n$ .

Осмотические явления в глинистых грунтах в теории и практике геотехнических и геоэкологических исследований мало изучены. При исследовании роли осмотических процессов необходимо установить ту концентрацию фильтрующего раствора, при которой начинается усадка блоков глинистых грунтов. Такая величина концентраций названа нами порогом осмотической усадки  $C_{пou}$ . При  $C_f > C_{пou}$  происходит увеличение раскрытия трещин. Экспериментальные исследования, проведенные нами в широком диапазоне

изменения концентраций растворов NaCl (от 5 до 300 г/л) в интервале влажности глинистых грунтов от  $W_p$  до  $W_t$ , показали, что интенсивное развитие осмотического оттока влаги из глинистых блоков наблюдается при влажности  $W > 1,2W_p$ . Соответственно в зависимости от влагосодержания грунта изменяется и концентрация растворов, выше которой имеет место осмотическое обезвоживание глинистого грунта. Оценка  $C_{\text{поу}}$  может быть выполнена по следующей эмпирической формуле для хлоридно-натриевых растворов:

$$\tilde{N}_{\text{поу}} = \frac{\hat{A}\sqrt{I_{\text{п}}}}{W - 1,2W_{\delta}},$$

где обозначения  $M_c$ ,  $W$  и  $W_p$  даны ранее;  $B$  – эмпирический коэффициент, зависящий от гранулометрического и минерального состава грунтов (для глин гидрослюдистого состава он равен 14...16; для суглинков – 10...12).

Поскольку в глинистых грунтах отсутствует мембранный эффект, наряду с осмотическим оттоком влаги (движение воды в сторону более высоких концентраций) происходит диффузия солей электролитов из минерализованных растворов в блок глинистых грунтов. Постепенное накопление солей в грунте компенсирует в некоторой степени его усадку при осмотическом обезвоживании. Увеличение содержания солей в блоках глинистых грунтов приводит к изменению их состояния и свойств, что должно быть учтено при проектировании и эксплуатации сооружений, поскольку эти процессы могут существенно повлиять на прочность и деформационную способность основания.

В процессе движения загрязненных стоков протекает сорбция отдельных компонентов на поверхности частиц водонасыщенных грунтов. Интенсивность сорбции определяется минеральным и гранулометрическим составом глинистых грунтов, степенью их цементированности, природой сорбирующегося компонента, его миграционной формой, концентрацией, рН и температурой воды. Для глинистых минералов и слюд установлен следующий ряд сорбционной активности: монтмориллонит > нонтронит > иллит > каолинит = мусковит > биотит. Ожелезнение дисперсных частиц способствует повышению их сорбционной

способности. Большое влияние на механизм кинетики сорбции в глинистых грунтах оказывают природа поверхности и размер зерна сорбента. Скорость сорбции при прочих равных условиях убывает с ростом размера зерна сорбента и уменьшением объема пор, по которым происходит движение растворов. В тонкодисперсных грунтах скорость их загрязнения за счет сорбции возрастает. Однако при влажности, близкой к влажности на пределе пластичности, сорбция выражена слабо. По мере увеличения влажности сорбционная способность грунтов повышается. Экспериментальные исследования, выполненные для оценки сорбционной способности грунтов, показывают, что в большинстве случаев изотермы сорбции описываются уравнением Генри:

$$A = K_{\tilde{A}}\tilde{N} = \frac{1}{\beta}\tilde{N},$$

где  $A$  – равновесное количество компонентов, сорбированное грунтом;  $C$  – равновесная концентрация компонентов в растворе;  $K_{\tilde{A}}$  и  $\beta$  – коэффициенты сорбции и распределения соответственно.

Сорбционные процессы имеют принципиальное значение для определения тенденции изменения состояния и физико-механических свойств глинистых грунтов. Накопление солей, которые в водной среде обычно кристаллизуются в форме кристаллогидратов, приводит к снижению влажности грунтов и повышению степени их микро- и макротрещиноватости.

### 3.3. Особенности набухания глинистых грунтов с учетом диффузионных и осмотических процессов

При концентрации фильтрующих растворов ( $C_{\text{ф}}$ ) меньших, чем концентрация «порога осмотической усадки» ( $C_{\text{поу}}$ ), наблюдается набухание глинистых пород. Процесс набухания глинистых грунтов при условии существования разности концентраций между внешним ( $C_{\text{ф}}$ ) и поровым растворами ( $C_{\text{п}}$ ), а также в зависимости от естественной влажности глинистых грунтов имеет свои особенности.

**Диффузионное набухание.** При  $C_{\phi} > C_{п}$  возможно набухание глинистых грунтов за счет диффузии гидратированных ионов из внешнего раствора в поровое пространство глинистых грунтов при естественной влажности, большей, чем влажность набухания. Характер и степень гидратации ионов зависят от их размеров по отношению к размерам молекулы воды, а также от их валентности. Так, например, диффузия молекулы NaCl в ионной форме определяет передвижение с нею 10 молекул воды (шесть молекул с  $Na^+$  и четыре – с  $Cl^-$ ),  $CaCl_2$  – 26 молекул, а  $MgCl_2$  – 62 молекулы (Чижик В. И., 1985). При прочих равных условиях интенсивность диффузионного набухания будет возрастать при взаимодействии глинистых грунтов с растворами одно-, двух- и трехвалентных ионов в последовательности



Величина диффузионного набухания в пределах сравнительно невысоких концентраций  $C_{\phi}$  достигает своего максимума и затем по мере роста концентраций  $C_{\phi}$  начинает уменьшаться. Основной причиной такого снижения диффузионного набухания являются осмотические процессы, которые вызывают отток воды из глинистого грунта под действием градиента концентраций ( $C_{\phi} > C_{п}$ ). Кроме того, по мере повышения концентраций солей в фильтрующемся растворе начинается образование солей в комплексной форме. Электронейтральность этих соединений определяет отсутствие их гидратированности, а при наличии заряда значительный размер таких молекул снижает их гидратированность. Диффузионное набухание глинистого грунта ( $DQ_{наб I}^{H_2O}$ ) зависит от количества воды, поступившей вместе с ионами при их диффузии в грунт ( $Q_{диф I}^{H_2O}$ ) из внешнего раствора, и количества воды, которое ушло из грунта за счет осмотического оттока ( $Q_{осм I}^{H_2O}$ ):

$$DQ_{наб I}^{H_2O} = Q_{диф I}^{H_2O} - Q_{осм I}^{H_2O}$$

Равенство  $Q_{диф I}^{H_2O} = Q_{осм I}^{H_2O}$  определяет сохранение баланса влагосодержания в глинистом грунте и соответственно отсутствие деформаций набухания. Концентрация раствора  $C_{\phi}$  при рассматриваемой ситуации будет отвечать  $C_{поу}$ .

**Диффузионно-адсорбционное набухание** наблюдается в глинистых грунтах, влажность которых меньше влажности набухания и  $C_{\phi} > C_{п}$ . В этом случае при анализе изменения баланса влаги следует рассматривать два варианта процесса:

1. Естественная (начальная) влажность грунтов меньше или равна влажности набухания в пределах пластичности  $W < W_p$ . При таком влагосодержании осмотического оттока влаги из грунта не происходит и количество воды, определяющее интенсивность набухания грунта, зависит от суммарного эффекта ее привноса за счет адсорбционных сил тонкодисперсных частиц ( $Q_{адс I}^{H_2O}$ ) и диффузии гидратированных ионов ( $Q_{диф I}^{H_2O}$ ):

$$DQ_{наб I}^{H_2O} = Q_{диф I}^{H_2O} + Q_{адс I}^{H_2O}$$

2. Естественная влажность больше влажности набухания в пределах пластичности  $W > W_p$ . В этом варианте следует учитывать возможность оттока воды за счет осмотических процессов ( $Q_{осм I}^{H_2O}$ ), и уравнение баланса влаги, поступающей в глинистый грунт и определяющей величину его набухания, имеет вид

$$DQ_{наб I}^{H_2O} = Q_{диф I}^{H_2O} + Q_{адс I}^{H_2O} - Q_{осм I}^{H_2O}$$

Экспериментальные исследования по оценке набухания глинистых грунтов в воде и растворах электролитов позволяют оценить величину набухания за счет диффузии гидратированных ионов. Отмечено, что величина свободного набухания в растворах NaCl увеличивается в 1,5 раза,  $CaCl_2$  – почти в 2 раза, а  $FeCl_3$  – более чем в 3 раза. В той же последовательности возрастает давление набухания при взаимодействии глинистых грунтов с растворами различных солей. Максимальная величина свободного набухания и давление набухания зависят от типа электролита, его концентрации и исходной влажности. Чем сильнее электролит, тем при меньшей концентрации наблюдается постепенное снижение величины набухания. Снижение величины и давления набухания при повышении концентрации взаимодействующего с грунтом раствора ( $C_{\phi}$ ) происходит за счет: 1) уменьшения количества гидратированных ионов и степени их гидратированности при повышении концентрации раствора и уменьшении уровня диссоциации ионов в раство-

ре; 2) преобразования агрегатного состояния грунтов – повышение содержания солей в грунте способствует росту агрегатов. Для раствора FeCl<sub>3</sub> агрегирование грунта наблюдается при засолении более 0,04 %, CaCl<sub>2</sub> – 0,15...0,20 %, а NaCl – 3 %.

При C<sub>ф</sub><C<sub>п</sub> и естественной влажности, меньшей, чем влажность набухания, наблюдается *осмотически-адсорбционное набухание*, когда баланс влаги, поступающей в грунт, будет складываться из следующих составляющих:

$$DQ_{\text{наб } I}^{\text{H}_2\text{O}} = Q_{\text{адс } I}^{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{осм } I}^{\text{H}_2\text{O}} - Q_{\text{диф } I}^{\text{H}_2\text{O}}.$$

При рассматриваемом соотношении разности концентрации солей во внешнем и внутреннем (поровом) растворах наблюдается движение молекул воды из внешнего раствора в глинистый грунт (в сторону больших концентраций), которое рассматривается как осмотический привнос влаги (Q<sub>осм I</sub><sup>H<sub>2</sub>O</sup>). Из глинистого грунта наблюдается диффузия гидратированных ионов (Q<sub>диф I</sub><sup>H<sub>2</sub>O</sup>). Уменьшение содержания солей в процессе диффузии вызывает диспергацию агрегатов в грунте, повышая его удельную поверхность и, как следствие, адсорбционную способность.

Диффузия ионов из порового раствора при C<sub>ф</sub><C<sub>п</sub> будет протекать значительно медленнее, чем диффузия ионов из внешнего раствора в глинистый грунт при условии C<sub>ф</sub>>C<sub>п</sub>. Замедление диффузионного выноса гидратированных ионов из глинистого грунта объясняется взаимодействием глинистых частиц с ионами. Чем большей агрегирующей способностью будет обладать ион, тем легче будет осуществляться его диффузия из грунта.

Если C<sub>ф</sub><C<sub>п</sub> и естественная влажность грунта больше влажности набухания, возможность развития процесса его набухания будет зависеть от осмотического притока воды (*осмотическое набухание*):

$$DQ_{\text{наб } I}^{\text{H}_2\text{O}} = Q_{\text{осм } I}^{\text{H}_2\text{O}} - Q_{\text{диф } I}^{\text{H}_2\text{O}}.$$

Одновременно отмечается диффузия гидратированных ионов из грунта, ведущая к уменьшению концентрации порового раствора (C<sub>п</sub>), что приводит к увеличению степени дисперсности грунта и повышению его адсорбционной способности.

Характер изменения прочности и деформационной способности глинистого грунта, имеющего различную природу, в процессе набухания приведен в табл. 3.

Таблица 3. Влияние набухания различной природы на свойства грунтов

Природа набухания	Характер изменения		В каких глинистых грунтах имеет место данный тип набухания
	прочности	деформационной способности	
Диффузионная	Зависит от увеличения влажности и изменения степени дисперсности; дополнительный привнос	Зависит от изменения степени агрегированности, повышение которой приводит к росту величины модуля общей деформации	Малой степени литификации
Диффузионно-адсорбционная	При высоких концентрациях C <sub>ф</sub> и малой разнице между естественной влажностью и влажностью набухания возможно сохранение постоянства прочности грунта либо даже ее увеличение	Зависит от изменения прочности и пластических свойств грунтов. По мере снижения пластичности модуль общей деформации возрастает	Средней и высокой степени литификации
Осмотически-адсорбционная	Может происходить падение прочности на 80...90 %	Резкое снижение модуля общей деформации при диффузионном выносе солей из грунта	–
Осмотическая	Уменьшение прочности находится в тесной зависимости от увеличения влажности и степени дисперсности	Снижение модуля общей деформации за счет роста ее пластичности и увеличения дисперсности	Малой степени литификации

3.4. Влияние окислительно-восстановительных условий на состояние грунтовой толщи

При геоэкологической оценке влияния окислительно-восстановительной обстановки на геотехнические условия необходимо установить содержание органических соединений, общее количество которых в подземных водах определяется по двум показателям: перманганатная окисляемость (мг  $O_2/л$ ) и бихроматная окисляемость (ХПК) – химическое потребление кислорода (мг  $O_2/л$ )).

Первый из них показывает содержание легкоокисляемой органики, второй – общее содержание органических компонентов. Содержание органической компоненты в грунтах можно оценить по величине органического углерода ( $C_{орг}$ ).

Присутствие органики в подземных водах приводит к формированию восстановительной обстановки в водонасыщенных грунтах. При этом дополнительно должна быть замерена величина окислительно-восстановительного потенциала Eh. В восстановительных условиях при  $Eh \leq 0$  (mV) происходит разрушение цементационных связей за счет соединений трехвалентного железа в глинистых грунтах в процессе его редукции ( $Fe^{3+} + e \rightarrow Fe^{2+}$ ), что переводит грунты в категорию пластически деформирующихся.

Присутствие  $Fe^{2+}$  в грунтах вызывает разрушение агрегатов и повышение содержания тонкодисперсных фракций, сопровождающееся ростом гидрофильности глинистых отложений. Кроме того, наблюдается сорбция органических компонентов на дисперсных частицах, что влияет на снижение угла внутреннего трения. Глинистые грунты в восстановительной среде обычно рассматриваются как квазипластичные разности.

В восстановительной среде при дополнительном загрязнении подземных вод соединениями серы и наличии сульфатредуцирующих бактерий происходит образование сероводорода, который относится к хорошо растворимым газам и формирует резко агрессивную среду по отношению к металлам, железобетону и бетону. В восстановительной среде наблюдаются электрохимические процессы, приводящие к постепенному разрушению (утончению) металлических конструкций, в

частности стенок трубопроводов. Наблюдения показывают, что скорость уменьшения толщины стенок трубопровода может быть от 0,5 до 3,0 мм/год.

В восстановительной среде при контаминации подземных вод и грунтов нефтепродуктами и наличии «богатого» сообщества микроорганизмов возможно образование метана, который относится к малорастворимым газам. Генерация метана обычно происходит на глубинах более 2,0 м при условии, что верхняя толща представлена газонепроницаемыми грунтами. Метан может генерироваться в различных по генезису грунтах. На территории Санкт-Петербурга выделяют зоны природного метаногенеза в микулинских слоях межморенного горизонта в погребенной долине пра-Невы в юго-восточной части города (от моста Александрo-Невского и южнее). Природно-техногенный метаногенез наблюдается в верхней части разреза четвертичной толщи при ее загрязнении органическими соединениями, наличии определенного состава биоценоза и существовании строго анаэробных условий

Содержание органических веществ в подземных водах и грунтах зависит от наличия в разрезе торфов и заторфованных грунтов, а также определяется интенсивностью утечек из систем водоотведения, хранилищ хозяйственно-бытовых отходов и некоторых промышленных предприятий.

Как следует из табл. 4, в составе канализационных стоков на органическую составляющую приходится 58 %.

Таблица 4. Состав канализационных стоков

Загрязняющий компонент	Содержание, мг/л	Примечание
Взвешенные вещества	300...416	Содержание минеральных веществ – 42 %, органических – 58 %. В 1 мл стоков $10^7...10^8$ клеток бактерий
Азот аммонийный	60...130	
Хлориды	70...90	
Фосфаты ( $P_2O_5$ )	12,5...16,0	
Калий ( $K_2O$ )	25	
Окисляемость ( $O_2$ )	35...120	
БПК <sub>20</sub>	291...416	

Вторым по значимости загрязнителем подземных вод и водонасыщенных грунтов при утечках из систем водоотведения служат аммоний. Наличие аммония  $\text{NH}_4^+$  в обменном комплексе глинистых грунтов приводит к диспергации агрегатов, увеличению подвижности поровой воды и, соответственно, повышению их гидрофильности. При наличии  $\text{NH}_4^+$  в обменном комплексе возрастает способность грунтов к набуханию и размоканию. Диспергация грунтов вместе с увеличением их влажности влияет на снижение прочности грунтов и модуля общей деформации.

В пределах городских инфраструктур (например, в Санкт-Петербурге) существующая канализационная сеть служит региональным источником загрязнения основных компонентов подземного пространства, поскольку из 6000 км действующей системы водоотведения свыше 2000 км находятся в неудовлетворительном состоянии.

#### 4. МИКРОБИОТА В ПОДЗЕМНОЙ СРЕДЕ: ЕЕ РОЛЬ И ПОСЛЕДСТВИЯ

В настоящее время доказано, что недра Земли не являются стерильными средами: подземные воды, в том числе глубоких водоносных горизонтов, многие осадочные, а также пористые (не только осадочные, но и изверженные) породы содержат микроорганизмы, причем активность последних определяется средой их обитания. Бактерии, обнаруженные в породах, жидкая составляющая которых содержит такие питательные субстраты, как органические вещества, соединения азота, фосфора и серы, имеют наиболее высокую жизнеспособность и лучшие адаптационные признаки при изменении условий их существования. Живые организмы на больших глубинах в толще обводненных пород рассматриваются как формы древней микрофлоры, постоянно развивающиеся за счет автолитических ферментативных процессов, которые приводят к гидролитическому распаду сложных молекул, а также деструкции токсичных продуктов обмена. Часть бактерий в толще пород, особенно в ее верхней части, может быть принесенной как за счет восходящего перетекания подземных вод с микробиотой через поры и трещины в результате движения

жидких и газовых флюидов, так и нисходящего движения поверхностных и подземных вод, а также инфильтрации и утечек загрязненных стоков.

Особенно велика роль микроорганизмов и продуктов их метаболизма при геотехнической оценке торфов, заторфованных песчано-глинистых отложений, а также относительно молодых осадочных глинистых грунтов, содержащих органическую компоненту. В таких образованиях активно действующая микрофлора формирует специфику происходящих в них биохимических процессов, а также высокий уровень агрессивности среды по отношению к строительным материалам и конструкциям.

Как показывают проведенные исследования, в торфах и заторфованных породах наибольшей активностью обладают аммонифицирующие, сульфатредуцирующие и денитрифицирующие группы микроорганизмов, численность которых может достигать  $10^6 \dots 10^7$  клеток на 1 грамм породы. Меньшее значение имеют целлюлозоразлагающие и тионовые группы бактерий. Микрофлора торфяников может с инфильтрационным потоком проникать на глубину, определяя геотехнические особенности подстилающих песчано-глинистых отложений, а также ряд экзогенных процессов.

Техногенные воздействия на подземное пространство обычно приводят к существенным изменениям всех его компонентов, в том числе и микробиоты. В процессе прогноза трансформации горных пород и грунтов с учетом микробиологического фактора необходимо не только определить численность и виды микроорганизмов, но, прежде всего, оценить функции, которые они могут осуществлять в новых реальных условиях. При этом особое место занимают проблемы изучения интенсификации деятельности микроорганизмов при загрязнении подземных вод различными поллютантами, выявление позитивной роли в самоочищении и саморегуляции состояния подземной среды, а также тех негативных последствий, к которым могут привести рост численности микрофлоры и ее биохимическая деятельность.

Проведенные на кафедре гидрогеологии и инженерной геологии СПбГИ исследования в

основном были сосредоточены на вопросах влияния загрязнения подземного пространства нефтепродуктами и канализационно-бытовыми стоками на активность протекания микробиологических процессов, с которыми связаны самоочищение грунтовых вод и негативная трансформация дисперсных грунтов.

Известно, что даже почвенная микробиота способна преобразовывать нефтяные углеводороды (НУ) – керосин, соляровое масло, мазут. Наши исследования позволили установить, что особенно активна биохимическая деградация НУ в тех районах, где развиты процессы оглеения почв и подпочвенных горизонтов, поскольку в этих условиях присутствует богатый микробиоценоз, предопределяющий его универсальность в отношении утилизации НУ.

Проведенные наблюдения *in situ* за биохимической деградацией НУ убедительно свидетельствуют о том, что этот процесс может идти в анаэробных условиях при наличии разнообразных форм микроорганизмов и необходимом количестве питательных субстратов, прежде всего оптимальном соотношении соединений углерода, азота и фосфора в водной среде.

Биодеградация НУ сопровождается накоплением биомассы в грунтах, активным выделением  $CO_2$  и воды, что приводит к негативному преобразованию песчано-глинистых отложений, прочность которых может снижаться на 50...70 % в течение 2...3 лет (рис. 3).

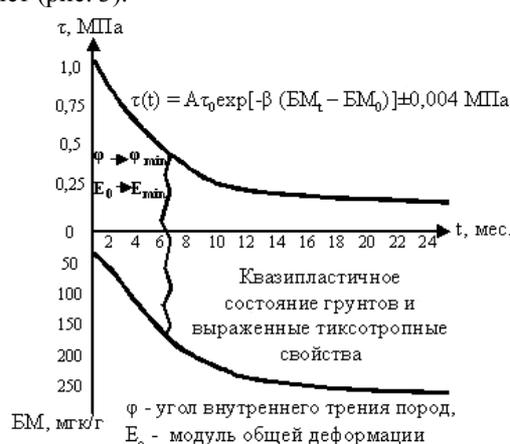


Рис. 3. Изменение прочности ( $\tau$ ) глинистых грунтов в процессе роста бактериальной массы (БМ) во времени ( $t$ )

Активное воздействие на песчано-глинистые грунты оказывают также канализационно-бытовые стоки, привносящие дополнительную микрофлору (см. табл. 4). Эти стоки служат дополнительным источником поступления легко утилизируемых микроорганизмами органических и неорганических компонентов, содержащих соединения азота, серы, фосфора, калия, натрия, микроэлементов, а также белки, липиды, углеводы, тонкие взвеси. Канализационно-бытовые стоки имеют повышенную температуру, ускоряющую развитие биохимических процессов. Исследования, проведенные в разрезе подземного пространства Санкт-Петербурга, где состояние канализационной системы крайне неудовлетворительно, показали высокий уровень микробиологической пораженности песчано-глинистых пород.

При этом средне- и мелкозернистые пески, имеющие коэффициент фильтрации 4...25 м/сут, в зонах их загрязнения вышеназванными стоками становятся практически непроницаемыми: при градиентах напора 15...20 коэффициент фильтрации снижается до  $10^{-2}$ ... $10^{-4}$  м/сут. Удаление загрязняющих компонентов возвращает пески в исходное состояние. Глинистые породы в процессе взаимодействия с канализационными стоками активно набухают, о чем свидетельствуют результаты экспериментальных исследований (см. табл. 5).

Исследования по активизации микробиологической деятельности с применением интегрального показателя содержания суммарного белка микробного генезиса – СБ (Нижеградзе, Пушнова, 1986) были начаты на кафедре инженерной геологии СПбГИ в 1988 г. При этом исследовались: а) закономерности распределения СБ в толще дисперсных грунтов; б) трансформация их состава, состояния и физико-механических свойств; в) развитие негативных газодинамических явлений и пльвунов; г) снижение несущей способности грунтов в основании сооружений; д) резкое возрастание агрессивности подземной среды по отношению к строительным материалам и др. Особенности изменения содержания СБ в разрезах грунтовых водонасыщенных толщ прослеживались и анализировались в зависимости от воздействия следующих техноген-

ных и природных факторов: 1) специфики и длительности загрязнения подземных вод канализационно-бытовыми стоками и нефтепродуктами, а также при смешанном типе контаминации; 2) изменения физико-химических и термодинамических условий подземной среды; 3) воздействия природной радиоактивности в зонах тектонических разломов.

Таблица 5. Параметры набухания глинистых грунтов в воде и канализационных стоках (КС)

Тип пород	Среда взаимодействия	Величина свободного набухания, %	Давление набухания, МПа	Время набухания, сут
Моренный суглинок	КС	14	0,15	42
	Вода	< 1	0	0,01
Нижнекембрийская синяя глина	КС	35	0,47	66
	Вода	8	0,18	0,04

Такие исследования проводились в разрезе подземного пространства Санкт-Петербургского региона, а также на ряде промышленных объектов северо-запада России. В Санкт-Петербурге было проведено обследование разреза территорий, в пределах которых постоянные источники контаминации функционировали в течение 200...250 и более лет (табл. 6). Кроме того, была выявлена специфика распределения СБ в пределах и вне погребенных долин города (табл.7). Значение СБ (мкг/г) для исследованных типов отложений вне зон загрязнения обычно не превышает указанных ниже величин: литориновые (морские) –  $\leq 50$ ; озерно-ледниковые –  $\leq 38$ ; моренные –  $\leq 30$ ; коренные глины венда –  $\leq 10$ .

В петербургском регионе в зонах с активным выделением радона (более 150 Бк/дм<sup>3</sup>) величина СБ в грунтах обычно возрастает в 5...10 раз по сравнению с участками фоновой эксгаляции радона (6...8 Бк/дм<sup>3</sup>). Аналогичное воздействие оказывает температурный фактор. Кроме того, в анаэробных условиях накопле-

ние биомассы происходит более активно, чем в аэробных или в микроаэрофильной обстановке, о чем свидетельствуют результаты полевых и лабораторных замеров окислительно-восстановительного потенциала и соответствующего значения СБ для водонасыщенных грунтов в условиях их загрязнения НУ:

Значение Eh, мВ	+100	+20	-68	-110	-205
СБ, мкг/г	70...110	150...235	225...300	325...700	550...780

На рис. 4 приведены некоторые виды микроорганизмов в загрязненной канализационными стоками и нефтепродуктами четвертичной толще песчано-глинистых грунтов в Санкт-Петербурге (время загрязнения более 250 лет).

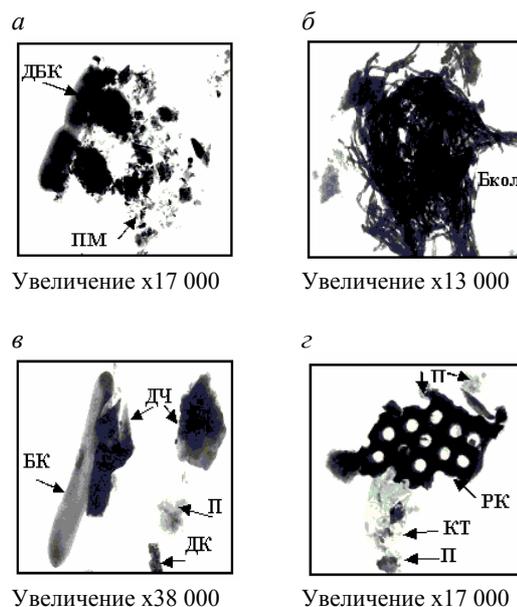


Рис. 4. Форма микробиоты в подземном пространстве Санкт-Петербурга (исторический центр).

Глубина опробования – 6,0...40,0 м:

а – ДБК – делящаяся бактериальная клетка; ПМ – продукты метаболизма; б – Бкол – бактериальная колония из нитевидных культур; в – БК – бактериальные клетки; ДЧ – дисперсная частица грунта; ПМ – продукты метаболизма; ДК – деструктурированная клетка; г – ПК – остатки микроводорослей; КТ – бактериальная клеточная стенка – «клеточная тень»; ПМ – продукты метаболизма;

В настоящее время за рубежом успешно развивается новое междисциплинарное направление – подземная микробиология, основные принципы которой должны применяться в познании закономерностей влияния активизации микробиоты на трансформацию грунтов и развитие экзогенных процессов.

Таблица 6. Значение СБ в разрезе четвертичных отложений в погребенной долине

Литогенетический тип пород	Содержание СБ, мкг/г, в следующих зонах	
	Высокий уровень загрязнения канализационными (>200 лет) и нефтепродуктами (>60 лет)	Низкий уровень загрязнения канализационными (≈ 25 лет) и нефтепродуктами (≈20 лет)
<i>Литоринные отложения</i>		
Супесь с органикой	<u>95...185</u> 114(24)	-
Пески с органикой	<u>99...144</u> 105(19)	-
<i>Озерно-ледниковые отложения</i>		
Суглинок	<u>90...189</u> 140(33)	<u>60...120</u> 90(25)
Ленточные глины	<u>120...280</u> 210(57)	<u>75...150</u> 110(25)
<i>Моренные отложения (валдайское оледенение)</i>		
Суглинок	<u>80...265</u> 195(60)	<u>63...98</u> 83(30)

Таблица 7. Значения СБ в разрезе коренных глин венда

Морфологическое положение коренных глин	Содержание СБ, мкг/г, в следующих зонах		Глубина залегания коренных глин
	Высокий уровень загрязнения	Низкий уровень загрязнения	
Вне палеодолин	<u>101...275</u> 183(15)	<u>20...40</u> 30(8)	27
Склон палеодолин	<u>97...234</u> 160 (12)	<u>68...89</u> 77 (8)	40
Тальвег палеодолин	-	<u>71...92</u> 80(9)	110

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Человек в процессе своей деятельности создает природно-техногенные системы (ПТС), которые функционируют не по законам, предписанным природой, а по законам, которые начинают действовать в зависимости от интенсивности нарушения природного равновесия и реакции подземной среды на такое воздействие. При этом реактивное сопротивление подземной среды может протекать по следующим сценариям:

1. Приспособление подземной среды через ряд последовательных изменений, происходящих на микро- и макроуровнях, в том числе к новому напряженному состоянию, изменению физико-химических условий, новой биохимической обстановке, температурному режиму.

2. Достижение нового равновесного состояния, но при условии значительного преобразования компонентов подземного пространства. При этом существует возможность нормального функционирования ПТС. Такой сценарий может развиваться только при идеально выполненном количественном прогнозировании практически всех процессов, которые могут привести к последствиям, пагубным для нормального функционирования техногенной системы (сооружений или комплекса сооружений).

Такой сценарий предполагает временные нарушения работы ПТС, которые могут быть ликвидированы в процессе ее эксплуатации с малыми материальными потерями.

Проблема загрязнения (контаминации) подземной среды и анализ вопросов ее саморегуляции и самоочищения должна рассматриваться как одна из наименее изученных в геоэкологии применительно к решению геотехнических задач. При этом под саморегуляцией подземной среды понимается поддержание постоянства свойств ее отдельных компонентов либо изменение по требуемому (заданному) закону тех констант или параметров, которые имеют основополагающее значение при анализе стабильности работы ПТС.

Следовательно, необходимо исследовать и познать те законы, которые управляют подземной средой при действии реальной (конкретной) техногенной нагрузки.

В данном случае следует рассмотреть и проанализировать те свойства подземной среды, которые могут привести к ее самоочищению, являющемуся одним из главных (базовых) положений природы самоуправления процессами, обеспечивающими квазистабильность геэкологической обстановки.

Загрязнение подземной среды рассматривается с позиции привноса поллютантов различного генезиса и микробиоты, адаптирующейся к существующим условиям.

Загрязнение подземной среды, в первую очередь, подземных вод и грунтов, происходит за счет привноса органических и неорганических контамитантов. При этом органические загрязнители следует разделять на биотические и абиотические, а также на токсичные и нетоксичные по отношению к микробиоте. Нетоксичные поллютанты часто служат питательным и энергетическим субстратом для микробиоты, которая может развиваться по двум направлениям, вызывающим различные и неадекватные преобразования компонентов подземной среды.

Первое из них – энергетический путь развития микробиоты, которая обычно фиксирует их позитивную деятельность (деградацию органических загрязнителей, управляемую газогенерацию, выработку полезных компонентов, например, природных антибиотиков, и др.) без роста их биомассы.

Второе направление – позитивная деятельность микробиоты по самоочищению подземной среды, которая сопровождается накоплением бактериальной массы, состоящей в основном из большого количества продуктов метаболизма клеток и депонирования массы мертвых и живых микроорганизмов.

При развитии биохимических процессов по второму варианту сохранить равновесие ПТС можно при тщательно выполненной прогнозной оценке влияния количественного содержания бактериальной массы на водопроницаемость, водоотдачу, параметры сопротивления сдвигу и деформационные характеристики грунтов. При этом необходимо выполнить исследования возможной потери несущей способности грунтов в основании сооружений и, соответственно, их конструкции должны быть приспособлены к новому состоянию грунтов. Подобные прогнозы могут быть выполнены только в процессе проведения специальных экспериментальных исследований в полевых и лабораторных условиях либо с помощью специального моделирования.

Следует также обращать внимание на обоснование выбора строительных материалов и их защиту от биокоррозии в подземной среде при строительстве и реконструкции зданий и сооружений.