

№2, 2000

Геотехническая диагностика коренных глин Санкт-Петербургского региона (на примере нижнекембрийской глинистой толщи)

Р.Э.Дашко

В южной части Большого Санкт-Петербурга непосредственно под маломощным чехлом четвертичных отложений залегает толща нижнекембрийских синих глин лонтовасской свиты.

Достоверная геотехническая и геоэкологическая оценка этих отложений имеет принципиальное значение, поскольку они рассматриваются и используются как объект многоцелевой инженерной деятельности: а) в качестве естественного основания сооружений различного назначения; б) как среда размещения тоннелей метрополитена в южных районах города; в) как геологическая формация для захоронения опасных промышленных, в том числе радиоактивных, отходов и др.

Прогноз трансформации состава, состояния и физико-механических свойств синих глин при их взаимодействии с наземными и подземными сооружениями тесно связан с решением практических задач - предупреждением негативных изменений основных компонентов геологической среды, определяющих надежность и безопасность функционирования действующих предприятий, а также их влияния на природную обстановку. Поскольку толща синих глин является региональным водоупором, то ее использование для инженерно-хозяйственных целей определяет необходимость изучения метастабильности глин при изменении напряженного состояния, физико-химических, биохимических и термодинамических условий с целью предупреждения загрязнения нижележащего ломоносовского водоносного горизонта, используемого для водоснабжения. Следует отметить, что глубокая трансформация этих глинистых пород может привести не только к необратимым экологическим последствиям, но и серьезным авариям сооружений в случае применения специфических технологических режимов их эксплуатации. Достоверность прогноза преобразований глин этой формации во взаимодействии с сооружением во многом зависит от знания особенностей их формирования, которые определяют вещественный состав, состояние, физико-механические свойства и строение толщи *in situ*.

Как известно, нижнекембрийские глины в исследуемом регионе относятся к морским образованиям и, согласно Н.М.Стахову, выделяются в особый класс отложений - гемипелагических синих глин, формирование которых происходило в выраженной восстановительной обстановке. Такая среда способствовала генерации сероводорода и образованию сульфидов. В таких условиях по данным многочисленных исследований отмечается формирование минералов группы гидрослюд и в малых количествах присутствуют минералы типа монтмориллонита.

Накопление исходного осадка синих глин имело место в спокойной тектонической обстановке, о чем свидетельствует выдержанность мощности толщи по площади (80-100м), отсутствие складок подводного оползания, а также ярко выраженной слоистости.

Катагенетические преобразования синих глин происходили за счет комплекса следующих процессов: 1) гравитационного уплотнения осадков под действием давления перекрывающих пород; 2) действия тектонических сил в области сочленения Русской платформы с Балтийским щитом; 3) изменения термодинамических и физико-химических условий по мере погружения толщи пород на глубину и формирования цементационных связей при повышении концентраций солей поровых растворов.

Более поздние по возрасту отложения, ниже- и верхнепалеозойские, мощность которых достигала 300-350 м, создавали дополнительное давление 6-7 МПа на синие глины. Однако, такие нагрузки были недостаточны, чтобы значительно уплотнить и, соответственно, дегидратировать мощную толщу глинистых отложений. По всей видимости, ведущую роль в уплотнении глинистого осадка сыграли тектонические силы, активно действующие в регионе сочленения Русской платформы с Балтийским щитом.

Процессы прогрессивного катагенеза синих глин сменялись длительными периодами разгрузки и регрессивных литогенетических преобразований пород. Первый этап регрессивного литогенеза связан с периодом образования Балтийско-Ладожского уступа (глинта), который по данным ряда исследователей рассматривался как результат тектонических движений в доледниковое время. Синие глины предглинтовой зоны в этот период времени испытали разуплотнение за счет разрушения и размыва вышележащих пород.

В ледниковый период глинистая толща оказалась под мощным ледниковым покровом (более 1000 м). При этом в течение всего периода оледенения уже сформировавшиеся синие глины подвергались нескольким циклам разгрузки - нагрузки, отвечающим периодам оледенения и межледниковым стадиям.

В последниковое и в настоящее время рассматриваемые отложения в Санкт-Петербургском регионе находятся на стадии регрессивного литогенеза. Как уже отмечалось ранее, они залегают под маломощным чехлом четвертичных отложений различного генезиса (моренных, озерно-ледниковых и техногенных), либо выведены на дневную поверхность.

Одной из основных особенностей строения толщи синих глин предглинтовой зоны является трещиноватость, формирование которой тесным образом связано с историей их развития и определяется влиянием тектонических и нетектонических факторов.

Активность тектонического фактора и соответственно трещинообразование обусловлено положением данного региона, который, как уже указывалось выше, находится на сочленении Русской платформы с Балтийским щитом. Тектонические трещины образуют в синих глинах две системы северо-западного и северо-восточного простирания, угол между которыми составляет практически 90° . Кроме того, отмечаются также тектонические трещины субширотного и субмеридионального направления. Падение трещин вертикальное, либо крутопадающее под углом $70-80^\circ$. Тонкие трещины в толще синих глин иногда заполнены порошкообразным пиритом (мельниковитом). В трещинах могут встречаться также пленки и щетки мелкокристаллического гипса, образование которого связано со стадиями регрессивного литогенеза.

Интенсивность тектонической трещиноватости в толще синих глин неодинаковая, и наиболее активно она проявляется в так называемых тектонических узлах - местах пересечения тектонических разломов.

В толще синих глин отчетливо прослеживается литогенетическая трещиноватость, причем мощность слоев между отдельными горизонтальными трещинами уменьшается от подошвы к кровле этих отложений.

Система тектонических и субгоризонтальных литогенетических трещин формирует блочное строение толщи синих глин.

Нетектоническая трещиноватость, в основном, характерна для верхней зоны разреза синих глин, и ее формирование происходило как на стадии прогрессивного, так и регрессивного литогенеза. На стадиях регрессивного литогенеза, когда глинистая толща испытывала разгрузку, в верхней зоне разреза синих глин шло образование трещин упругого отпора и

выветривания при знакопеременном воздействии температур, за счет кристаллизации новообразований, таких как гипс, который формировался при окислении пирита и марказита при инфильтрации по трещинам растворов, содержащих соединения кальция. В ледниковый период формирование трещин происходило за счет морозобойного растрескивания (клиновидные трещины, прослеживающиеся до глубины 20-25 м), морозного выветривания (микротрещиноватость), а также гляциотектоники. Исследования показали, что гляциотектонические трещины образуют три системы трещин, одна из которых имеет простирание по направлению движения ледника, а две другие - перпендикулярно ей. Интенсивность появления трещин разгрузки и выветривания тесно связано с действием тектонического и гляциотектонического факторов. В зонах тектонических нарушений, где отмечается высокая степень дезинтегрированности синих глин, фиксируется наибольшая глубина зон выветривания и разрушения. Нетектоническая трещиноватость накладывается на тектоническую, создавая мелко- и крупнообломочное строение толщи синих глин с различной степенью раскрытия трещин.

Таким образом, история формирования синих глин в доледниковое, ледниковое и послеледниковое время определило их современное состояние, состав и физико-механические свойства, которые различаются по разрезу толщи. Следовательно, необходимо учитывать зональное строение синих глин по глубине в процессе их геотехнической оценки.

В то же время синие глины характеризуются однородностью минерального и гранулометрического состава. В тонкодисперсной части этих глин присутствуют гидрослюды, хлорит, гидрохлорит, глауконит, пирит, редко монтмориллонит. В верхней части разреза до глубины 15-20 м преобладают сильнощелочные гидрослюды, которые весьма неустойчивы при изменении физико-химических условий за счет высокого содержания двухвалентного железа и щелочноземельных элементов. По мере увеличения глубины в составе синих глин возрастает содержание монтмориллонита и постепенно исчезает щелочная слюда.

По гранулометрическому составу эти отложения классифицируются как глины алевритовые (пылеватые), реже глины тяжелые алевритовые, отмечается достаточно высокая степень агрегированности глинистых и мелкопылеватых частиц.

Несмотря на высокое содержание глинистой фракции синие глины имеют небольшую величину емкости обмена - $10,3-12,5 \text{ мг}^{-\text{экв.}}/100\text{г}$, что объясняется наличием достаточного количества органических соединений, в том числе и битумов, которые образуют органические пленки на тонкодисперсных зернах породы, снижая их сорбционную и обменную способность.

По варьированию плотности и влажности синих глин в разрезе можно оценить ту глубину, в пределах которой наблюдалась гидратация и соответственно набухание и разуплотнение глин (табл.1).

Таблица 1

Изменение степени трещиноватости, влажности и плотности синих глин по глубине.

Выделяемые зоны	№ слоев	Глубина от кровли глин, м.	Размер блоков, м.	Диапазон изменения величины	
				Влажности, %	Плотности, г/см ³

I Переменной влажности и плотности.	1	0-3	0,08-0,25	23-28*	1,97-2,08
				25-32**	1,96-2,04
	2	3-10	0,25-0,40	21-25	2,10-2,22
				22-29	1,98-2,08
	3	10-20	0,38-0,60	17-21	2,20-2,23
				19-26	2,00-2,20
II Квазипостоян- ной влажности и плотности.	4	20-30	0,40-0,85	16-20	2,20-2,25
				18-24	2,02-2,21
	5	30-40	0,60-0,90	16-19	2,18-2,23
				17-23	2,02-2,21
	6	>40	1,0-1,40	15-18	2,18-2,23
				17-23	2,02-2,21

Примечание: * варьирование значения параметра вне зон тектонических разломов, ** - в зонах тектонических разломов.

Наибольшее значение влажности характерно для первых десяти метров разреза глин. Ниже этой глубины влажность пород постепенно уменьшается, с глубин 17-20 м она изменяется в узком пределе - 15-18%. Относительно высокая естественная влажность в интервале глубин 0-20 м объясняется набуханием глинистых пород при их дополнительном увлажнении при снятии внешнего давления, ниже указанной глубины влияние дополнительной гидратации этих глин не проявляется, поскольку их давление набухания редко превосходит 0,35 МПа. Следовательно, ниже глубины 20 м влажность и плотность синих глин должны характеризовать их естественное физическое состояние, присущее разрезу зоны прогрессирующего литогенеза нижнекембрийских глин района Санкт-Петербурга. Для пород с влажностью менее 18% показатель консистенции обычно имеет отрицательные значения, что позволяет характеризовать их как твердые разности. Малая влажность и высокая плотность этих отложений позволяет отнести нижнекембрийские синие глины ниже глубины 20 м к высоколитифицированным разностям.

Таким образом, по характеру изменения величин влажности и плотности можно выделить две зоны: до глубины 20 м - зона переменной влажности-плотности, ниже - зона постоянной влажности-плотности.

Интенсивность трещиноватости убывает по глубине, и соответственно размеры блоков породы возрастают по глубине разреза. В верхней зоне, где влажность и плотность глины варьируют, можно выделить три слоя, отличающиеся не только интервалом изменения влажности и плотности, но и размером блоков. В верхней зоне глин трудно проследить систему трещин, поскольку в их формировании основную роль играли нетектонические факторы (разуплотнение, выветривание, воздействие оледенения). Следует отметить, что влияние тектоники и гляциотектоники проявляется ниже глубины зоны выветривания и гидратации (4 и 5 слой согласно табл.1). С ростом глубины размер блоков возрастает как в

зоне переменной, так и постоянной влажности (см. табл.1).

Определенные закономерности имеет также варьирование прочности и деформационной способности синих глин по глубине. Если в верхней зоне основное влияние на механические свойства глин оказывают их трещиноватость и влажность, то в нижней зоне, где породы характеризуются относительным постоянством физического состояния, решающее значение в оценке прочности приобретает микро - и макротрещиноватости. При анализе и оценке прочности литифицированных глинистых пород большое значение имеет макротрещиноватость, которая не фиксируется визуально, но определяет результаты трехосных испытаний синих глин верхней зоны при возможности их бокового распора (см. табл.2).

Таблица 2

Сравнительная характеристика деформационной способности синих глин по результатам трехосных испытаний.

Положение точек отбора образцов	Глубина от кровли глин, м.	Параметры прочности		Модуль общей деформации, Ео МПа
		С, Мпа	fi, град	
Вне зон тектонических нарушений	0,0-3,0	0,035-0,05	0	15-20
	3,0-8,0	0,075-0,17	0-2	19-24
	8,0-17,0	0,220-0,34	6-8	20-25
В зоне тектонических нарушений	0,0-3,0	0,027-0,04	0	1,5-2,2
	3,0-5,0	0,034-0,078	0-4	3,0-6,6
	5,0-8,0	0,150-0,19	0-6	6,2-10,5

Примечание: Площадь образцов $F=25-26 \text{ см}^2$.

Разрушение образцов, отобранных из верхней зоны синих глин вне зон тектонических разломов, имеет хрупко-пластический характер разрушения, а из зон тектонических узлов - только пластический, в определенных случаях наблюдается разрушение образцов по уже существующим макротрещинам.

Как следует из анализа данных табл.2, наибольшее влияние трещиноватость оказывает на величину модуля общей деформации, что необходимо учитывать при проектировании наземных сооружений по второму предельному состоянию. Строительство сооружений в зонах тектонических разломов может привести к развитию значительных и неравномерных осадок и, соответственно, возникновению аварийных ситуаций.

В синих глинах отчетливо прослеживается влияние масштабного эффекта, о чем свидетельствуют результаты испытаний образцов различного размера (объема) при одинаковом отношении их высоты к диаметру (табл.3).

Таблица 3

Влияние масштабного эффекта на прочность и деформационную способность синих глин
(глубина отбора образцов 3-10 м).

Площадь образца, см ²	20-26,5	40-48	98
Прочность на одноосное сжатие, МПа	0,70-0,92*	0,24-0,50	0,105-0,140
	0,81/6**	0,34/7	0,12/5
Модуль общей деформации, МПа	14-20	8-10	3-6
	16/6	8,5/7	4/5

Примечание: * - минимальное - максимальное значение показателя, ** - среднее значение показателя / число определений.

Наиболее интенсивно проявляется масштабный эффект в образцах глин, отобранных из зон тектонических нарушений.

Следует также отметить, что при испытании образцов с площадью около 100 см², значения параметров прочности и деформационной способности глин весьма близки по величине к тем же показателям, полученных методом обратных расчетов при анализе аварийных ситуаций - разрушении зданий, построенных на синих глинах.

Обработка данных по исследованию масштабного эффекта дает возможность аппроксимировать эти результаты в виде экспоненциальной зависимости:

$$R = R_{\max} \exp(k(F_{\min}/F_{\max}) - 1)$$

R - прочность образца на одноосное сжатие с площадью поперечного сечения F;

R_{max} - максимальная прочность образцов на одноосное сжатие;

F_{min} - минимальная площадь исследуемых образцов;

k - эмпирический коэффициент, в данном случае близок к 1 (0,98).

Наличие трещиноватости синих глин предопределяет величину и характер их проницаемости. В лабораторных условиях максимальная величина поровой проницаемости этих пород достигает 10⁻⁵ м/сут, с учетом трещиноватости этот показатель возрастает на 2-3 порядка и более. Учитывая активность взаимодействия синих глин с агрессивными стоками, необходимо иметь в виду возможность глубокой трансформации толщи под влиянием различного вида утечек, в том числе канализационных стоков и жидких промышленных отходов. Под воздействием физико-химических и биохимических процессов эти глины способны превращаться в слабые разности, несущая способность которых может соответствовать современным глинистым отложениям.

В свете вышеизложенного, следует пересмотреть принципиальные подходы к оценке этих глинистых пород, которые существуют в настоящее время в практике геотехнических и геоэкологических исследований.

Аналогичный подход должен проводиться и для верхнекотлинских глин венда, которые являются более древними образованиями по сравнению с синими глинами и служат средой размещения подземных станций и перегонных тоннелей метрополитена в Санкт-Петербурге.