Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXII, вып. 2, 1971 г.

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЗДНЕ- И ПОСЛЕЛЕДНИКОВЫХ МОРСКИХ ГЛИН

А. В. Кузьмин

Среди поздне- и послеледниковых отложений в странах Скандинавии, в некоторых районах Канады и США хорошо известны голубые мягкопластичные и подвижные плывунные глины. По свойствам они близки глинам прибрежной полосы Белого моря и бассейнов нижнего течения впадающих в него рек (Кемь, Выг и др.). Подобные отложения известны также на Кольском полуострове.

Использование этих глин при строительстве различных сооружений нередко вызывает крупные осложнения. Их отличает в основном высокая влажность, превышающая обычно предел текучести, низкая плотность, не соответствующая значениям природного давления, высокая сжимаемость, резкая потеря прочности при нарушении естественного сложения, легкая подвижность при динамических воздействиях. Показатель консистенции глин нередко значительно превышает единицу, хотя в природном залегании они далеки от текучего состояния: стенки шурфов и скважин сохраняются вертикальными иногда в течение нескольких суток. По инженерно-геологической классификации их относят к породам малой степени литификации [6].

Накопление глин происходило в приледниковых бассейнах, образовавшихся при отступлении последнего материкового ледяного покрова. Под действием веса льда произошло погружение земной коры и наступление моря далеко в глубь суши. Областями питания терригенным материалом таких бассейнов являлись Балтийский и Канадский кристаллические щиты, сложенные в основном докембрийскими гнейсами и гранито-гнейсами, поэтому в минеральном составе глинистых отложений, даже в тонкодисперсной фракции, преобладают малоизмененные слабо гидратированные первичные реликтовые минералы — слюды, полевые шпаты, кварц, хлорит [4, 11]. Л. Бьеррум [10] отмечает в норвежских глинах присутствие некоторого количества иллита. Своеобразие минерального состава фракции менее 0,002 *мм* объясняет пониженную коллоидную активность глин.

Терригенный материал, подготовленный господствующими условиями выветривания, переносился талыми водами. Ближе к краю ледника, как правило, в пресной воде отлагались более грубые осадки, по мере удаления — более тонкие и однородные. В Скандинавии высокочувствительные глинистые отложения, за некоторым исключением, располагаются ниже отметок береговой линии [14]. Отступление ледника сопровождалось остановками, осцилляциями и новыми подвижками, что, в свою очередь, вызывало изменение уровня моря и свойств седиментационного

бассейна. Впоследствии отложения были выведены на дневную поверхность и уплотнялись лишь под влиянием собственного веса.

Одним из важнейших факторов, предопределяющих особенности состояния и свойств глин, является соленость седиментационного бассейна. В пресной воде образуются слоистые плотные осадки, в соленой — высокопористые с массивной текстурой. Однако величина концентрации электролитов, необходимая для образования массивного осадка в природных условиях, не установлена. Экспериментальные значения концентраций, полученные И. М. Горьковой [2], достигают 2,5%. М. А. Лаврова [5] указывает, что сезонная слоистость в ледниково-морских отложениях образуется при понижении солености до 1/50-нормальной. Большое значение имеет и концентрация взвешенного вещества. Если за сравнительно короткий промежуток времени (12 000—10 000 лет до нашей эры) в разрезах р. Кемь накопилось до 42 *м* глин, концентрация взвешенного вещества была там высокой. Л. Бьеррум [10] считает, что норвежские плывунные глины образовались в бассейне нормальной солености (35 *г/л*), что не всегда подтверждается результатами геологического изучения условий осадконакопления: нередко глины отлагались в глубоко вдающихся в сушу фиордах и заливах, где не могло не сказаться опресняющее действие талых вод ледника. Исследователи глин в Канаде [11] большую роль отводят степени опреснения морских вод, объясняя дисперсность и свойства отложений. Изучение чувствительных отложений Финляндии с привлечением диатомового анализа позволили Л. Кейнонену местом образования этих отложений считать воду с соленостью ниже морской, причем часто меньшей 3—4 *г/л* [14].

Исследования мощных довольно однородных по составу глин в долине р. Кемь подтверждают точку зрения Л. Кейнонена. Глины отлагались в обширном холодном бассейне, слабо осолоненном. Определения диатомовых водорослей* показывают присутствие экологически смешанных форм с преобладанием пресноводных видов. Среди морских присутствуют единичные *Melosira sulcata*, *Hyalodiscus sp.*, *Thalassiosira gravida Cl.* При изменении состава бассейна во времени наибольшая соленость, вероятно, отмечалась в середине аллередской (готигляциальной) трансгрессии (средняя часть разреза) и в период трансгрессии Портландия (молодой дриас — верхняя часть разреза позднеледниковых глин), когда предположительно соленость Белого моря была близка к морской. Однако и в молодом дриасе степень опреснения бассейна была значительной: по Е. Хюппе, существовавшее в это время Балтийское ледниковое озеро было связано с Беломорским бассейном, массы пресной воды поступали именно в Кемскую часть бассейна [12]. Это обусловливало здесь специфику осадконакопления глин даже по сравнению с прилегающими южными районами и открытой частью бассейна, где отмечена более высокая соленость [1]. В это же время отлагались наименее прочные глины в Осло-фиорде в условиях сильного опреснения его вод в связи с продвижением ледника до г. Осло (глины зоны D [13]). Осадконакопление в послеледниковую эпоху могло происходить в бассейнах более высокой солености вследствие уменьшения поступления пресных вод. Послеледниковые отложения залегают вблизи современных береговых линий на сравнительно низких отметках.

Диагенез отложившихся осадков происходил в резко восстановительной обстановке, о чем свидетельствует преобладание форм закисного железа в глинах [2], присутствие вторичного пирита, цвет отложений, а также быстрые и значительные изменения пород при окислении. Породы были выведены на поверхность в слабо уплотненном состоянии, в зоне катагене-

* Анализы выполнены И. А. Купцовой в лаборатории Гидропроекта.

тических изменений продолжалось медленное гравитационное уплотнение под влиянием собственного веса. В приповерхностной зоне глины подвержены значительному уплотнению и упрочению при выветривании под действием физико-химических процессов. О роли условий осадконакопления и последующих диагенетических и катагенетических изменений в формировании физико-механических свойств глин свидетельствуют изменения по глубине их количественных показателей. Наиболее достоверный материал для такого анализа представляют результаты исследования прочности в условиях естественного залегания вращательным срезом или зондированием.

Принятая многими исследователями концепция пропорционального возрастания сопротивления сдвигу с глубиной (т. е. с возрастанием природного давления) в однородных по составу породах должна предусматривать такое же постоянное увеличение их плотности — снижение влажности. Изменение сопротивления сдвигу τ с глубиной характеризуется отношением его к природному давлению p, и это отношение в однородных разрезах должно быть постоянным. По полевым исследованиям [10, 11, 14, 15], подтвержденным нашими данными, характер изменения прочности глин с глубиной более сложен. Сопротивление глин сдвигу может оставаться практически неизменным с глубиной, либо возрастать, однако интенсивность нарастания всегда отстает от прироста природного давления, и, следовательно, τ/p уменьшается по этой причине, либо уменьшается с глубиной.

Причина незакономерного изменения сопротивления сдвигу с ростом природного давления лежит в несоответствии плотности глин и природного давления. Еще Н. Я. Денисовым [3] отмечены в некоторых разрезах зоны значительной мощности, где плотность практически неизменна. В разрезах позднеледниковых глин долины р. Кемь такие зоны выделяются в ряде мест. Так, по одной из скважин в интервале глубин 8—18 *м* залегают глины весьма постоянной влажности (78—80%). Причины недоуплотненного состояния глин связаны и с малым периодом уплотнения, и с особым характером структурных связей, и условиями оттока поровых вод [3, 8] — отдаленностью дренирующих прослоев и низкими фильтрационными свойствами глин. В зонах постоянной плотности сопротивление сдвигу, как правило, неизменно. Заметное увеличение прочности с глубиной отмечается вместе с появлением устойчивой тенденции к снижению влажности. Уменьшение прочности обычно свойственно верхним частям разрезов и соответствует глубине распространения процессов выветривания.

Резкое изменение прочности в отдельных горизонтах, как показывают исследования, в наибольшей степени связано с изменениями условий осадконакопления. Так, в норвежских глинах эти горизонты приурочены к границе стратиграфических зон. Каждую из них отличают условия образования [13]: соленость, температура воды бассейна и т. д. В глинах долины р. Св. Лаврентия прочность возрастает в зонах воздействия субаэрального выветривания, т. е. к геологически обоснованным или предполагаемым перерывам в осадконакоплении [15]. В долине р. Кемь, по данным статического зондирования, горизонты резкого изменения прочности прослеживаются по простиранию на одних и тех же отметках. Один из таких горизонтов глин, по данным диатомового анализа, образовался, видимо, в воде относительно более высокой солености. Влияние условий образования подтверждает и выделение таких упрочненных горизонтов по величине предельного напряжения сдвигу глин нарушенного сложения при естественной влажности, которое определяется при полном разрушении диагенетических структурных связей.

Условия осадконакопления предопределили характер структурных связей в глинах данного типа. Хрупкий характер разрушения, очень малая величина критической деформации при сдвиге, снижение прочности при длительном действии касательных напряжений [7] свидетельствуют о значительной роли сцепления упрочения, и вместе с высокой недоуплотненностью глин подтверждают предположение [3, 7] о возникновении цементационных связей до начала гравитационного уплотнения.

Как известно, специфику свойств норвежских глин (высокую чувствительность, легкую подвижность, характер изменения прочности), объясняют тем, что глины, будучи образованы в бассейне высокой солености, впоследствии подверглись выщелачиванию окружающими пресными водами с резким уменьшением солености поровых растворов [10]. Не отрицая возможности этого процесса, нельзя все-таки считать его универсальным: изучение палеогеографической обстановки осадконакопления показывает, что уже начальная соленость поровых растворов могла быть ниже критической (по представлению сторонников теории выщелачивания, 10 *г/л* [10, 13]). Кроме того, процесс выщелачивания предполагает близость к глинам каких-то дренирующих прослоев, а в данном типе отложений разрезы часто на десятки метров сложены слабопроницаемыми глинистыми породами. Глубина воздействия пресных атмосферных вод ограничивается первыми метрами и соответствует глубине проникновения корней растений и, в меньшей мере, трещиноватости выветрелой зоны. Выщелачиванию могла быть подвержена и нижняя часть разрезов: в подошве глин, как правило, залегает напорный водоносный горизонт в моренных или дочетвертичных кристаллических породах, содержащий весьма пресные воды. В соседней же части разрезов концентрация солей в поровых растворах могла изменяться лишь путем диффузионного массопереноса под действием градиентов концентрации. Однако этот процесс длительный даже при высоких коэффициентах диффузии отдельных компонентов, которые к тому же уменьшаются во времени. Кроме того, диффузионному выщелачиванию препятствует осмотическое перемещение воды — обратно направленный процесс. С. И. Смирнов [9] указывает, что за весь четвертичный период полному обессоливанию подвергается толща 60—160 *м*, тогда как позднеледниковые глины выведены из-под уровня седиментационного бассейна не более 10 000 лет назад. В связи с этим экспериментально доказанная И. М. Горьковой [2] способность послеледниковых глин выщелачиваться диффузионным путем еще не может служить доказательством выщелоченности глин в условиях естественного залегания.

Проведенные в лаборатории инженерной геологии Ленинградского горного института исследования минерализации поровых растворов позднеледниковых глин долины р. Кемь до глубины 30 *м* показали, что максимальная глубина распространения выщелачивающего действия пресных вод составляет всего 6—8 *м*. Однако и в этом разрезе исторически сложились исключительно благоприятные условия для выщелачивания: до понижения местного базиса эрозии глины находились под уровнем р. Кемь и испытали воздействие текучих пресных вод в течение длительного времени. Нижележащая зона по существу является зоной сохранения минерализации поровых растворов.

Выводы

1. Поздне- и послеледниковые мягкопластичные и плывунные глины северного полушария образовались в сходных условиях.

2. Накопление глин происходило в приледниковых морских бассейнах в условиях сильного опреснения.

3. Условия образования предопределили своеобразие физико-механических свойств глин — сложный характер изменения плотности, влажности и прочности с глубиной.

4. Возникновение сцеплений упрочения (цементационных структурных связей) до начала гравитационного уплотнения объясняет высокую влажность и низкую плотность глин и их твердообразные свойства. Разрушение структурных связей при высокой влажности и низкой концентрации электролитов является причиной низкой прочности перемятых глин.

5. Выщелачивание не играло существенной роли в формировании прочности глин, во всяком случае, слагающих часть разреза позднеледникового возраста.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авилов И. К. Мощность современных осадков и послеледниковая история Белого моря. Тр. Гос. океанограф. ин-та, вып. 31/43, 1956.

2. Горькова И. М. и др. Природа плывунности послеледниковых морских глин Прибеломорской низменности КАССР. В сб. «Формирование инженерно-геологических свойств глинистых пород в процессе литогенеза». АН СССР, 1963.

3. Денисов Н. Я. О природе высокой чувствительности плывунных глин. Основания, фундаменты и механика грунтов, № 5, 1963.

4. Кузьмин А. В., Боровик О. В. Некоторые свойства ильдиевых глин в нижнем течении р. Кеми. Тез. докл. научно-техн. конф. ЛГИ. ЛГИ, 1968.

5. Лаврова М. А. Четвертичная геология Кольского п-ва. АН СССР, 1960.

6. Ломтадзе В. Д. Инженерно-геологическая классификация глинистых пород. Зап. ЛГИ, т. XXXIV, вып. 2, 1958.

7. Ломтадзе В. Д. и др. Особенности свойств глинистых пород в связи с условиями их формирования (на примере северо-западных районов Русской платформы). Тез. докл. Межведомств. совещ. по инж. геол. МГУ, 1968.

8. Маслов Н. Н. и др. К вопросу об оценке устойчивости глинистых грунтов в основании сооружений в начальном периоде их работы. Тр. VII Международн. конгр. по механике грунтов и фундаментостроению. Стройиздат, 1969.

9. Смирнов С. И. Геохимическая история седиментационных вод морского генезиса. Советская геология, № 11, 1968.

10. Bjerrum L. Geotechnique, v. 4, N 2, 1954.

11. Eden U., Krawford K. Proc. of the 4-th Intern. Conf. Soil. on Mechan., 1957.

12. Нууррä E. Fennia, N 89, 1964.

13. Feyling-Hanssen R. W. Norges Geotek. Inst. Publ., N 20, Oslo, 1957.

14. Keinonen L. On the sensitivity of water - laid sediments in Finland and factors unducing sensitivity. Helsinki, 1963.

15. Kenney T. C. Geotechnique, v. 14, N 3, 1964.