Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института имени Г.В.Плеханова,
1989. Т. 118

УДК 624.131.1:551.351.2

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ГЛЯЦИАЛЬНЫХ ШЕЛЬФОВ БЕЛОМОРСКО-БАЛТИЙСКОЙ ДЕПРЕССИИ

М.С.ЗАХАРОВ, А.Л.КАГАН, Н.Г.КОРВЕТ,
П.Е.МОСКАЛЕНКО, Я.В.НЕИЗВЕСТНОВ,
А.Е.РЫБАЛКО

Гляциальные шельфы, под которыми здесь понимаются участки морского дна, находящиеся в отдельные этапы четвертичного периода под покровными ледниками, включают в себя дно ряда внутриконтинентальных бассейнов, таких как Балтийский и Беломорский. В поздне-послеледниковое время эти внутренние впадины гляциальной зоны являлись естественной седиментационной областью. В их пределах накопилось значительное количество терригенного материала.

В силу исторического развития Балтийский и Беломорский гляциальные шельфы находятся на территории наиболее экономически развитых районов нашей страны.

В настоящее время рассматривается вопрос о комплексном геологическом картировании дна акваторий в рамках Государственной геологической съемки шельфа масштаба 1:200 000 (ГСШ-200). В опытно-производственном порядке в настоящее время подобными работами покрыто 30-40 % площади Белого и Балтийского морей.

Основным приоритетным направлением в изучении северо-западного гляциального шельфа следует считать создание в конечном итоге картографического фонда и банка геологических данных упомянутых акваторий и их берегов, включающих четыре основных блока:

1) карты строения и свойств геологической среды, среди которых основное место занимают карты геологического содержания по срезам (дочетвертичных, четвертичных отложений, поверхности морского дна), содержащие комплексную информацию о строении района и полезных ископаемых;

2) карты распространения и интенсивности геологических процессов, в том числе техногенной нагрузки и загрязнения;

3) карты оперативных прогнозов, прежде всего разрушения и загрязнения всей зоны побережья;

4) карты последствий опасных геологических процессов и катастроф, а также защитных мероприятий.

Подобный комплект карт позволил бы избежать многих просчетов и ошибок в проектировании и строительстве различных сооружений, в создании эффективной программы мониторинга всей зоны побережья, испытывающей повышенные техногенные нагрузки.

В последнее время в этой зоне были разработаны такие проекты, как комплекс защитных сооружений Ленинграда от наводнений и морское водохранилище в Онежской губе Белого моря. Первый проект уже находится в стадии практической реализации, второй, работающий на общий проект переброски части стока северных рек в бассейн Волги, отложен из-за экологических и экономических соображений. В целом, оба проекта по многим природоохранным позициям оказались недостаточно проработанными. Разработка этих проектов в 70-х гг. обусловила постановку геологических исследований и в ряде случаев предоставила геологам возможность изучить геологические разрезы значительных участков морского дна, прежде всего в котлованах судопропускных сооружений на глубину до 20-25 м ниже поверхности морского дна.

Наиболее детальному инженерно-геологическому изучению подверглись участки трасс безнапорных дамб комплекса защиты от наводнений. На них выявлена типичная для гляциального шельфа ситуация, когда донную поверхность слагают верхнечетвертичные отложения и перекрывающие их современные.

В настоящее время может быть предложена достаточно обоснованная концепция основных закономерностей формирования инженерно-геологических условий гляциальных шельфов внутренних морей. Эти выводы касаются прежде всего вопросов инженерно-геологической типизации разрезов, залегающих в основании гидротехнических сооружений, и вопросов оценки неоднородности и изменчивости свойств различных литолого-стратиграфических комплексов четвертичных отложений.

В строении четвертичного покрова отмечается вполне закономерная смена типов отложений, связанная с характером деградации оледенения и позволяющая выделять в разрезе ряд формаций, состав и условия залегания которых являются характерным признаком гляциальных шельфов.[x]

В основании четвертичного покрова, представляющего собой в целом своеобразную формацию четвертичных отложений, залегают отложения ледниковой субформации, включающие в себя прежде всего континентальные моренные образования, связанные с завершающими стадиями валдайского оледенения (лужской, невской и их аналогами). Они перекрываются осадками ледниково-водной субформации (ледниково-озерными и ледниково-морскими), накопление которых происхо-

---

[x] Спиридонов М.А., Рыбалко А.Е., Захаров М.С., Корвет Н.Г. Особенности геологического развития гляциальных шельфов в позднем плейстоцене-голоцене и характерные черты формирования состава и физико-механических свойств осадочного покрова (на примере Баренцева, Белого и Балтийского морей) // Изучение геологической истории и процессов современного осадкообразования Черного и Балтийского морей. Киев: Наукова думка, 1984.

дило в водных бассейнах под определяющим воздействием ледникового покрова, что и предопределило своеобразие их строения, текстурного облика, вещественного состава. В поздне-послеледниковой истории - это этап наиболее мощного осадконакопления, который обусловил практически повсеместное развитие рассматриваемых осадков.

Венчают разрез отложения водной (озерной, морской) субформации, осадки которой отражают сложный ход становления морских бассейнов, происходивший на фоне гляциоизостатического подъема берегов, неотектонических движений различного знака и значительного уменьшения поступления осадочного материала. Следствием этого явилось значительное сокращение зон аккумуляции и их пространственная разобщенность, а также широко развившийся на шельфе процесс подводного размыва и переотложения осадков.

Процессы накопления моренных отложений на гляциальном шельфе зависели от характера движения ледника. Если он непосредственно налегал на морское дно, его морена практически не отличима от соответствующих образований континентального типа. В условиях шельфового оледенения, вероятно, формировались специфические типы моренных отложений, в образовании которых существенную роль играла водная среда. С одной стороны, это маломощные плащеобразные моренные покровы: серые и темно-серые твердые или полутвердые пылеватые суглинки, супеси, реже пески невысокой влажности, насыщенные обломочным материалом. Непосредственные наблюдения в стенках котлована судопропускного сооружения С-I (южные ворота Невской губы) показали, что песчаные слои в толще морены имеют различную форму. Особенно интересными выглядели поперечные сечения слоев, имеющие правильную прямоугольную форму со сторонами 5-6 и I0-I5 м. Детальные исследования по трассе дамбы показали, что кровля лужской морены имеет причудливые очертания. Сетка скважин, пробуренных для выявления отложений кровли, на некоторых участках оказалась слишком редкой. Мощности основного моренного покрова составляют от I-2 до 20-30 м.

На некоторых участках гляциального шельфа наблюдается налегание друг на друга моренных слоев различных стадий. В частности, в южной части трассы разрез моренных отложений заканчивается суглинками невской стадии валдайского оледенения мощностью до I5 м. В понижениях доледникового рельефа, например на северном участке, невские и лужские слои разделены довольно мощной (до 26 м) толщей межстадиальных образований (охтинские слои), представленных песками с прослоями суглинков и глин. Показатели физико-механических свойств моренных отложений суши и акватории весьма близки. Моренные суглинки характеризуются очень плотным сложением (естественная плотность 2,20-2,25 г/см^3), влажность не превышает 8-I5 %, пористость - I8-39 %.

В зонах активной гляциодинамики могут наблюдаться значительные мощности морены, для них характерны различные гляциодислокации и диапиризм. Такие морены заполняют линейные желоба, скапливаются перед структурно-денудационными уступами, создающими преграды на пути движения ледника. В этих зонах могут формироваться мореноподобные образования с пониженной плотностью, заметной дифференциацией включений различной крупности. Они

представлены различными глинистыми разностями от мягкопластичной до текучей консистенции с пониженными показателями прочности.

Весьма типичными для гляциального шельфа являются краевые и конечные моренные образования, формирующие гряды и изометрические холмы с относительными превышениями в несколько десятков, иногда сотен метров. Они имеют зональное строение, отражающее расположение и взаимодействие различных ледниковых языков и потоков, и играют решающую роль для современной придонной гидродинамики, движения и распределения осадочного материала. Любые строительные работы в пределах таких участков столкнутся с очень разными геологическими условиями и потребуют весьма детальных изысканий.

Ледниково-водный этап развития гляциальных шельфов характеризуется образованием на более ранних этапах (по сравнению с прилегающей сушей) озерно-ледниковых, флювиогляциальных или ледниково-морских отложений[X]. Во внутриконтинентальных бассейнах накопление рассматриваемых осадков происходило в условиях полной или частичной изоляции от Мирового океана. В первом случае (Финский залив) формировались типичные ленточно-слоистые осадки. Текстурные и структурные особенности (уменьшение мощности слойков, сопровождаемое уменьшением среднего размера обломочных частиц и улучшением сортировки) отражают постепенное углубление ледниково-озерных бассейнов и отступание края ледника. Буровато-коричневатые тона окраски указывают на низкую биологическую продуктивность приледниковых водоемов, окислительный характер седиментогенеза и, как следствие, низкое содержание $C_{орг}$.

В Белом море, которое, начиная с раннего триаса, уже имело частичную связь с океаном, наряду с типичными ледниково-озерными глинами накапливались монотонные, неясно слоистые или ленточноподобные осадки серых и коричневато-серых тонов с постоянной примесью грубообломочного материала. Анализ геохимических особенностей и диатомовой флоры свидетельствует, что осадконакопление происходило в холодноводном бассейне, имеющем непосредственный контакт с краем ледника. Данный бассейн постепенно распространялся по всей котловине Белого моря, проникая и в более ранние приледниковые озера. Такой характер развития привел к значительной фациальной изменчивости осадков, резкому колебанию их мощностей.[XX]

По гранулометрическому и минеральному составу ледниково-озерные и ледниково-морские слои образуют единую ассоциацию. Основным глинистым минералом в частности является гидрослюда (80-95 % глинистой фракции), отмечено присутствие хлорита, отдельные пластинки каолинита и монтмориллонита. Физические свойства водно-ледниковых отложений отмечает весьма высокая изменчивость на различных участках гляциального шельфа (табл.I).

[X] Там же.

[XX] Спиридонов М.А., Рыбалко А.Е., Захаров М.С., Корвет Н.Г. Закономерности формирования инженерно-геологических условий гляциальных шельфов и принципы их районирования // Записки Ленинградского горного ин-та. 1986. Т. 109.

Таблица 1

Основные показатели физических свойств ледниково-водных отложений верхнеплейстоценово-голоценового возраста

Район, отложения	Плотность, г/см³			Влажность, %			Коэффициент пористости
	естественная	минеральной части	сухой породы	естественная	на пределе текучести	на пределе раскатывания	
Белое море, Онежский залив							
Северо-западная часть	1,92 / 1,63	2,77 / 2,78	1,46 / 0,99	37 / 72	26 / 46	15 / 24	0,83 / 1,99
Юго-восточная часть	1,83 / 1,64	2,73 / 2,75	1,27 / 1,02	42 / 62	40 / 40	24 / 22	1,13 / 1,74
Восточная часть Финского залива							
Озерные (нижнеголоценового возраста)	1,65	2,75	1,02	62	37	18	1,70
Озерно-ледниково-надленточные (балтийские слои)							
Глины коричневые							
монотонные	1,63	2,74	0,99	65	39	22	1,78
неясно слоистые	1,50	2,75	0,78	92	48	25	2,53
Озерно-ледниковые ленточные (лужские слои)	1,61	2,77	0,96	68	41	22	1,89

Примечание. В числителе – ледниково-озерные отложения, в знаменателе – ледниково-морские.

Таблица 2

Физические свойства надленточных и ленточных суглинков

Участок	Влажность, %			Плотность сухой породы, г/см³
	естественная	на пределе текучести	на пределе раскатывания	
Южные ворота	34 / 41	30 / 40	19 / 22	1,41 / 1,26
Северные ворота	30 / 36	27 / 32	18 / 21	1,48 / 1,38

Примечание. В числителе – суглинки надленточные, в знаменателе – суглинки и глины ленточные.

При детальных инженерно-геологических исследованиях обычно фиксируют значительную изменчивость свойств этих отложений как по глубине, так и по площади. Так, в Южных воротах плотность сухой породы $\rho_{ск}$ возрастает с глубиной от 1,18 до 1,33 г/см³, в Северных – от 1,37 до 1,44 г/см³. Обычно в разрезе ленточной толщи удается выделить надленточные слои, пред-

ставленные более грубыми по составу неясно слоистыми суглинками, и собственно ленточные суглинки и глины с ясной полосчатой текстурой (табл.2). В толще ленточных отложений значительной мощности четко фиксируются две глинистые разности близкого гранулометрического состава, но различной влажности: соответственно 55 и 42 % в верхней части разреза, вблизи поверхности дна, и в нижней его части.

В целом водно-ледниковые отложения должны быть отнесены к группе недостаточно литифицированных пород, строительство на которых невозможно без применения специальных инженерных мероприятий. При строительстве защитных сооружений уже зафиксировано сползание участка дамбы, который был использован в качестве временного резерва для песка, отсыпанного до отметки, соответствующей проектной высоте дамбы. Поэтому было рекомендовано дренировать основание дамбы на ленточной толще с помощью вертикальных песчаных дрен, расстояние между которыми уточняется на опытных полигонах.

При переходе к типично морскому седиментогенезу на гляциальном шельфе стали образовываться специфические переходные горизонты разнородных рыхлых образований. При этом в разрезе внутреннего шельфа отразился сложный в палеогеографическом отношении и разновременный процесс перехода от ледниково-морских (ледниково-озерных) условий к условиям нормального по химизму, биологии и термике морского бассейна.

Белое море, например, развивается в пребореале и бореале как постепенно осолоняющийся морской бассейн, а Балтика в тот же период представляет собой вначале изолированный озерный бассейн, который лишь на последней стадии развития получает устойчивую связь с морскими водами.

Типичная морская аккумуляция на гляциальном шельфе носит в основном локальный характер. На обширных площадях морского дна господствует размыв или условия "нулевой седиментации", что и обусловило возникновение и широкое развитие специфических реликтовых образований - подводного эллювия. Локальная аккумуляция ограничена зонами прибрежного песчаного накопления, подводных течений, где возникают динамичные формы песчаной аккумуляции (волны, ленты, гряды), а также во впадинах и присклоновых участках, где формируются типичные глинистые илы.

На Финском заливе илы залегают первым от поверхности дна слоем, перекрывая поздне- и послеледниковые глины. Они образовались в среднем и позднем голоцене в литориновую и послелиторинновую (лимненую и мидиевую) стадии формирования Балтийского моря и локализованы в пониженных участках рельефа дна со спокойным гидродинамическим режимом. Мощность илов в этом регионе в среднем 4-5 м, в отдельных карманах она выше. По текстурно-структурным признакам толща илов в восточной части залива может быть разделена на четыре разновидности (табл.3).

Среди илов преобладают суглинистые пылеватые разности, редко переходящие в супесчаные или глинистые илы. Обогащение илов органическим веществом приводит к образованию сапропелевидных илов, характеризующихся темной, вплоть до черных тонов, окраской. Распределение органического вещества и

изменение гранулометрического состава обусловливает появление полосчатых и пятнистых разностей. Разности, обогащенные органическим веществом, часто газонасыщены и макропористы (размер макропор в поперечнике 2–5 мм). Подъем таких илов на поверхность сопровождается обильным газовыделением и разрушением их естественного сложения. Минеральный состав тонкодисперсной части илов представлен в основном гидрослюдами и слюдами с добавками тонкодисперсного кварца и других терригенных минералов. Во всех горизонтах отмечено большое количество остатков диатомовых водорослей. В грубодисперсной фракции преобладают кварц и полевые шпаты.

Таблица 3

Физические свойства верхнеплейстоценово-голоценового возраста морских отложений

Участок	Тип отложений	Плотность, г/см^3			Влажность, %			Коэффициент пористости
		естественная	минеральной части	скелета	естественная	на пределе текучести	на пределе раскатывания	
Белое море	Верхнеплейстоценово-голоценовые глинистые илы	1,48 / 1,33	2,76 / 2,76	0,68 / 0,57	115 / 190	54 / 55	28 / 28	2,95 / 4,53
	Голоценовые суглинистые и глинистые илы	1,60 / 1,52	2,75 / 2,80	0,99 / 0,78	76 / 96	56 / 40	29 / 20	1,9[illegible] / 2,9[illegible]
Восточная часть Финского залива	Зеленый макропористый ил	1,31	2,65	0,51	160	100	47	4,16
	Зеленый монотонный ил	1,33	2,68	0,54	146	78	36	3,91
	Зеленовато-желтый полосчатый ил	1,31	2,67	0,49	170	65	30	4,45
	Серый монотонный ил	1,20	2,64	0,33	260	101	51	6,97

Примечание. В числителе – для Онежского залива, в знаменателе – для центральной части моря.

Для толщи илов характерна существенная изменчивость свойств по глубине. Так, изменение влажности определяется изменениями гранулометрического состава и содержанием органического вещества, поэтому на любой глубине могут быть зафиксированы сильно гидратированные отложения, хотя для верхнего слоя максимальная влажность достигает 350–400 %. Влажность на пределе текучести для илов значительно ниже естественной влажности, что говорит о текучей консистенции. Показатель гидратированности закономерно убывает от верхних слоев к нижним, что свидетельствует о постепенном гравитационном уплотнении илов. Низкая уплотненность и высокая влажность обусловливает весьма низкие показатели плотности и плотности сухой породы, которые меньше единицы (для серых монотонных илов $\rho_{сх} = 0{,}33$ г/см^3). В гидрофильном отношении илы весьма активны, и показатель коллоидной активности $Д_к = 2{,}0$–$3{,}0$.

Для подобного рода осадков большое значение имеет оценка их тиксотропных свойств, проявление которых может резко изменить устойчивость и прочность при воздействии на них динамических нагрузок, вызывать их значительные осадки, развитие оползней, увеличение давления на ограждения и подпорные стенки. Исследование кинетики тиксотропного упрочнения на пастах различных разновидностей илов показали, что это упрочнение идет с высоким градиентом и за месяц прочность нарушенных илов увеличивается в 2–3 раза. Повышенное содержание органического вещества несколько замедляет процесс тиксотропного упрочнения (Хромых, 1984).

Гранулометрический состав этой серии осадков характеризуется высоким содержанием глинистой фракции: от 30 до 70 % (пылеватая фракция 23–65 %, песчаная 1–29 %).

Минеральный состав осадков характеризуется смесью гидрослюд и хлорита с примесью терригенных минералов. В песчаной фракции преобладают кварц и полевые шпаты, в тяжелой фракции – аутигенный пирит (до 90 % во фракции 0,1–0,05 мм) комковатой, микроолитовой и цилиндрической формы. Нередко отмечаются и сажистые примазки гидротроилита.

Морские голоценовые осадки чаще всего имеют двухчленное строение: внизу глинистые и суглинистые разности зеленовато-серого цвета с черными сажистыми примазками органического вещества и отдельными створками раковин, вверху суглинистые разности с гнездами песка и зернами гравия. В глубоководных частях глинистость осадков растет (в среднем 50–70 %), хотя двухчленное строение в целом сохраняется.

Изучение минерального состава верхней пачки морских осадков показало, что для них характерен тот же состав, что и для ленточных глин и осадков нижнего морского комплекса. Это указывает на единый и неизменный для всего периода источник сноса. При этом увеличение в составе тонкодисперсной части роли собственно глинистых минералов, заметное снижение содержания кварца, полевых шпатов, увеличение степени гидратации слюдистых минералов указывает на определенное различие гидрохимической обстановки в периоды формирования ленточных глин и типичных морских осадков.

В целом содержание органических компонентов в морских осадках гляциального шельфа невелико. Потери при прокаливании не превышают 8–10 %, а содержание органического углерода обычно составляет 1,1–1,4 %.

Химические анализы донных осадков показали, что распределение железа, марганца, титана зависит от их гранулометрического состава, и максимальное количество этих элементов содержится в глинистых илах, особенно перед устьями рек, несущих большое количество железистых взвесей. В Невской губе, Рижском заливе существенно развито техногенное загрязнение тяжелыми металлами, особенно свинцом, медью, цинком, ртутью. Следует отметить, что поровые воды морских осадков по сравнению с ледниковыми и ледниково-морскими существенно обогащены фосфатным фосфором, нитритным и аммонийным азотом, кремнием.

В заключение отметим, что в верхней части покрова осадков поздне-

плейстоценово-голоценового возраста значительную роль играют песчаные отложения, которые по механизму и времени своего образования могут быть разделены на четыре типа (Рыбалко, 1985).

Начало накопления песчаных фаций следует отнести ко времени первичного распада ледникового покрова, когда небольшие песчаные тела накапливались за счет местного размыва морены и возможно преобладали в отдельных долинах стока талых вод.

Наиболее значительные скопления песков относятся к литориновому времени. В этот период при более низком, чем сейчас, уровне моря шло формирование прибрежных аккумулятивных тел значительной мощности и протяженности. Сейчас эти аккумулятивные террасы расположены на глубинах 6–12 м и, как правило, не имеют связи с современными прибрежными зонами. Часть этих тел интенсивно используется для добычи строительных песков.

В зоне современного волнового поля и прибрежных аккумулятивных равнин располагаются наиболее значительные скопления песков. Они встречаются повсеместно, начиная с глубин 5–7 м, но наиболее распространены в пределах пологовогнутых частей берега, где на протяжении всего голоцена существовали зоны устойчивого песчаного накопления. Качество и мощность песков береговой зоны вполне удовлетворительное для строительной индустрии, но их добыча сильно осложнена постоянно проявляющимися процессами размыва берега, особенно во время сильных штормов.

Четвертый тип песчаных отложений образуется за счет размыва моренных отложений при понижении уровня моря в голоценовое время. Распределение их носит очаговый характер, а мощность варьирует от 2–3 до 10–15 м.

Чистые пески сочетаются с гравийно-галечными образованиями, часто прерываются выходами морен и ледниково-озерных глин. Хотя запасы песка здесь велики и глубины моря благоприятны, в целом условия их разработки значительно осложнены.

Таким образом, отличительные особенности инженерно-геологических условий рассмотренных морских бассейнов определяются сложным строением самого геологического разреза и неоднородностью физико-механических свойств образующих его пород.