УДК 624.131.1 (261.3)

М.С.Захаров

ПРОБЛЕМЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОЦЕНКИ ДНА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В РАЙОНАХ ЗАТОПЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ БОЕПРИПАСОВ

Рассмотрены состав, методика и результаты инженерно-геологических исследований по программе Морского экологического патруля за 1990-1994 гг. в Балтийском море. Обсуждаются результаты некоторых модельных экспериментов и расчетов для грунтов морского дна в районах затопления опасных техногенных объектов.

The composition, the methods and the results of engineering-geological investigations according to the Programme of Naval Ecological Patrol in Baltic Sea during 1990-1994 were considered.

The results of some modeling experinces and calculations for bottom's sediments in the interments of dangerous technological objects are being discussed.

1. Основные принципы, цели и задачи инженерно-геологических исследований в составе Морского экологического патруля

Инженерно-геологические исследования (ИГИ) прочно утвердились в составе программы Морского экологического патруля Балтийского моря (МЭП) с 1990 г. и охватили все полигоны, где были осуществлены экспедиционные наблюдения на судах "Академик Крылов" (1990-1991) , "Профессор Мультановский"(1992-1993), " Академик Шулейкин" (1994).

Необходимость и полезность инженерно-геологической информации к этому времени была подтверждена в ходе опытно-методических работ по геологической съемке шельфа масштаба 1:200 000, ведущейся с 1976 г. и охватившей до 30-40 % площади российской части дна всей Беломорско-Балтийской депрессии.

Дальнейшее развитие ИГИ следует связать с реализацией государственных российских программ экогеологических съемочных работ в масштабах от 1:200 000 до 1:25 000. В составе этих работ ИГИ предусмотрены как самостоятельная и

обязательная часть. Важным моментом может стать и международная интеграция стран Балтийского региона, среди которых Россия выделяется наиболее развитым инженерно-геологическим потенциалом в морских исследованиях Балтики и уже значительным банком информации.

Конкретная разработка программ ИГИ для рейсов МЭП 1990-1994 гг. опиралась на общеизвестные экологические императивы, сформулированные впервые Б.Коммонером (1972):

1) все связано со всем;

2) все должно куда-то деться;

3) природа знает лучше;

4) за все надо платить(всеобщее улучшение природы невозможно).

Последнее утверждение,пожалуй, наиболее предостерегающе звучит для инженерной геологии, нацеленной изначально на решение конкретных инженерно-строительных задач.

Участие в программе МЭП позволило сконцентрировать внимание ИГИ по трем основным направлениям:

1. Региональная характеристика состава, состояния и свойств основных комплексов пород, слагающих морское дно.

2. Инженерно-геологическая характеристика и оценка береговой зоны в целом (акватория плюс прилегающая суша) как природно-организованной целостности с учетом техногенных изменений и современных техногенных нагрузок.

3. Решение конкретных инженерных задач по взаимодействию различных строительных объектов и инженерных работ с геологической средой, в частности задачи о погружении различных объектов в породы морского дна.

По первому направлению инженерно-геологическая группа МЭП обладает обширным фактическим материалом,-бо́льшая часть которого осела в фондах исполнителей (Всероссийский геологический институт им. Карпинского и Санкт-Петербургский горный институт им. Плеханова) и лишь частично была опубликована [2-5, 7]. Этот материал позволяет дать инженерно-геологическую характеристику по основным показателям физико-механических свойств практически всем комплексам пород береговой зоны Финского залива четвертичного и дочетвертичного возраста.

По второму направлению за последние годы был выполнен комплексный предпроектный анализ инженерно-геологической обстановки береговой зоны по ряду объектов строительства или реконструкции (Онежский залив Белого моря, Нарвский залив,Таллинский залив, Сестрорецкое побережье Невской губы, портовая зона о.Канонерский).

Третье направление, помимо различных консультаций и рецензирования строительных проектов (например, проекта Санкт-Петербургской станции очистки донных грунтов), наиболее ярко материализовалось в исследовании задачи о возможной глубине проникновения техногенных объектов в породы морского дна.

Безусловно, далеко не все поставленные проблемы решены должным образом. Продолжает обостряться аппаратурно-методический "голод".Инженерно-геологические набортные экспресс-определения чрезвычайно трудоемки и нуждаются в простом и надежном оборудовании. Однако множество оригинальных отечественных разработок, не уступающих иностранным, а во многом их превосходящих, существуют только на уровне рабочей документации, а те, что реализованы в единичных экземплярах, не имеют метрологического обеспечения и не состыкованы со стандартами развитых стран.

2. Общая инженерно-геологическая характеристика Борнхольмской и Южно-Готландской впадин

Местоположение и рельеф. Районы затопления трофейного химического оружия приурочены к Борнхольмской и южной части Готландской впадин, которые расположены в южной зоне Балтийского моря и отделены друг от друга Поперечным порогом и Слупским желобом.

Борнхольмская впадина с запада ограничена Борнхольмским плато, а с востока - склонами Слупско-Осетницкого и Готландского плато. Глубина впадины составляют 70-90 м при максимальной - 98 м.

Готландская впадина,имеющая четкую меридиональную ориентировку, зажата между Готланским плато на западе и Клайпедско-Вентспилским плато на востоке. В восточной части впадины преобладающие глубины составляют 150-180 м, а максимальная достигает 249 м. В западной части впадины глубина меняется от 120 до 160 м.

Обе впадины находятся в зоне ледниковой аккумуляции,накопления которой послужили субстратом субаквальных аккумулятивных образований, возникших в голоцене после формирования морских или озерных бассейнов. Впадины обрамлены пологими склонами,на которых прослеживаются абразионно-аккумулятивные лимногляциальные и моренные поверхности с фрагментами моренного холмистого рельефа, подводных долин, денудационных уступов и локальных реликтовых понижений. На дне Борнхольмской впадины отмечены отдельные блоковые денудационные поднятия, а в Готландской

впадине - продольный вал, в пределах которого на силурийские рифогенные образования насажены денудационные поверхности Пандиверского оледенения.

Обе впадины относятся к морфоструктурам второго порядка, заложенным в зоне сочленения Балтийского щита, Русской и Среднеевропейской плит в результате тектонической активизации и коробления ранее пенепленизированной поверхности в течение неогена [1].

Методика исследований. В соответствии с задачами исследований на борту производились экспресс-определения простейших параметров: влажности, плотности, условного предельного напряжения сдвига, сопротивления вращательному срезу, остаточного содержания газа (в приборе конструкции Н.А.Парцевского), а в ходе рейса МЭП-94 также усилия отрыва латунного штампа от выровненной поверхности грунта нарушенного сложения, загруженного в специальную камеру (с помощью прибора конструкции ДОРНИИ), и, кроме того, рассчитывалась объемная усадка после высушивания водонасыщенного осадка в специальных бюксах.

В 1993-1994 гг. проводились работы по обоснованию параметров модели погружения техногенных объектов в донные отложения (прежде всего Южно-Готландской и Борнхольмской впадин),а также формированию представлений об устойчивости и подвижности современных осадков в случае нарушения их сложения инженерными работами. С этой целью были выполнены специальные модельные эксперименты в прозрачном лотке.

Показатели плотности определялись по образцам, отбираемым либо из ковша,либо из пробоотборной трубки; влажность - методом сушки до постоянной массы при температуре 105 ^{0}C в портативных сушильных шкафах. Для оценки предельного напряжения сдвига использовались конусы различных массы (8 и 35 г), высоты (2 и 3 см) и угла заострения ($17^0 40'$ и 30^0). Сопротивление вращательному срезу изучали с помощью лабораторной крыльчатки (прибора вращательного среза ПВС-3 конструкции В.Н.Бронина). Для последующих расчетов пористости, коэффициента пористости, плотности скелета в лаборатории кафедры инженерной геологии Санкт-Петербургского горного института производилось выборочное определение плотности минеральной части.

Осуществляемый в ходе рейсов пробоотбор (ковши-черпатели и легкие гравитационные трубки-стратимеры конструкции Л.Ниймисто) позволял выполнять систематические исследования в слое осадков, как правило, мощностью не

более 40-50 см путем отбора образцов через 5-10 см в бюксы и кольца различных размеров. Лишь в исключительных случаях, главным образом в ходе МЭП-91 и МЭП-92, пробоотбор производили тяжелой гравитационной трубкой диаметром 127 мм.

В этом случае удавалось исследовать разрезы значительной мощности (до 1,5-3,0 м), но при этом верхняя часть разреза , как правило, утрачивалась при подъеме. Если в верхней зоне изученных разрезов преобладали современные алевроглинистые, редко песчаные, отложения, то в нижней зоне, тяжелой трубкой захватывались отложения более древних горизонтов (литоринового, анцилового, балтийского). Таким образом , основной фактический материал , собранный за 1991-1994 гг., относится в основном к верхней зоне современных осадков,которые весьма редко попадают в поле зрения инженеров-геологов, поскольку в силу специфики своего состояния не используются ни как основание, ни как среда инженерных сооружений. Благодаря тому, что исследованиями был охвачен достаточно широкий спектр донных отложений,появилась возможность более глубокого осмысления диагенетических превращений субаквальных осадков и начальных процессов формирования физико-механических свойств песчано-глинистых разностей морского дна Балтики.

Почти все пробоотборные станции документировались в специальных дневниках с зарисовкой геологического разреза, отметками пробоотбора и состава выполненных исследований. Для оперативной обработки материалов использовался пакет программ SUPERCALC 4.

Упомянутые модельные эксперименты заключались в выполнении визуальных наблюдений за поведением моделей откосов с заложением 1:1 (45^0)и высотой 10 см в специальном прозрачном лотке, в качестве которого использовался прибор для определения угла естественного откоса песков под водой. Модель 94-49 (верховья Лужской Губы) была выполнена из черных желеобразных илов (влажность W = =265÷323 %, плотность ρ = 1,12 г/см^3); модель 94-63 (Нарвский залив) из серых однотонных илов нижерасположенного горизонта (W = 136 %, ρ = 1,36 г/см^3).Модели откосов закладывались в поворотные боксы, позволяющие менять положение поверхности откоса (с горизонтального на угол 45^0). Модели заливали морской водой, периодически в течение суток поворачивали по нескольку раз на 45^0 .Все изменения в поведении моделей фиксировались и зарисовывались в специальный журнал, а поведение модели 94-63 было заснято на видеопленку.

Модель 94-49 разрушилась в течение 2 ч после подрезки откоса путем удаления части материала и создания вертикальной стенки высотой 5 см. Модель 94-63 после аналогичной подрезки не разрушилась даже после выдерживания и периодических вращений в течение 12 суток, хотя дугообразное трещинообразование и постепенное раскрытие трещин в приборовочной части модели было весьма заметным.

Характеристика верхней части разреза. Как правило, в пределах глубоководных частей Балтики , в том числе и исследованных впадин, в геологическом разрезе четко обособливаются четыре горизонта, закономерно сменяющих друг друга сверху вниз.

1.Бурый, коричнево-бурый, хлопьевидный (флокулированный) осадок (наилок). В некоторых точках наблюдалась флокуляция градационного типа с уменьшением размеров образований книзу. Мощность этого слоя не превышает 1-2 см, а чаще составляет доли сантиметра. На больших глубинах, где содержание кислорода снижается до 4-2 мг/л, окраска этого осадка приобретает типичные серые тона . Влажность слоя может достигать 600-700 % при плотности немногим более единицы (1,04-1,08 г/см^3). Естественно, что этот осадок легко взмучивается и течет, как тяжелая вязкая жидкость. В этом слое отмечена активная жизнь различных донных организмов,а его цвет указывает на активно протекающие процессы окисления.Следует отметить,что концентрация водородных ионов в придонном слое воды колебалась от 7,25 до 7,95, а в иловых водах, отжатых на центрифуге, от 6,75 до 7,35. Прибор вращательного среза и даже легкие конусы (до 8 г) слишком грубы для замера каких-либо прочностных показателей этого слоя.

Содержание нефтепродуктов в поверхностном слое осадков менялось в весьма широких пределах: от 2 мг/кг (точка наблюдения 94-75 в Борнхольмской впадине) до 58 мг/кг (точка наблюдения 94-65 в Южно-Готландской). Следует отметить,что в Борнхольмской впадине в некоторых точках содержание нефтепродуктов в придонном слое воды оказалось выше, чем в приповерхностном . Однако в целом содержание нефтепродуктов в обеих впадинах намного ниже,чем в Финском заливе, где были зафиксированы следующие максимальные значения : в водной толще до 0,19 мг/кг , в грунтах до 300 мг/кг . Весьма настораживает тот факт, что в ряде случаев наблюдается превышение содержания нефтепродуктов в водной толще относительно ПДК для водохозяйственных и рыбохозяйственных нужд (0,05 мг/л). Максимально допустимые концентрации (0,3 мг/л)в ходе МЭП не были отмечены.

2. Серый, желтовато-серый, с черными сажистыми примазками, зернистый (стяжения аморфных сферолитов) ил, очевидно, представляющий первую стадию диагенетических преобразований вышележащего наилка. После подъема на борт часто резко отслаивался от нижележащего слоя по крупным неровным трещинам,возникновение которых, возможно, связано с литологической неоднородностью осадка. Мощность слоя достигает 2-3 см. Влажность в зависимости от тщательности отбора пробы (захват вышележащего или нижележащего слоя) колеблется от 250 до 450 %, а плотность от 1,11 до 1,17 г/см^3. В этом слое фиксируется предельное напряжение сдвига R_0 на уровне 3-4 гПа, в очень редких случаях на 1-3 деления сдвигается индикатор ПВС, что дает максимальное сопротивление вращательному срезу τ_{max} до 1-2 гПа.

3. Черный, иногда с зеленоватым оттенком, желеобразный ил вязкопластичной консистенции с различными формами включенной органики вплоть до слаборазложившихся остатков. Мощность слоя 10-15 см с неровным, но достаточно отчетливым цветовым контактом с подстилающим слоем. Влажность, как правило, лежит в пределах 200-350 % при плотности 1,15-1,25 г/см^3. Характерно,что именно из этого слоя после-подъема на борт интенсивно выделяется газ с отчетливым запахом сероводорода, а остаточное содержание растворенного газа может доходить до 5-10 %. Выделение газа сопровождается трещинообразованием и растрескиванием образцов. Объемная усадка после сушки достигает 85-90 % при резком искривлении поверхностей высушиваемых образцов. Влажность и плотность в этом слое меняется резко и незакономерно, но книзу наблюдается иногда некоторое уплотнение и дегидратация осадка. Усилие отрыва латунного штампа от поверхности осадков слоя колебалось в пределах от 4 до 18 гПа, предельное напряжение сдвига R_0 - от 3-4 до 9-10 гПа, а сопротивление вращательному срезу достигает 5-6 гПа. По региональным данным, содержание органики по потерям при прокаливании составляет 2-7 %, количество $C_{орг}$ может достигать 5-6 %, карбонатность, как правило, низка и не превышает 1-2 %. Показатель консистенции I_L лежит в пределах 2-4.

4. Темно-серый, серый с зеленоватым оттенком ил, иногда с желтыми разводами, пятнами и полосами (пестроокрашенные пятнистые и полосчатые илы). Мощность изученного слоя 20-40 см, иногда наблюдался постепенный переход к однотонным сероцветным осадкам литоринового или анцилового горизонтов; в последнем могли наблюдаться скопления гидротроилита. Наиболее часто встречающиеся значения влажности и плотности 220-280 % и 1,22-1,27 г/см^3. Предельное

напряжение сдвига в этом слое растет до 12-15 гПа, сопротивление вращательному срезу 9-10 гПа, усилие отрыва штампа от поверхности осадков этого слоя 11-17 гПа, объемная усадка 74-85 %.

В точке наблюдения 94-49 (верховья Лужской Губы) под слоем 3 были встречены сероцветные уплотненные илы с многочисленными мелкими белесыми точками предположительно вивианита. Влажность этих осадков составила 66-76 % при плотности 1,48-1,59 г/см^3, при укладке в кольца наблюдался "подушечный" эффект, но прочность была относительно низкой: $R_0 = 13 \div 17$ гПа, $\tau = 10$ гПа.

Наиболее представительный разрез послелиториновых отложений (2,6 м) был вскрыт в точке наблюдения 91-202 . В этом разрезе серые с зеленоватым оттенком алевритопелитовые илы вязкопластичной консистенции демонстрируют с глубиной постепенное уплотнение и дегидратацию:

Интервал, см	W, %	ρ, г/см^3	R_0, гПа	τ_{max}, гПа	$V_г$, %
40-49	184	1,27	36	26	18
190-199	141	1,36	146	66	17-29

Примечание. $V_г$ - содержание остаточного газа.

В нижнем интервале столь необычные для илов показатели связаны с обильным газовыделением, в результате которого осадки приобретают сухарный облик, комковатую и оскольчатую отдельность. Газовыделение, вероятно, способствует иссушению осадка и относительному росту плотности и прочности.

Наиболее полный разрез литориновых отложений был вскрыт в точке наблюдения 91-206. В этом разрезе, где вязкопластичные глинистые алевриты с глубиной сменяются серыми монотонными скрытотекучепластичными глинами с тонкой горизонтальной слоистостью, наблюдается закономерное изменение основных показателей с глубиной:

Интервал, см	W, %	ρ, г/см^3	R_0, гПа	τ_{max}, гПа
20-30	250	1,14-1,22	22	12
100-110	197	1,17-1,27	28-44	32
200-210	165	1,19-1,26	44-88	52

Содержание остаточного газа в литориновых осадках часто не улавливается, хотя запах сероводорода и в этих осадках бывает достаточно отчетливым.

Как правило, переход к осадкам литоринового или анцилового горизонтов четко фиксируется по плотностному скачку, когда влажность снижается до 140-190 %, а плотность возрастает до 1,24-1,38 г/см^3. Еще более разительно отличаются от верхних слоев озерно-ледниковые осадки Балтийского озера, но они были встречены в единичных случаях.Так,в Борнхольмской впадине под тонким слоем песков (5-10 см) были вскрыты серовато-коричневые глины с влажностью 66-71 %, плотностью 1,52-1,55 г/см^3, предельным напряжением сдвига 119 гПа, сопротивлением вращательному срезу 139 гПа и усилием отрыва штампа 84 гПа (максимальное из всех произведенных наблюдений).

3. Проблема исследования липкости донных отложений

В ходе МЭП-94 почти для всех исследованных отложений удалось определить усилие отрыва плоского латунного штампа площадью 10 см^2, плотно прижатого нефиксируемым усилием к выровненной поверхности образца нарушенного сложения. Это усилие на супе обычно рассматривается как показатель липкости, т.е.свойства, проявляющегося при взаимодействии различных материалов (в данном случае латунного штампа) на границе раздела фаз (воздух - водонасыщенный грунт - латунная поверхность). Очевидно, на морском дне в условиях гидростатического обжатия процесс отрыва тела, прижатого к поверхности осадка (или погружаемого в осадок), будет протекать иначе, чем в открытой воздушной среде, наиболее близко соответствуя модели чистой адгезии. Поэтому измеряемое усилие в нашем случае можно рассматривать лишь как первое приближение к реальным условиям морского дна, требующее уточнения в специальной камере или, лучше всего, с помощью модельного эксперимента непосредственно на морском дне, для чего может быть задействован подводный аппарат "РИФ".

Общеизвестно, что липкость зависит от влажности грунта, усилия прижима и свойств материала твердого тела. Наибольшее значение липкости наблюдается при влажности, близкой к нижнему пределу пластичности W_p, когда в грунтах максимально проявляются капиллярные силы. Дальнейшее увеличение влажности ведет к резкому падению липкости. Однако начало и максимум проявления липкости в зависимости

от влажности грунта очень непостоянны, зависят и от состава и состояния грунта, и от внешнего давления.

Характерными параметрами липкости грунтов являются: липкость при естественной влажности, максимальная липкость, влажность максимального прилипания. Обычно указывают величину внешнего давления и время его действия; вид поверхности и природа ее материала играют подчиненную роль.

В выполненных экспериментах усилие отрыва в полностью водонасыщенных грунтах вязкопластической консистенции колебалось от 4 до 33 гПа, и лишь в одном случае (в озерно-ледниковых мягкопластичных глинах Борнхольмской впадины) это усилие достигло 84 гПа. Илы отнесены к категории слабо-липких разностей, максимальная липкость которых проявляется при значительном подсушивании и не превышает 50 гПа [6]. В то же время липкость таких разностей, как озерно-ледниковая глина, при нарушенном сложении в условиях суши при влажности 20-35 % (что близко к их пределу пластичности) лежит в пределах 200-600 гПа.

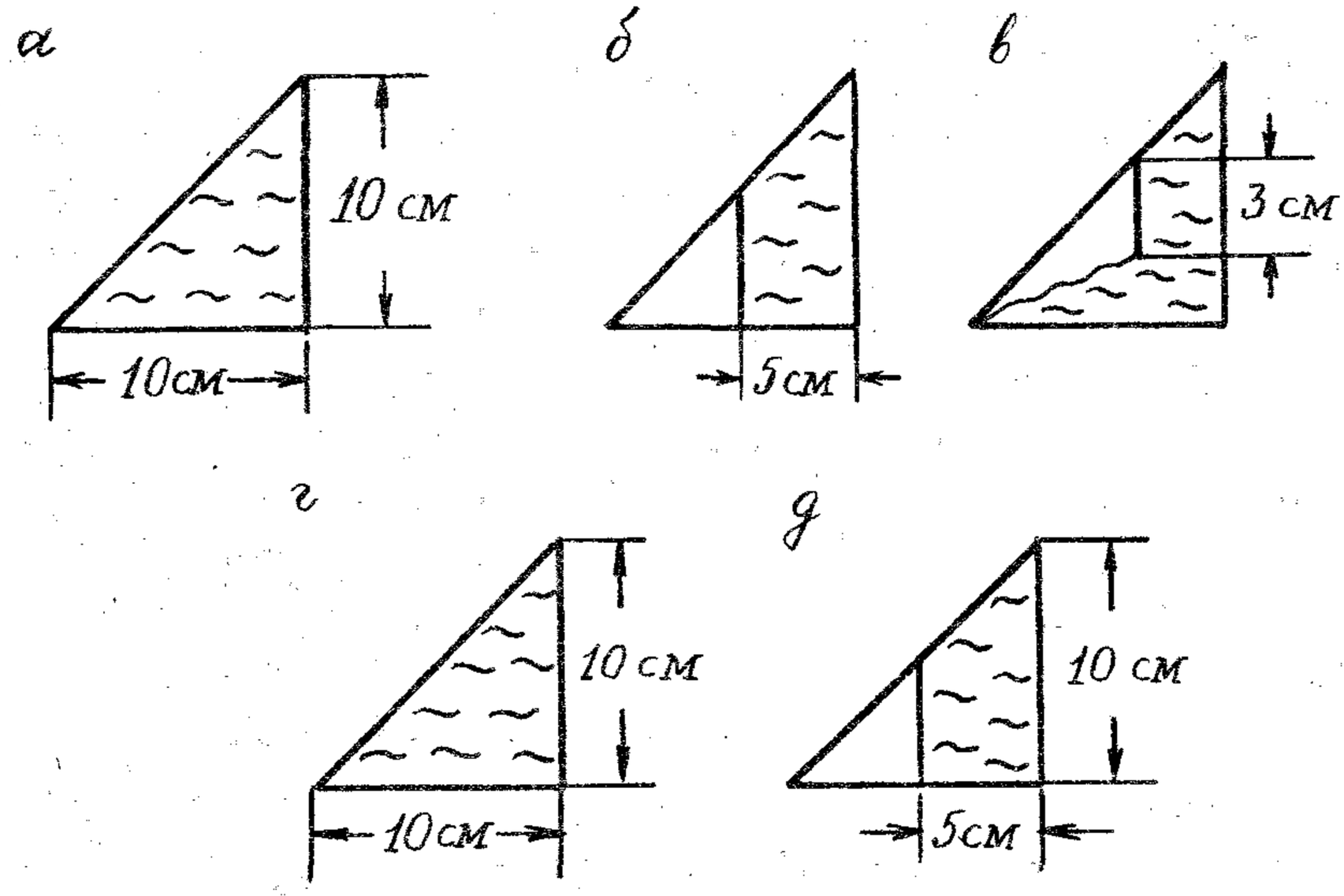
Фактически можно констатировать,что липкость(точнее, прилипание к различным телам и конструкциям) илов алевро-глинистого состава в условиях естественного залегания на морском дне изучена еще недостаточно.

4. Анализ поведения моделей откосов

Выполненные наблюдения позволяют сделать несколько содержательных и методических выводов. Разрушение модели 94-49, выполненной из черных желеобразных илов, шло не по схеме вязкого течения, как можно было ожидать, а как мелко-блоковое обрушение с образованием небольшой вертикальной стенки и приподошвенной отмостки с углом наклона поверхности около 30^0. Устойчивости откоса, очевидно, способствовала сероцветная бронирующая корка, очень быстро сформировавшаяся на поверхности откоса (см.рисунок, а-в).

Подобное поведение слабых полностью водонасыщенных грунтов,обладающих чрезвычайно низкими показателями прочности (R_0 не более 8-10 гПа, τ_{max} не более 5-7 га) ,было достаточно неожиданным. Устойчивость откоса и формирование вертикальной стенки высотой около 3 см(30 % от общей высоты откоса) должны быть приняты во внимание при экскавации подобных грунтов на морском дне.

Вторая модель 94-63 из сероцветных уплотненных илов Нарвского полигона оказа́лась намного прочнее и устойчивее первой. Довести эту модель до полного разрушения откоса не удалось даже через 12 суток, и лишь окончание рейса



Динамика профиля откоса моделей 94-49 (а - в) и 94-63 (г и д): а и г - первоначальный профиль; б - после подрезки; в и д - конечный профиль

заставило прекратить наблюдения за моделью. При этом трещины, возникшие почти сразу после подрезки, медленно и неуклонно расширялись, но обрушения стенки так и не произошло (см.рисунок, г и д).

Таким образом, эксперименты с моделями позволяют утверждать, что современные морские осадки гляциального шельфа Балтики обладают достаточно высокой прочностью и устойчивостью, в них возможна проходка траншей и выемок с вертикальными стенками, которые могут сохраняться длительное время.

5. Моделирование погружения твердых тел в вязкопластичные грунты морского дна

Согласно детальным исследования физико-механических свойств донных отложений постгляциальных депрессий Балтийско-Беломорской зоны вязкопластическое состояние современных морских осадков не вызывает сомнения. В этом отношении они все могут классифицироваться как типичные илы алевроглинистого состава. В наиболее глубоких частях Балтики, к которым относятся Борнхольмская и Южно-Готландская впадины, их мощность может достигать 5-10 м и более. Как было показано , с глубиной происходит довольно существенное *изменение плотности и влажности осадков*, *но прочностные* показатели меняются мало. Очевидно, предельное

напряжение сдвига не выйдет за пределы 100-150 гПа, а сопротивление вращательному срезу - 50-100 гПа.

Подстилающие поздне- и послеледниковые озерные и морские отложения отличаются значительно меньшей влажностью и большей плотностью. Их физическое состояние характеризуется различными категориями пластичной консистенции.

С учетом реальных геологических разрезов дна глубоководных впадин к поставленной задаче возможно приложение как вязкопластической, так и чисто пластической модели погружения.По нашему мнению, последняя наиболее соответствует состоянию изученности всех сторон проблемы.

Ряд параметров модели требует уточнения в ходе дальнейших исследований и модельных экспериментов, особенно с применением подводных обитаемых аппаратов типа "РИФ".

Для решения поставленной задачи могут быть использованы разработки Б.М.Ребрика и С.Н.Гольцова, рассмотревших условия погружения бурового снаряда, сбрасываемого на грунт с определенной высоты [8].

Для пластической и вязкопластической моделей справедливы следующие допущения:

1) удар твердого тела о грунт происходит мгновенно (абсолютно неупругий удар);

2) сопротивление движению тела в грунте включают в себя пластические сопротивления по лобовой поверхности, сопротивления по боковой поверхности, зависящие от величины перемещения тела в грунте, и вязкие сопротивления,пропорциональные скорости движения тела;

3) удельные лобовые, боковые и вязкие сопротивления постоянны;

4) упругие деформации грунтов пренебрежимо малы;

5) удар тела о дно воспринимает некоторая масса грунта, сцепленная с телом, но в дальнейшем движении принимает участие только само твердое тело;

6) величина лобового и бокового сопротивлений зависит от свойств грунтов, геометрических размеров и формы тела.

По нашим наблюдениям, плоские тела со сложной конфигурацией поверхности при свободном падении в воде начинают совершать сложные маятниковые эволюции и врезаются в грунт под самыми различными углами. Все это осложняет однозначное решение задачи, которая в наиболее приемлемом виде может быть рассмотрена для сплошного цилиндрического абсолютно твердого тела.

В общем случае для определения величины внедрения тела в грунт можно воспользоваться теоремой об изменении кинетической энергии твердого тела. Дифференциальное

уравнение движения тела может быть записано в следующем виде:

$$mh'' + \eta h' + \xi h = P - F_л \quad , \qquad (1)$$

где m - масса тела; h''- ускорение движения тела; η - вязкие сопротивления, пропорциональные скорости движения тела; h' - скорость движения тела, $\xi = \pi D f$; D - диаметр тела; f - удельное сопротивление грунта по боковой поверхности; h - глубина погружения тела в грунт; P - суммарная сила тяжести тела; $F_л$ - лобовое сопротивление, $F_л = 0{,}25\ \pi D^2 R_0$; R_0 - удельное сопротивление грунта по лобовой поверхности.

Характеристическое уравнение для уравнения (1) имеет вид

$$ma^2 + \eta a + \xi = 0 \quad . \qquad (2)$$

В рамках пластической модели максимальная величина погружения тела в грунт

$$h_{max} = \frac{P - F_л}{f \pi D} + \sqrt{\frac{(P - F_л)^2}{f^2 \pi^2 D^2} + \frac{P \upsilon^2}{gf \pi D}} \quad ,$$

где υ - начальная скорость движения тела.

Для вязкопластической модели с учетом начальных условий ($t = 0$, $h = 0$, $h' = v$)

$$h_{max} = \frac{m}{\eta}\upsilon - \frac{(F - P)m}{\eta^2} \ln\left(\upsilon \frac{\eta}{F - P} + 1\right),$$

где F - сумма лобового и бокового сопротивлений.

В принятой модели не учитывается ни масса, ни сила тяжести грунта, сцепленного с двигающимся телом. Для конкретных расчетов необходимо уточнить ударную скорость в момент соприкосновения тела с морским лном. Коэффициент динамической вязкости илов также требует дальнейшего уточнения. Для цилиндрических тел с площадью торца около 0,1 $м^2$ в первом приближении можно считать этот коэффициент равным 1 - 10 кН · с/м.

Состояние изученности проблемы и реальные геологические условия позволяют в настоящее время использовать для расчетов пластическую модель при наиболее простых допущениях *для одиночных цилиндрических отвесно падающих тел.* Расчетная глубина погружения цилиндрических тел (D = = 0,3 м) в грунты морского дна следующая:

R_0, кН/м^2	f, кН/м^2	h, м
10	1	8,6
20	1	7,5
10	2	5,4
20	2	3,7

При увеличении диаметра тела глубина погружения существенно падает : при $D = 0{,}5$ м , $R_0 = 10$ кН/м^2 и $f = 1$ кН/м^2 . $h = 3{,}5$ м.

Следует учитывать, что помимо ударного внедрения наблюдается последующее погружение тел под воздействием статической нагрузки. Очевидно, что осадка тел, вызванная процессами первичной (фильтрационной) и вторичной (за счет ползучести) консолидации в илах может продолжаться годами и достигать значительных величин.

Американские исследователи в течение двух лет с помощью специального прибора наблюдали за осадкой бетонных блоков разной формы (куб, параллелепипед, цилиндр) на глубине 1240 м (впадина Сан-Диего). Донные отложения здесь представлены достаточно литифицированными алевроглинистыми осадками (илы и глины). Общие фактические осадки достигли за 2 года 9-11 см для блоков различной формы. Ошибки в прогнозе осадок по разным расчетным моделям составили 11-52 % [10].

Выводы

Анализ результатов работ показывает, что инженерно-геологические исследования в ходе МЭП-90 и МЭП-94 дали интересную и полезную информацию. Они позволили уточнить представления о закономерностях строения и формирования физико-механических свойств верхних горизонтов современных морских осадков и их отношения с подстилающими отложениями. Все эти осадки находятся в вязкопластическом состоянии, статистические параметры которого могут рассматриваться в рамках нулевой равновесной теоретической модели формирования глинистых пород. Нижняя граница этого состояния устанавливается по значению коэффициента пористости, равному $4{,}2W_L$, т.е. для очновной массы илов - около 3 W_L (Э.И.Ткачук, 1986), где W_L - предел текучести. Характерной особенностью этой модели является относительный рост прочностных показателей от нескольких десятков до нескольких сотен гектопаскалей при одновременном увеличении показателя

консистенции I_L. Для всех других состояний наблюдается обратная зависимость [9].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геология и геоморфология Балтийского моря: Сводная объяснит.-записка к геологическим картам масштаба 1:500 000/Науч.ред. А.А.Григялис. Л.: Недра, 1991.

2. Геология субаквальной части зоны сочленения Балтийского щита и Русской плиты в пределах Финского залива: Сборник науч. трудов/ ВСЕГЕИ. Л., 1989.

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

4. *Захаров М.С.* Геоэкология и инженерная геология морского дна//Записки Санкт-Петербургского горного ин-та. 1992. Т.133.

5. Инженерно-геологические условия гляциальных шельфов Беломорско-Балтийской депрессии / М.С. Захаров, А.А. Каган, Н.Г. Корвет , П.Е.Москаленко, Я.В.Неизвестнов, А.Е.Рыбалко //Записки Ленинградского горного ин-та. 1989. Т.118.

6. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород/Под ред. Е.М.Сергеева. М.: Недра, 1984. Т.2.

7. Осадочный покров гляциального шельфа северо-западных морей России: Сборник науч.трудов/ВСЕГЕИ. СПб, 1992.

8. *Ребрик Б.М.* Бурение скважин при инженерно-геологических изысканиях. М.: Недра, 1979.

9. Теоретические основы инженерной геологии. Механико-математические основы/Под ред. Е.М.Сергеева. М.: Недра, 1986.

10. Simpson F., Iderbitzen A.L., Singh A. Initial penetration and settlement of concret blocks into deep-ocean sediments// Deep-Sea Sediments. Phys. and Mech. Propert. New-York - London, 1974.