

О ПРИРОДЕ ПРОЧНОСТИ ЛЕНТОЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Р. Э. Дашко

Отличительной особенностью ленточных отложений является высокое значение их естественной влажности, обычно близкое или даже превышающее предел текучести породы. Вместе с тем ленточные отложения в природных условиях весьма далеки от текучего состояния (например, устойчивые откосы карьеров, вскрывающих ленточные отложения на полную мощность, устойчивость стенок шурфов, котлованов при условии сохранения их естественного сложения и отсутствии дополнительного увлажнения и др.).

Однако прочность ленточных отложений при нарушении естественного сложения падает. Так, для ленточных глин района Ленинграда показатель чувствительности или, иначе говоря, показатель структурности изменяется от 3 до 5 [6, 12]. Величина его зависит от естественной влажности породы: чем выше влажность, тем больше значение показателя чувствительности и, наоборот. В таком случае повышенное значение показателя чувствительности определяется не большей величиной природной прочности, а низкими значениями прочности после нарушения естественных связей в породе [6]. Кроме того, в ленточных отложениях не обнаружено зависимости между величиной естественной влажности и действующим давлением вышележащих пород, достигающим $3-3,5 \text{ кг/см}^2$.

Незавершенность гравитационного уплотнения ленточных отложений Н. Я. Денисов объясняет процессом возникновения цементационных связей, вызвавших «схватывание» осадка, выпавшего до начала гравитационного уплотнения. После чего дальнейшее уплотнение протекает неэффективно, и порода остается недоуплотненной. Разрушением цементационных связей Н. Я. Денисов объясняет также падение прочности ленточных отложений при нарушении их естественного сложения [6].

Ряд особенностей образования ленточных отложений ставит под сомнение подобную трактовку природы прочности.

Образование ленточных глин, залегающих на территории Ленинграда и области, происходило в Балтийском ледниковом озере в непосредственной близости от отступающего ледника, примерно на глубине 20 м [15]. Накопление ленточных отложений шло в условиях сурового и сухого климата. Природные условия раннего позднеледниковья рассматриваемого района, по И. П. Герасимову [3] и Г. Н. Лисицыной [9], можно сравнить с условиями Полярного Урала, Центральной Якутии и Западной Гренландии.

Образование ленточных отложений обусловлено следующим [7, 17]: 1) большая часть осадков (глинистая фракция) должна оставаться во взвешенном состоянии в течение всего летнего и осеннего периодов; 2) вода временных потоков, образующихся при летнем таянии ледника, должна быть легче озерной, чтобы осадки распространялись по всему водоему.

Соблюдение первого условия возможно при пресной воде. Отсутствие солей ведет к образованию устойчивой суспензии и коллоидного

раствора, и осаждение частиц в таком случае подчиняется законам гравитации. Низкая температура воды способствует условиям стабилизации и пептизации суспензии. В морской воде, где растворенные соли действуют как электролиты, взвешенные частицы коагулируют и осаждаются в виде хлопьев, состоящих из частиц равного размера. Вследствие этого механические ритмично-слоистые осадки не образуются. Опытами Л. Бьеррума и И. Розенквиста показано, что в пресных водах образуются слоистые довольно плотные осадки, в соленой — высокопористые однородные отложения [18]. Тот же эффект обнаружила И. М. Горькова [4].

В дистиллированной воде осадки были разделены на слои по степени крупности частиц и агрегатов, а жидкость над осадками представляла собой коллоидный раствор. Подобная закономерность проявлялась независимо от концентрации суспензии (концентрация суспензии 5—120%). Те же опыты, проведенные в 2,8%-ном растворе NaCl (концентрация соли приблизительно равна солёности Белого моря), не обнаружили никакой слоистости, а над однородным осадком раствор был абсолютно прозрачным. Дальнейшее уменьшение концентрации раствора вновь привело к образованию слоистых осадков, но с меньшей мутностью отстоявшейся над ними воды.

Соблюдение второго условия образования ленточных отложений (вода впадающих потоков должна быть легче озерной воды) возможно при следующем предположении. Вода временных потоков с температурой, близкой к нулю, распространялась по всей поверхности озера, неся взвешенный материал. Осаждение этого материала — медленный процесс вследствие довольно большой глубины бассейна и увеличивающейся к низу плотности воды. Температура придонной части была около $+4^{\circ}\text{C}$ [7]. Все это и объясняет большую выдержанность отдельных лент по простиранию и совершенную сортировку осадка в каждой точке по мощности.

Не останавливаясь на условиях осаждения песчаных и пылеватых частиц в летне-осенний период, рассмотрим более подробно процесс седиментации тонкой взвеси, происходящий зимой, в спокойных условиях под толстым ледяным покровом.

Состав поступающего в ледниковый бассейн материала определялся составом разрушающихся пород, т. е. продуктами размыва морены. Состав тонкодисперсной части ленточных отложений представлен в основном гидрослюдами с небольшими примесями каолинита [16]. Такой минеральный состав полностью соответствует залегающим под ленточными отложениями породам, т. е. свидетельствует о том, что глинистые минералы не претерпели никаких изменений в ходе переноса, седиментации и последующего диагенеза осадков.

Поскольку гидрослюдисто-каолиновые минералы обладают сравнительно прочной кристаллической решеткой, при выветривании они распадаются на довольно крупные пластинчатые частицы (размером 1—2 μ). Очевидно, при таких размерах частиц броуновское движение в процессе осаждения незначительно, поэтому глинистые частицы осаждались, сохраняя по большей плоскости горизонтальное положение. Следовательно, достигнув дна водоема, подобные глинистые частицы или агрегаты частиц занимали также ориентированное положение. Вполне понятно, что при таком характере седиментации в глинистых прослоях ленточных отложений должна отчетливо прослеживаться микрослоистая текстура.

А. И. Рабинерсон [13], рассматривая возможность возникновения компактного или пространственного сложения коллоидов*, определил, что первый тип появляется у коллоидов с изодиаметрическими частицами, второй — у коллоидов с частицами неправильной формы (палочкообраз-

* Компактное сложение — беспорядочное агрегирование частиц, пространственное — возникающее при ориентированном прилипании.

ной или пластинчатой) при наличии некоторого защитного фактора. У высокодисперсных суспензий природных алюмосиликатов защитный фактор, на фоне которого образуется пространственное сложение, связан со значительной их гидратацией, стабилизирующей частицы.

Качественный состав двойного электрического слоя вокруг глинистых частиц определяет, по мнению А. И. Рабинерсона, способность к образованию пространственного или компактного сложения. При насыщении поглощающего комплекса ионами Ca^{2+} и H^+ формируется компактное сложение, так как низкие значения ζ -потенциала благоприятствуют очень быстрому свертыванию коллоидов. При насыщении ионами Na^+ значение ζ -потенциала и гидратация частиц настолько велики, что агрегирование подавлено вообще. При оптимальных соотношениях Ca^{2+} и Na^+ ζ -потенциал имеет значение, при котором формируется пространственное сложение. Очевидно, в условиях пресного ледникового озера не могло быть чрезмерного насыщения ни ионами кальция, ни ионами натрия.

Как показало исследование, состав обменных катионов в ленточных глинах предопределил образование пространственного сложения или, иначе говоря, ориентированной микрослоистой текстуры. Наличие подобной микротекстуры в глинистых прослоях ленточных отложений подтверждается данными петрографического анализа. Н. А. Успенский [16], детально изучивший ленточные глины в шлифах, обнаружил, что глинистые частицы и их агрегаты расположены взаимопараллельно. М. Н. Кагнер [8] отмечает ту же особенность микротекстуры ленточных отложений.

Просмотр глин в шлифах и аншлифах дает представление о строго параллельном первичном расположении агрегатов частиц. Вследствие одинаковой ориентировки агрегатов частиц глинистое вещество в породе приобретает свойство монокристалла и становится оптически изотропным. Подобное ориентированное расположение глинистых частиц предопределило особенности дальнейшего формирования породы из выпавшего осадка. Как известно, толщина сольватных оболочек на плоских частицах неодинакова на различных гранях: наибольшая толщина гидратного слоя на плоской грани, наименьшая — на боковых ребрах.

Направленное расположение глинистых частиц способствует образованию такого скелетного каркаса, в котором глинистые частицы сцепляются своими лиофобными концами, где сольватная оболочка становится тоньше и даже прорывается. Согласно представлениям П. А. Ребиндера [14], допускается два типовых случая: 1) прослойки воды полностью исчезают в местах контакта, и частицы соединяются — такой скелет довольно прочен и обладает ярко выраженной областью упругих деформаций; 2) сольватная оболочка не исчезает, но принимает минимальную толщину — прочность такой системы ниже, чем первой, причем в этом случае проявляются пластичные свойства.

В промежутках между ячейками, состоящими из отдельных цепочек соединенных между собой ориентированных глинистых частиц, иммобилизуется вода.

В процессе диагенеза самопроизвольные процессы синерезиса и старения ведут к дегидратации контактов глинистых частиц. Поскольку такие явления могут быть отчетливо наблюдаемы даже в лабораторных условиях, в течение тысячелетних диагенетических процессов они становятся всеобъемлющими [5]. В данном случае предпочтение отдается лишь процессам синеретического характера, очевидно, потому, что в связи с очень низкими температурами воды и большой опресненностью бассейна, вызывающими стабилизацию частиц, остальные диагенетические процессы идут весьма медленно. Именно поэтому в ленточных отложениях отсутствуют аутигенные минералы, минеральный состав породы полностью идентичен минеральному составу подстилающих пород. При подобном сложении породы отток воды из породы при действии уплотняющего

давления перпендикулярно микронапластованиям глин, естественно, будет весьма затрудненным. Об этом свидетельствуют и данные компрессионных испытаний образцов из глинистых прослоек ленточных глин.

При одинаковой исходной влажности, равной 42%, наибольшие потери воды наблюдались под действием давления параллельно микрослоистости породы: при приложении вертикального давления, равного 3 кг/см^2 , влажность снижалась до 33—34%. При испытании вкрест микрослоистости при той же нагрузке влажность породы равна 38—39%. Следовательно, и в природных условиях вес вышележащих слоев также мало сказывается на изменении влажности ленточных отложений. Этим и объясняется несоответствие величины влажности исследуемых пород действующему природному давлению — «недоуплотненность породы». Конечно, следует иметь в виду, что с момента накопления ленточных отложений прошло лишь около 12500 лет.

Таким образом, природа прочности ленточных отложений в естественных условиях залегания может быть объяснена образованием и развитием структурных связей молекулярного происхождения в глинистых осадках без сколько-нибудь значительного участия цементационных процессов. Как указано выше, накопление ленточных отложений шло в пресном бассейне при низких температурах воды, обусловленных непосредственной близостью ледника с весьма скудной водной растительностью в водоеме. Эти условия весьма сходны с условиями ледниковых озер Полярного Урала [11], где накопление материала также полностью минеральное. Автохтонного или аллохтонного органического вещества нет: автохтонного — вследствие низкой интенсивности образования, аллохтонного — вследствие малого развития почвенного и растительного покровов. Температура природной части озер около 4°C , температура выпадающих временных потоков — ниже.

Химический состав воды ледниковых озер Полярного Урала следующий [10, 11]: $\text{Fe}_{\text{общ}}$ 0,002; Cl^- 2; HCO_3^- 2,82—5,84; CO_2 1,1—2,75; O_2 10,26—12,17 мг/л; общая жесткость воды 0,01—0,19 мг-экв, pH 6,6—7.

Химический состав всей толщи воды в приповерхностной и придонной частях практически один и тот же. В озерах отмечается очень низкий уровень окислительно-восстановительных процессов, что находит выражение в почти равномерном распределении O_2 в толще воды.

Химическая характеристика воды группы ледниковых озер Восточной Сибири (Северного Прибайкалья), сравнимых по условиям существования с Балтийским ледниковым озером, следующая [2]: Na^+ 2,2—4,7; Ca^{2+} 5—5,8; Mg^{2+} 0,5—1; $\text{Fe}_{\text{общ}}$ 0,03—0,2; Cl^- 1,9—3,8; HCO_3^- 7,2—12; SiO_2 3,6—5,3; CO_2 2—3,5; O_2 8,3—11,3 мг/л; общая жесткость воды 0,25—0,31 мг-экв; pH 6,3—6,5.

Следовательно, воды ледниковых озер можно отнести к сверхпресным. Понятно, что при таком составе выпадение каких-либо солей маловероятно. Обычно при образовании осадков в морских водоемах концентрация компонентов повышена в придонном слое воды и непосредственно в самом поровом растворе свежееотложившегося осадка. Данных об изменении химического состава поровых вод в процессе осадконакопления в пресных или сверхпресных бассейнах нет. Однако О. А. Алекин предполагает, что увеличение концентрации порового раствора, в отличие от вод бассейна, в этих условиях будет незначительным. Косвенным доказательством такого предположения могут служить приводимые выше данные о полной идентичности химического состава воды приповерхностной и придонной частей озер Полярного Урала.

Но даже при повышении концентрации солей возможность выпадения некоторых компонентов в виде цемента на стадии осадконакопления почти полностью исключается. Зимой — в наиболее неблагоприятных условиях,

когда растворимость солей резко снижается, вероятность появления цементирующих веществ при таком химическом составе воды также остается крайне малой. Так, например, при проведенных анализах ни в одной из проб не зафиксировано присутствие карбонатов в виде цемента. Маловероятна также возможность выпадения SiO_2 , поскольку зимой за счет поглощения растворенного O_2 реакция воды сдвигается в сторону увеличения pH, повышая тем самым предел насыщения SiO_2 . Реально лишь выпадение железа. Однако, учитывая низкую его концентрацию в водах, этот процесс вряд ли может дать ощутимое количество цементирующего вещества. Лабораторно валовое содержание железа определено в 4,5% при кларковом содержании, характерном для глинистых пород 4,73% [1]. Так как биогенные процессы развиты слабо, а Ca^{++} — ионы присутствуют, содержание фосфатов в воде в течение всего года низкое.

Летнее осадконакопление также не отмечено никаким цементирующим веществом. Растворимость описанных компонентов в более теплое время выше. Количество цемента не улавливается ни в песчаных, ни в пылеватых прослоях — расслаивание породы в отобранном монолите происходит совершенно свободно. Испытание пород на сдвиг по песчаному прослою дает лишь значение угла внутреннего трения. Таким образом, наличие цемента в ленточных отложениях при таких условиях полностью исключается.

Вернемся к ранее развитому положению о том, что прочность ленточных отложений формируется под влиянием дегидратационных и синергетических процессов, ведущих к повышению общей прочности осадка. В результате самоориентации глинистых частиц и агрегатов в процессе седиментации образуется микрослоистая текстура. Между отдельными микрослоями иммобилизуется некоторый запас свободной воды, вода остается также в виде остаточных гидратных слоев.

При нарушении естественного сложения ленточных отложений прежде всего увеличивается содержание рыхлосвязанной воды диффузного слоя ионов за счет свободной воды. Следовательно, резко сокращается сцепление частиц в породе, прочность ее падает. Причем, чем большее количество свободной воды находится в породе в условиях естественного залегания, тем более гидратированными окажутся частицы в породе после перематания, тем ниже прочность породы в нарушенном состоянии. Таким образом, изложенная гипотеза объясняет указанные в начале статьи все особенности природы прочности ленточных отложений.

Все изложенное относится к ленточным отложениям, залегающим ниже 1,5—2 м кровли. Свойства ленточных глин, залегающих выше указанной отметки, меняются: уменьшается естественная влажность, увеличивается прочность породы, снижается величина чувствительности. На ленточных глинах почти повсеместно образуются подобные более плотные слои. По данным И. М. Горьковой [4], такие упрочненные горизонты характерны для послеледниковых морских глин Карелии, озерно-ледниковых отложений Северной Америки и аналогичных толщ. Происхождение подобных корок связано с комплексом физико-химических необратимых процессов, имеющих вторичный характер и начавшихся в то время, когда осадки были выведены на дневную поверхность. Эти вторичные процессы шли под влиянием периодического подсыхания и увлажнения, промерзания и оттаивания, под воздействием почвообразовательных факторов, окисления, и т. д.

Процессы окисления способствовали переходу закисных соединений в окисные труднорастворимые соединения. Обычно ожелезнение в верхних слоях ленточных глин прослеживается по наличию желтоватых, бурых, охристых пятен и разводов. В северных районах, где велика роль полуторных окислов, в породе формируются прочные цементационные связи также за счет окислов алюминия и кремнезема. Кроме того, гумино-

вые кислоты денатурируют с образованием прочных и необратимых органо-минеральных соединений. По мере подсыхания верхнего слоя в поровом растворе могут концентрироваться соли, способствуя коагуляции частиц и агрегированию породы. Одновременно увеличивается число и площадь контактов частиц, что также способствует упрочнению породы, изменению ее консистенции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградов А. П. Закономерности распределения химических элементов в земной коре. Изд-во МГУ, 1955.
 2. Власов Н. А. и Прокопьев Б. В. Гидрохимическая характеристика Верхнекичерских озер. Тр. Иркутского ун-та, сер. хим., т. 3, вып. 2, 1948.
 3. Герасимов И. П. Современные пережитки позднеледниковых явлений вблизи самой холодной области мира. Изв. АН СССР, сер. географ., № 5, 1952.
 4. Горькова И. М. и др. Природа пльвунности послеледниковых морских глин Прибеломорской низменности КАССР. Из кн. «Формирование инженерно-геологических свойств глинистых пород в процессе литогенеза», Изд-во АН СССР, 1963.
 5. Горькова И. М. Исследование структурообразования глин в инженерной геологии. Из кн. «Исследование и использование глин», Изд-во Львовского ун-та, 1958.
 6. Денисов Н. Я. О природе высокой чувствительности пльвунных глин. Основания, фундаменты и механика грунтов, № 5, 1963.
 7. Жемчужников Ю. А. Сезонная слоистость и периодичность осадконакопления. Изд-во АН СССР, 1963.
 8. Кагнер М. Н. К вопросу о влиянии минералогического состава, текстуры и структуры глинистых пород на их прочность. Сб. «Вопросы инженерной геологии и грунтоведения», Изд-во МГУ, 1963.
 9. Лисицына Г. Н. Вопросы палеогеографии позднеледникового времени на территории северо-запада Европейской части СССР. Сб. «Ледниковый период на территории Европейской части СССР и Сибири», Изд-во МГУ, 1959.
 10. Миронова Н. Я. и Россоломо Л. Л. Озерное накопление продуктов ледниковой эрозии на Полярном Урале. Из кн. «Накопление вещества в озерах», Изд-во «Наука», 1964.
 11. Миронова Н. Я. и Покровская Т. Н. Лимнологическая характеристика некоторых озер Полярного Урала. Из кн. «Накопление вещества в озерах», Изд-во «Наука», 1964.
 12. Приклонский В. А. Грунтоведение. Часть I. Госгеолтехиздат, 1955.
 13. Рабинерсон А. И. Структурообразование гидрофобных коллоидов. Тезисы к диссертации на соискание ученой степени доктора химических наук. Изд-во МГУ, 1941.
 14. Ребиндер П. А. Конспект лекций по общему курсу коллоидной химии. Изд-во МГУ, 1949.
 15. Саммет Э. Ю. Некоторые вопросы четвертичной геологии и геоморфологии западной части Ленинградской области. Из кн. «Палеогеография четвертичного периода СССР», Изд-во МГУ, 1961.
 16. Успенский Н. А. Леночные глины окрестностей Ленинграда. Зап. Всес. минер. о-ва, сер. 2, ч. 67, № 1, 1938.
 17. Флинт Р. Ледники и палеогеография плейстоцена. Изд-во иностр. лит-ры, 1963.
 18. Bjerrum L., Rosenquist I. Th. Geotechnique, v. 6, № 3, 1956.
-