

Э. ПИРРУС, Лейли СААРСЕ

## ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕМБРИЙСКИХ ГЛИН СЕВЕРНОЙ ЭСТОНИИ

Глинистые породы нижнего кембрия представляют верхний этаж коренного ложа во многих городах предглинтовой низины республики, ввиду чего крупные строительные объекты очень часто врезаются в эти породы. Поэтому изучение физико-механических параметров строительного основания данного типа имеет важное значение. К сожалению, опубликованный до сих пор материал по этому вопросу весьма скуден (Olli, 1962). Однако к настоящему времени в Эстонии уже накопился достаточный опыт по проектированию и строительству на кембрийские глины, а в лабораториях ГПИ «Эстпромпроект» и «Эстонпроект» проведены многочисленные испытания, позволяющие подвести некоторые итоги и сделать обобщения. Ниже представляется обобщенный материал по основным физико-механическим свойствам кембрийских глин Северной Эстонии, изученным в последние годы по единой методике (частично и одним из авторов).

Как известно, кембрийские отложения, выходящие перед глинттом, представлены сверху алевролитами тискреской свиты, а затем преобладающими глинами люкатиской и лонтоваской свит (Менс, Пиррус, 1977). При этом глинистые толщи существенно различаются между собой. В верхней, люкатиской свите мощностью до 20 м глины зеленовато-серого цвета образуют более выдержанные пласты (1—3 м) лишь в нижней части разреза. В остальной части свиты регулярно встречаются крепкоцементированные прослои алевролитов, которые придают породам специфические свойства и значительно уменьшают при этом значения характеристик, свойственных глинистым породам. Однако наиболее верхние слои люкатиской свиты являются, как правило, водупором для грунтовых вод, циркулирующих в вышележащих отложениях, и поэтому нередко сильно разжижены и вторично разуплотнены. Такие слои требуют при проектировании особого внимания, и в настоящей работе данные по основным их свойствам приведены отдельно от данных по остальной части свиты.

Нижележащая, лонтоваская свита представлена толщей однородных глин мощностью 70—80 м. Прослои песчаников появляются лишь в самых низах ее (сямиская пачка), находящихся на глубине 60—100 м, и поэтому редко соприкасаются со строительными объектами. Однако западнее Локса, в верхней части (первые метры) свиты (таммнеэмская пачка) проявляются также единичные прослои крепкоцементированных алевролитов, которые сближают эту часть разреза с отложениями люкатиской свиты и приводят к заблуждению при разграничении этих двух свит. Основная, средняя часть лонтоваской свиты (50—60 м) представлена

однородными сравнительно высокодисперсными глинами. Верхняя, кест-лаская пачка характеризуется преимущественно фиолетово-пестроокрашенными глинами, нижняя, махуская — зеленовато-серыми более алевроитовыми глинами. Из-за отсутствия отчетливой слоистости и прослоев пород другого состава глинистая толща лонтоваской свиты — собственно «синие глины» — обладает большой выдержанностью основных физико-механических параметров как по вертикали, так и по латерали.

Из сказанного следует, что при инженерно-геологических изысканиях весьма важно разграничивать обе вышеотмеченные свиты. Это не всегда легко, ибо пограничный конгломерат из фосфатизированных галек встречается не повсеместно (Лоог и др., 1966; Менс, Пиррус, 1975). В восточных районах республики надежным критерием служит кровля пестроокрашенных глин кестлаской пачки, которая располагается обычно на 0,5—2,0 м ниже подошвы люкатиской свиты. В западных районах следует пользоваться палеонтологическими данными: заменой руководящих окаменелостей *Platysolenites* в лонтоваской свите остатками *Volborthella* в люкатиской свите, а также исчезновением изобилия пиритизированных ходов илоедов при смене лонтоваской свиты люкатиской. Другие особенности строения рассматриваемых свит в настоящее время достаточно освещены в литературе (Pirrus, 1973; Менс, Пиррус, 1977).

Гранулометрический состав лонтоваских глин довольно однороден. При обобщении данных 286 гранулометрических анализов, выполненных путем дезинтеграции пород обычно применяемыми в инженерной геологии методами, выявлено, что в составе изученных отложений явно превалирует фракция 0,05—0,002 мм, в 57—64% случаев (табл. 1). При этом частицы размером 0,01—0,002 мм преобладают над

Таблица 1

Гранулометрический состав и основные физические свойства кембрийских глин

Глины		Содержание фракции, %				Плотность минеральных частиц, г/см <sup>3</sup>	Объемная масса, г/см <sup>3</sup>	Объемная масса скелета, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Коэффициент пористости
		2—0,05 мм	0,05—0,01 мм	0,01—0,002 мм	<0,002 мм					
<b>Люкатиская свита</b>										
Разуплотненные выветрелые										
	$\bar{x}$	12,0	32,2	24,7	31,1	2,73	2,03	1,68	38,3	0,63
	мин.	0	15,0	5,2	9,5	2,69	1,74	1,35	28,1	0,39
	макс.	48,1	52,7	39,2	54,1	2,75	2,23	1,97	50,9	1,04
Неизмененные										
	$\bar{x}$	16,2	33,2	22,0	28,6	2,74	2,18	1,89	31,1	0,46
	мин.	0	2,3	2,4	7,0	2,64	1,91	1,59	19,4	0,24
	макс.	68,0	59,4	50,9	49,3	2,94	2,39	2,21	43,0	0,68
<b>Лонтоваская свита</b>										
Неизмененные										
	$\bar{x}$	6,4	24,8	35,2	33,6	2,75	2,24	1,96	29,5	0,42
	мин.	0	0,1	2,8	11,0	2,66	1,95	1,52	19,0	0,20
	макс.	53,5	61,6	63,7	54,4	2,88	2,39	2,26	43,0	0,82

частицами 0,05—0,01 мм. Песка во всех пробах менее 10% и он представлен лишь мелкозернистой фракцией или аутигенными образованиями (агрегатами пирита и глауконита). Следовательно, глины лонтоваской свиты, по усовершенствованной классификации Н. Н. Охотина (Ломтад-

зе, 1970), могут быть рассмотрены как собственно глины (70,8%) или суглинки (29,2%).

Присутствие в глинах люкатиской свиты значительного количества рассеянного алевритового и песчаного материала обуславливает большую гранулометрическую изменчивость этих глин (табл. 1). Глинистой фракции в них в среднем на 5% меньше, а грубозернистой ( $>0,05$  мм) на 9% больше, чем в лонтоваских глинах. Таким образом, они чаще всего соответствуют суглинкам или даже супесям. Четкой направленности в изменениях дисперсности глин в региональном плане не наблюдается.

Плотность минеральных частиц лонтоваских глин меняется в очень узких пределах, что хорошо согласуется с данными о постоянстве минерального состава глинистой фракции этих пород в разрезах (Пиррус, 1970).

Изменения в плотности минеральных частиц люкатиской свиты более значительны, что объясняется их составом: глины люкатиской свиты содержат кластогенные зерна кварца, пирита, глауконита и др. минералов больше, чем глины лонтоваской свиты. Процессы последующего гипергенеза мало изменили первичный минеральный состав этих глин, о чем свидетельствует близкое среднее значение плотности как выветрелой ( $2,73$  г/см<sup>3</sup>), так и невыветрелой ( $2,74$  г/см<sup>3</sup>) частей разрезов.

Объемная масса и объемная масса скелета лонтоваских глин указывают на значительную уплотненность их, что обусловлено нагрузкой вышележащих толщ, достигающей, по расчетам В. Д. Ломтадзе (1958), 6—7 МПа в течение полумиллиарда лет. Однако пределы изменения крайних значений объемной массы и объемной массы скелета довольно широки, что говорит о значительной изменчивости локальных условий постседиментационного уплотнения глины.

Существенного различия по плотности между глинами предглинтовой низины и более южных районов не наблюдается. В некоторых разрезах (Нарва) на глубине около 70 м отмечается скачкообразное увеличение плотности, что совпадает с изменением гранулометрического состава глин на рубеже контакта кестлаской и махуской пачек, т. е. с увеличением роли алевритового материала ниже этой границы. Изменениями в дисперсности глин объясняется, по-видимому, и наблюдаемое уменьшение плотности породы по направлению к востоку: в районе Нарвы, где распространяются самые высокодисперсные разновидности глин, объемные массы породы и скелета заметно занижены ( $2,16$  и  $1,86$  г/см<sup>3</sup>).

Плотность глин люкатиской свиты значительно меняется как пространственно, так и с глубиной. В предглинтовой зоне, где глины покрыты лишь шлейфом четвертичных наносов и время от времени смачиваются морской или дождевой водой, верхняя часть люкатиских глин мощностью 2,0—2,5 м характеризуется заниженными значениями объемной массы и объемной массы скелета: в окрестностях Тойла, Азери и Сака эти показатели соответственно  $1,99$  и  $1,63$  г/см<sup>3</sup>. В Таллине вторичные процессы почти не улавливаются — объемная масса глины верхней части свиты составляет  $2,10$  г/см<sup>3</sup>, объемная масса скелета —  $1,76$  г/см<sup>3</sup>. В пределах карбонатного плато, где кембрийские глины перекрываются ордовикскими породами, признаки вторичного разуплотнения не обнаруживаются или выражены очень слабо в верхних слоях люкатиской свиты (0,2—0,3 м).

Показатели пористости изученных глин дают в общих чертах ту же информацию, которую дает плотность породы: пористость невыветрелых глин обеих свит весьма близка, в разуплотненных разновидностях она заметно возрастает.

Таблица 2

## Консистенция и водные свойства кембрийских глин

Глины		Естественная влажность, %	Коэффициент насыщения	Предел текучести	Предел пластичности	Число пластичности	Коэффициент фильтрации, м/сут	Макс. молекулярная влагоемкость, %	Макс. гигроскопическая влагоемкость, %	Полная влагоемкость, %	Величина набухания, %	Влажность набухания, %
<b>Люкатиская свита</b>												
Разуплотненные выветрелые												
	$\bar{x}$	21,1	0,95	0,42	0,24	0,19	$10 \cdot 10^{-6}$	—	—	—	7,8	29,8
	мин.	15,3	0,70	0,25	0,16	0,06	$2,7 \cdot 10^{-6}$	—	—	—	5,1	5,2
	макс.	29,6	1,00	0,55	0,31	0,30	$9,3 \cdot 10^{-12}$	—	—	—	10,5	33,7
Неизменные												
	$\bar{x}$	15,3	0,92	0,32	0,18	0,14	$13,0 \cdot 10^{-9}$	14,8	7,0	15,7	14,2	13,8
	мин.	6,0	0,51	0,19	0,14	0,05	$1,39 \cdot 10^{-9}$	10,0	6,5	14,6	0,3	3,0
	макс.	26,0	1,00	0,59	0,30	0,36	$29,8 \cdot 10^{-9}$	23,0	7,9	17,6	33,3	23,8
<b>Лонтоваская свита</b>												
Неизменные												
	$\bar{x}$	14,6	0,95	0,43	0,25	0,17	$4,63 \cdot 10^{-9}$	17,3	8,1	13,8	10,5	18,2
	мин.	7,5	0,71	0,24	0,16	0,07	$1 \cdot 10^{-12}$	12,0	3,8	10,8	1,2	11,3
	макс.	28,0	1,00	0,53	0,34	0,28	$28,8 \cdot 10^{-6}$	22,0	11,3	20,5	31,4	40,0

Естественная влажность находится также в тесной корреляции с плотностными характеристиками. Лонтоваские глины на значительной глубине отличаются наименьшей влажностью (табл. 2). Наиболее часто влажность этих пород находится в пределах 12—14%. В окрестностях Нарвы лонтоваские глины более увлажнены (в среднем 16,9%).

Естественная влажность плотной, невыветрелой части глин люкатиской свиты мало отличается от влажности вышеприведенных глин. В то же время верхние слои люкатиской свиты, являющиеся водоупором для вендо-кембрийского водоносного горизонта, содержат влаги примерно в 1,4 раза больше, чем нижние.

Консистенция плотных кембрийских глин всегда твердая, а выветрелых и вторично измененных разностей — пластичная. Сравнительно высокая пластичность лонтоваских глин по сравнению с пластичностью люкатиских обусловлена большим содержанием глинистых частиц. По значениям пластичности 57% изученных лонтоваских глин принадлежит к глинам, 43% — к суглинкам. Из люкатиских глин лишь 38% относится к глинам, 57% — к суглинкам. Сопоставление этих данных с данными гранулометрического состава обнаруживает, что по пластичности кембрийские глины относятся к более легким типам грунтов, которые характеризуются пониженной активностью при взаимодействии с водой.

Максимальная молекулярная влагоемкость лонтоваских (16—17%) и люкатиских (14%) глин умеренная, полная влагоемкость близка к естественной влажности, а коэффициент фильтрации очень незначителен (табл. 2). Судя по величине и влажности набухания, кембрийские глины довольно устойчивы при взаимодействии с водой. Исключение составляют отдельные прослои глин на различных глубинах, и особенно, в верхних частях люкатиской свиты, обладающие аномально сильной набухаемостью при влажности набухания до 40%. Так как увеличение влажности набухания сопровож-

дается одновременным увеличением влажности на пределе пластичности, то можно предполагать возникновение в этих глинах некоторых минеральных фаз с частично разбухающей кристаллической решеткой. Изученные кембрийские глины неодинаково подвергаются размоканию, что, вероятно, является следствием их неравномерной литификации.

По коэффициенту сжимаемости глины лонтоваской и люкатиской свит являются слабо- и реже среднесжимаемыми (табл. 3). Коэф-

Таблица 3

Механические свойства кембрийских глин

Глины		Коэффициент сжимаемости, $МПа^{-1}$	Модуль общей деформации, $МПа$	Модуль упругости, $МПа$	Коэффициент Пуассона	Коэффициент бокового давления	Прочность на одностороннее сжатие, $МПа$	Прочность на растяжение, $МПа$	Угол внутреннего трения, град	Слепление, $кПа$
<b>Люкатиская свита</b>										
Разуплотненные выветрелые	$\bar{x}$	0,23	4,6	—	—	—	1,83	—	0,33	28
	мин.	0,06	2,0	—	—	—	0,27	—	0,16	0
	макс.	0,50	11,0	—	—	—	4,40	—	0,60	94
Неизменные	$\bar{x}$	0,05	12,5	9,8	0,19	0,25	2,12	0,14	0,40	12
	мин.	0,01	4,0	5,4	0,11	0,12	0,36	0,10	0,21	0
	макс.	0,13	35,0	14,2	0,28	0,39	7,23	0,18	0,78	140
<b>Лонтоваская свита</b>										
Неизменные	$\bar{x}$	0,05	14,9	22,2	0,23	0,30	3,40	0,56	0,53	105
	мин.	0,01	4,0	3,0	0,11	0,12	0,30	0,03	0,33	7
	макс.	0,31	58,0	34,0	0,32	0,43	9,70	1,15	0,78	500

фициент сжимаемости лонтоваских глин при вертикальной нагрузке 0,4—0,6  $МПа$  находится обычно в интервале 0,04—0,07  $МПа^{-1}$ . Сжимаемость люкатиских глин более изменчива. Самые уплотненные и малосжимаемые глины находятся в пределах карбонатного плато (Ору, Ярвекюла, Вяо), где даже максимальные значения коэффициента сжимаемости не превышают 0,01  $МПа^{-1}$ . В пределах предглинтовой полосы глины люкатиской свиты либо мало- (Вийнси), либо среднесжимаемы (Таллин, Азери, Тойла, Сака) с коэффициентом сжимаемости 0,13—0,24  $МПа^{-1}$ . При этом разуплотненная часть характеризуется коэффициентом сжимаемости порядка 0,2—0,4, в отдельных случаях 0,5  $МПа^{-1}$ .

Рассчитанный модуль общей деформации колеблется в пределах 4—60  $МПа$ , в зависимости от литологического характера породы, трещиноватости и, очевидно, от способа отбора проб (Ломтадзе, 1958). Резко заниженные значения модуля характерны для увлажненных глин люкатиской свиты (2—10  $МПа$ ). Модули деформации по данным полевых опытных нагрузок близки вышеприведенным: со штампом площадью 5000  $см^2$  при нагрузке 0,1  $МПа$  составляют 43  $МПа$ , при 0,35  $МПа$  — 23  $МПа$ . Предел пропорциональности составляет 1,1  $МПа$ , а полное разрушение породы происходит при нагрузке 1,33  $МПа$ .

Модуль упругости, определенный по цилиндрическим пробам при разрушении их со скоростью увеличения нагрузки 0,1—0,2  $МПа/мин$ , составляет лишь 3—34  $МПа$ , но все же колеблется в значительных пре-

делах. Незакономерно колеблются и значения коэффициентов бокового давления и Пуассона (табл. 3). В соответствии с повышенной плотностью кембрийских глин их прочность также значительна. Однако конкретные значения меняются в заметных пределах. Так, люкатские глины г. Таллина при одноосном сжатии характеризуются прочностью 0,3—0,4 МПа, а те же глины в районе Вяо и Ярвекула — 3—4 МПа. Прочность лонтоваских глин колеблется от 0,5 до 9,7 МПа, составляя наиболее часто 2—5 МПа. При этом значения прочности на растяжение (по методу Карпетро) для лонтоваских глин (0,5—0,6 МПа) также в несколько раз превышают соответствующие значения для глин люкатской свиты (0,1—0,2 МПа).

Сопротивление сдвигу для лонтоваских глин характеризуется повышенными значениями сцепления (в среднем 100 кПа) и заниженными значениями угла внутреннего трения (в среднем 0,53 рад). Для глин люкатской свиты эти значения несколько занижены (табл. 3).

Таким образом, основные физико-механические свойства кембрийских глин меняются иногда в значительных пределах — в зависимости от особенностей состава этих пород и очень часто от доступности их агентам гипергенеза. Особенно это касается люкатских глин, которые в зависимости от расположения в разрезе могут быть послойно разуплотнены или даже разжижены. При проектировании строительных оснований инженерно-геологические особенности этих глин должны быть дополнительно изучены. Лонтоваские глины, наоборот, обладают более выдержанными в пространстве свойствами и имеют в целом хорошую несущую способность, являясь тем самым надежным основанием для большинства видов сооружений. Поэтому для предварительной оценки их свойств в инженерно-геологической практике можно руководствоваться представленным выше материалом.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Ломтадзе В. Д. Физико-механические свойства нижнекембрийских глин северо-западной окраины Русской платформы. — Зап. Ленингр. горн. ин-та, 1958, № 34, вып. 1, с. 154—188.
- Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. Л., 1970.
- Лоог А., Менс К., Мююрисепп К. О границе лонтоваской и пиритаской свит нижнего кембрия Прибалтики. — Изв. АН ЭстССР. Сер. физ.-мат. и техн. наук, 1966, т. 15, № 2, с. 271—276.
- Менс К. А., Пиррус Э. А. Базальный конгломерат люкатской свиты нижнего кембрия Эстонии. — В кн.: Геология кристаллического фундамента и осадочного чехла Прибалтики. Рига, 1975, с. 132—143.
- Менс К., Пиррус Э. Стратотипические разрезы кембрия Эстонии. Таллин, 1977.
- Пиррус Э. Закономерности распределения глинистых минералов в вендских и кембрийских отложениях Восточной Эстонии. — Изв. АН ЭстССР. Хим. Геол., 1970, т. 19, № 4, с. 322—333.
- Olli, V. Eesti NSV pinnastest. — Ehitusgeoloogiline kogumik I. Tallinn, 1962, lk. 14—22.
- Pirrus, E. Mida teame sinisavist. — Eesti Loodus, 1973, nr. 11, lk. 646—653.

E. PIRRUS, Leili SAARSE

### PÕHJA-EESTI KAMBRIUMI SAVIDE FÜSIKALIS-MEHAANILISED OMADUSED

Artiklis on esitatud Põhja-Eesti avamuslal paljanduvate alamkambriumi savide olulisemad füüsikalised-mehaanilised näitajad. On juhitud tähelepanu asjaolule, et Lükati kihistu ülemise, murenenud osa savi tihedus ja nihkeparameetrid on väiksemad ning kokkusurutavus suurem kui sama kihistu murenemata osa savi vastavad näitajad (tab. 1, 2 ja 3).

E. PIRRUS, Leili SAARSE

### GEOTECHNICAL PROPERTIES OF THE CAMBRIAN CLAYS IN NORTH ESTONIA

The present paper deals with the results of research into the geotechnical properties of Cambrian formations in North Estonia. Authors have generalized abundant information that has been received during the recent 10—15 years in connection with intensive engineering-geological investigation of soils in Estonia. The description and short stratigraphical characterization of the Lükati and Lontova formations are presented. It has been pointed out that the uppermost strata of the Lükati formation are often weathered and their geotechnical properties are correspondingly more unsuitable as compared with the unweathered Lükati and Lontova formations. The latter have a higher bearing capacity.

Tables contain the following arithmetical means: minimum and maximum numbers of the weathered Lükati and unweathered Lükati and Lontova formations: granulometrical fractions, specific gravity, unit weight, dry unit weight, porosity and void ratio (Table 1); water content, degree of saturation, liquid limit, plastic limit, plasticity index, coefficient of permeability, maximum molecular water absorbing capacity, hygroscopic capacity, absolute moisture capacity, swelling, and moisture of swelling (Table 2); coefficient of compressibility, modulus of deformation, modulus of elasticity, Poisson's ratio, coefficient of lateral compression, cylinder strength, tensile strength, angle of internal friction and cohesion (Table 3).