

<https://doi.org/10.53278/2306-9139-2022-2-19-13-26>
УДК 624.131.3

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ПЕРЕУПЛОТНЕНИЕ ГЛИНИСТЫХ НЕОПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

GEOTECHNICAL FEATURES AND OVERCONSOLIDATION OF CLAYEY NEOPLEISTOCENE SEDIMENTS IN THE NORTH-EASTERN BARENTS SEA

© 2022 г. Г. Г. Ахманов¹, Г. В. Соломин¹, Е. В. Петрова¹, Е. А. Сенцова¹,
М. С. Никитин¹, Д. В. Корост¹, Е. А. Вознесенский^{1,2}
© 2022 G. G. Akhmanov¹, G. V. Solomin¹, E. V. Petrova¹, E. A. Sentsova¹,
M. S. Nikitin¹, D. V. Korost¹, E. A. Voznesensky^{1,2}

¹ Геологический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, 119234, Москва, Россия
Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, 119234, Moscow, Russia

² Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, Уланский пер., д. 13 стр. 2, 101000, Москва, Россия
Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, 13, bld. 2, Ulansky lane, 101000, Moscow, Russia

akhmanov@geol.msu.ru¹

Аннотация. Рассмотрены особенности состава и свойств донных глинистых грунтов, накопившихся в борозде и слагающих холм гляциотектонической пары (анг. «hill-hole pairs»), обнаруженной в северо-восточной части Баренцева моря и опробованной в экспедиции TTR-19. Грунты характеризуются высокой дисперсностью и полиминеральным составом при высоком суммарном содержании глинистых минералов (36–42%) с преобладанием иллита и смешанослойного образования типа иллит-сметтит с разбухающими межслоями. Для изученных грунтов характерны небольшие вариации показателей физических свойств при общем тренде к сокращению пористости и влажности и увеличению плотности с глубиной. Установлено, что ил суглинистый, переходящий в суглинок, из борозды гляциотектонической пары нормально уплотнен и представляет собой современные морские отложения, а суглинок, отобранный на вершине подводного холма этой структуры, напротив, переуплотнен. Нагрузка предварительного уплотнения составляет 280–290 кПа. Переуплотнение донных грунтов в изученной части Баренцева моря может объясняться их моренной природой. Кроме того, после образования холма его вершина могла подвергнуться частичному размыву с эрозией верхних 14–15 м.

Abstract. Specific composition and properties of sea bottom clayey deposits sampled during the TTR-19 cruise from the high and the depression of glaciotectionic “hill-hole pair” in the north-eastern Barents sea are discussed. The studied soils are highly disperse and polymineral deposits with high clay mineral content (36–52%). Illite and mixed-layer mineral of “illite-smectite” type with swelling interlayers predominate. Soils demonstrate low variations of index properties along studied cores as well as general trend of porosity and water content decrease and density increase with depth. Clayey silt from the depression of «hill-hole pair» appeared to be normally consolidated soil which is typical for recent marine sediments, whereas clayey silt recovered from the top of submarine hill is, on the contrary, overconsolidated. Preconsolidation stress is determined as 280–290 kPa. An overconsolidation in bottom deposits of the studied sector of the Barents Sea corresponds to their subglacial (moraine) origin. Furthermore, after the high was formed, its topmost 14–15 m might have been eroded as data evaluation suggested.

Ключевые слова: переуплотнение, донные отложения, глинистые минералы, Баренцево море, гляциотектонические пары, пористость, плотность, эрозия.

Keywords: overconsolidation, bottom sediments, clay minerals, the Barents Sea, hill-hole pairs, porosity, density, erosion.

Введение

Исследование выполнено на материалах, собранных в морской геолого-геофизической экспедиции TTR-19 в северо-восточную часть Баренцева моря, прошедшей летом 2020 года в рамках Международной программы ЮНЕСКО-МГУ «Training-through-Research» на НИС «Академик Николай Страхов» при поддержке Министерства высшего образования и науки Российской Федерации. Экспедиция проведена с целью поиска зон фокусированной флюидоразгрузки и геохимического картирования углеводородных проявлений, изучения строения верхних горизонтов осадочного чехла, современных геологических процессов и получения новых данных об истории покровного палео-оледенения района.

В ходе этой морской экспедиции были детально изучены 13 полигонов (рис. 1). На каждом из них предварительно проводился комплекс геофизических исследований, по результатам которого были выбраны конкретные точки для геологического опробования. Задачи работ включали характеристику донных грунтов, выявление в толще донных отложений фоновых и аномальных концентраций флюидов, а также получение информации о типе и характеристиках флюида в осадках верхней части разреза. Седиментологическим отрядом геологической группы в рейсе проводились донный пробоотбор осадков с помощью гравитационной трубки, зачистка и фотографирование керна, его первичное литологическое описание и консервация, а также составление на основе этого описания геологических колонок и корреляционных схем разрезов станций на каждом полигоне.

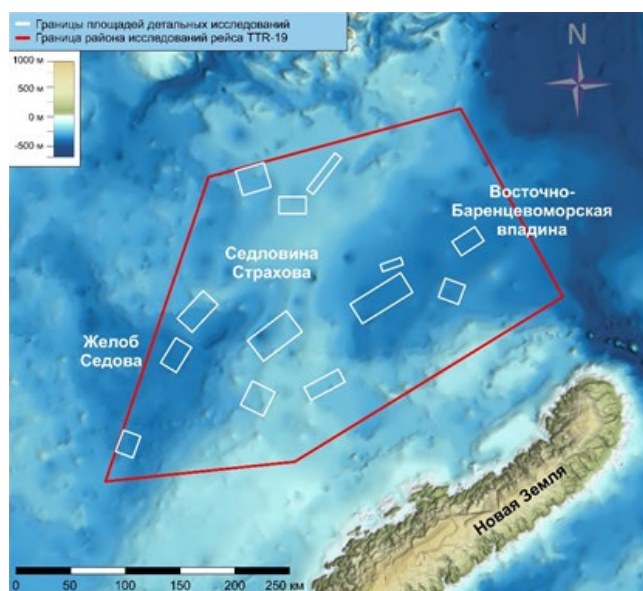


Рис. 1. Карта районов исследований экспедиции TTR-19 в северо-восточной части Баренцева моря. Донный рельеф по IBCAO 4.1 [Jakobsson et al., 2020]

Не одно столетие акватория Баренцева моря привлекает к себе внимание отечественных и зарубежных исследователей. Выделяют 4 периода ее изучения: начальный этап (XIV–XV вв.) соответствует эпохе великих географических открытий и включает общие наблюдения за регионом, второй (XIX — начала XX в.) связан с началом изучения геологического строения, построением карты Баренцева моря с учетом современных очертаний берегов и открытием архипелага Земля Франца-Иосифа, третий (середина XX в.) ознаменовался составлением батиметрической карты и первой геоморфологической карты дна, и, наконец, четвертый этап (конец XX–XXI вв.) — начало детального изучения морских донных осадков, применение геофизических работ на шельфе и первое инженерно-геологическое бурение в исследуемом районе [Гуревич, Мусатов, 2000].

Новейшая геологическая история Баренцева моря несколько десятилетий оставалась предметом дискуссий. Остро стояла проблема генезиса четвертичных отложений [Мурдмаа, Иванова, 1999]. Современные исследователи признают ледниковый генезис большей части разреза низменностей Арктики, что подтверждают древние ледниковые формы рельефа [Гусев и др., 2012]. Но до сих пор существуют две разные точки зрения о ситуации на шельфе Баренцева моря во время последнего ледникового максимума.

Первая гипотеза предполагает развитие единого покровного оледенения на большой территории Арктики и шельфа Северного Ледовитого океана. Считается, что мощный сплошной ледник толщиной более 1000 м покрывал огромные территории и лежал на дне морей нынешнего Северного Ледовитого океана. Некоторые ученые полагают, что этот чрезвычайно толстый многолетний ледяной покров сформировался в конце последнего ледникового периода из-за уменьшения притока теплых атлантических вод [Jakobsson et al., 2014]. Во время многочисленных эпизодов оледенения четвертичного периода на континентальном шельфе Баренцева моря периодически нарастал и, потом, деградировал ледниковый покров [Patton et al., 2015]. Ледники таких повторных оледенений эродировали большую часть шельфа вплоть до коренных мезозойских слоев [Polyak et al., 1994].

Вторая гипотеза предполагает существование в Арктике только ледниковых центров над архипелагами (Франц-Иосифовский, Шпицбергенский, Новоземельский, Скандинавский) и морскими отмелями, между которыми находились впадины — морские бассейны. В эпоху максимума последнего оледенения Баренцево море почти со всех сторон было

окружено ледниками, которые спускались на шельф из таких центров оледенения. В областях, которые не были заняты шельфовыми ледниками, были распространены плавающие льды, а на дне накапливались ледниково-морские осадки. Во время дегляциации образовались аккумулятивные накопления большой мощности [Павлидис и др., 2005].

По результатам картирования четвертичных отложений Баренцева моря было выделено 3 этапа оледенения шельфа: ранний (ранний-средний неоплейстоцен), средний (начало позднего неоплейстоцена) и поздний (конец позднего неоплейстоцена) [Гусев и др., 2012].

В послеледниковой седиментации на шельфе Баренцева моря выделяют до трех основных этапов, соответствующих ранней и поздней стадиям дегляциации и морскому осадконакоплению в голоцене. Главными факторами осадконакопления на ранней стадии являлись вынос тонкого взвешенного материала с талыми водами ледников, широкое развитие гравитационных потоков, а также интенсивный айсберговый разнос. В позднюю стадию дегляциации были развиты процессы придонного перемыва и переноса осадков с формированием ламинированных отложений турбидитов и нефеловидных потоков. Для голоцена характерна нормальная морская седиментация с несколькими этапами, отражающими изменения в поступлении атлантических вод в Баренцево море. В целом послеледниковая история баренцевоморского осадконакопления характеризуется постепенным уменьшением роли ледникового фактора с начала дегляциации, хотя и в настоящее время этот фактор играет определенную роль, особенно в северо-восточной части Баренцева моря [Мурдмаа, Иванова, 1999].

Рельеф дна Баренцева моря характеризуется сильной расчлененностью. Ряд гряд, в том числе и подводные моренные холмы, протягиваются цепочкой и окаймляют архипелаги островов Земли Франца-Иосифа, Новой Земли и Шпицбергена, а также подводные возвышенности (бывшие ледниковые центры) [Гусев и др., 2012; Dowdeswell et al., 2021].

В северо-восточной части Баренцева моря, в 2020 году в ходе 19-го рейса в рамках Международной программы ЮНЕСКО «Обучение-через-исследования (Плавающий университет)» впервые были обнаружены так называемые гляциотектонические пары (англ. «hill-hole pairs») (рис. 2.) — донные подледниковые экзарационно-аккумулятивные образования [Dowdeswell et al., 2021]. Такие гляциотектонические структуры широко известны в разных районах, подвергавшихся покровному оледенению, и описаны, в том числе, для западного

Баренцевоморья [Ottesen et al., 2005; Hogan et al., 2010; Rise et al., 2016]. Считается, что они формировались в результате плакинга под ледниковым покровом относительно небольшой мощности. Взаимная ориентировка сопряженных положительных и отрицательных форм указывает на направление движения палео-ледника. Осадочные холмы всегда располагаются ниже по течению ледового потока, за депрессиями и/или бороздами. Холмы сложены материалом, мобилизованным движущимся ледником при выпаживании соответствующей депрессии, что может быть продемонстрировано прямым сопоставлением объемов отрицательных и положительных форм. По одной из гипотез формирование таких парных образований происходило на участках, где в приповерхностных частях подледникового субстрата образовывались природные газовые гидраты метана [Winsborrow et al., 2016].

Несколько десятилетий проводится бурение инженерно-геологических скважин для изучения донных отложений северных морей. В кернах скважин, пробуренных на Баренцево-Карском шельфе, были вскрыты ледниковые отложения, представленные в основном плотными суглинками, глинами и реже супесями, а также похожие на морену переуплотненные образования, представленные серыми и темно-серыми глинистыми алевролитами с разнообразными включениями песка, гальки и гравия [Гусев и др., 2012].

Установлено, что отложения шельфа Баренцева моря характеризуются преимущественно пылеватоглинистым, иногда песчано-пылеватоглинистым составом. Преобладают глинистые частицы, содержание которых составляет в среднем около 40% (иногда до 95%), также присутствуют пылеватая фракция — 25–30%, а песчаная не превышает 20–25% [Рокос, Люстерик, 1992].

Современные отложения (илы-суглинки) отличаются полиминеральным составом. Песчано-пылеватая фракция представлена кварцем (60–80%), полевыми шпатами (20–30%) и акцессорными минералами (5–10%), а глинистая имеет в различных районах гидрослюдисто-монтмориллонитовый, гидрослюдисто-хлорит-каолининовый и гидрослюдисто-хлоритовый состав. Содержание гидрослюдистых минералов, доминирующими среди которых являются гидромусковит и иллит, варьирует от 21 до 51%, каолинита (8–30%), хлорита (7–21%) и смектита (от 1–2 до 52%) [Рокос, Люстерик, 1992].

В разрезах консолидированных образований верхне-неоплейстоценового комплекса в районах мелководных поднятий Баренцева моря величина переуплотнения OCR (от англ. “overconsolidation ratio”) не превышает 10–15 единиц. Среди отло-

жений ниже-средне-неоплейстоценового комплекса выделяются переуплотненные, преобладающие в нижней и средней пачках и характеризующиеся высокими значениями OCR — до 15–20 единиц. Нормально уплотненные отложения встречаются в верхней пачке комплекса. В переуплотненных разрезах фиксируются консолидированные напоминающие морену образования, имеющие высокую прочность и плотность. В нормально уплотненных разрезах отмечается постепенное замещение текучих — текучепластичных разностей мягко — тугопластичными в интервале мощностью в несколько десятков метров. В пределах Куренцовской террасы, Канинского и Гусиног желобов плотность осадков изменяется от 1,30 до 1,70 г/см³, естественная влажность от 40 до 80%, а коэффициент пористости от 0,8–0,9 до 2–3 и более [Рокос, Люстерик, 1992].

В настоящей статье представлены результаты исследований донных четвертичных глинистых отложений северо-восточной части Баренцева моря, включая характеристику их минерального состава, физических и физико-химических свойств, а также параметры их переуплотнения.

Характеристика исследованных донных грунтов

В ходе рейса TTR-19 донный пробоотбор выполнялся при помощи ударной прямооточной трубы. Такой пробоотборник внедряется в донные отложения за счет кинетической энергии в условиях свободного падения и снабжен внутренним пла-

стиковым вкладышем для удобства извлечения и хранения керна. Проба донного грунта для лабораторных исследований сохранялась в цельном пластмассовом цилиндре.

В северо-восточной части Баренцева моря на одном из полигонов исследований экспедиции были обнаружены и закартированы сопряженные борозды и холмы (рис. 2) — специфические формы ледникового рельефа, получившие название в русскоязычной литературе «гляциотектонические пары», а в англоязычной — «hill-hole pairs». В борозде одной из таких форм рельефа (в станции TTR19-AR124G) была отобрана трубка грунта, имеющая общую длину 1,18 м, для исследования изменчивости в разрезе состава и свойств донных неоплейстоцен-голоценовых отложений и определения степени уплотнения грунта в данном месте. В этой же гляциотектонической структуре, на вершине холма (станция TTR19-AR129G), был отобран керн грунта длиной 43 см для определения его физических и физико-механических свойств (рис. 2).

Трубка донного грунта, отобранная на станции TTR19-AR124G (рис. 3), для лабораторных исследований была разбита на 6 секций, приблизительно по 20 см. Отдельно была отобрана проба из интервала 38–58 см для испытаний на сжимаемость.

Керн TTR19-AR124G представлен илистым однородным липким плотным влажным грунтом мягкопластичной консистенции. В интервале 0–11 см отмечен окисленный прослой коричневого

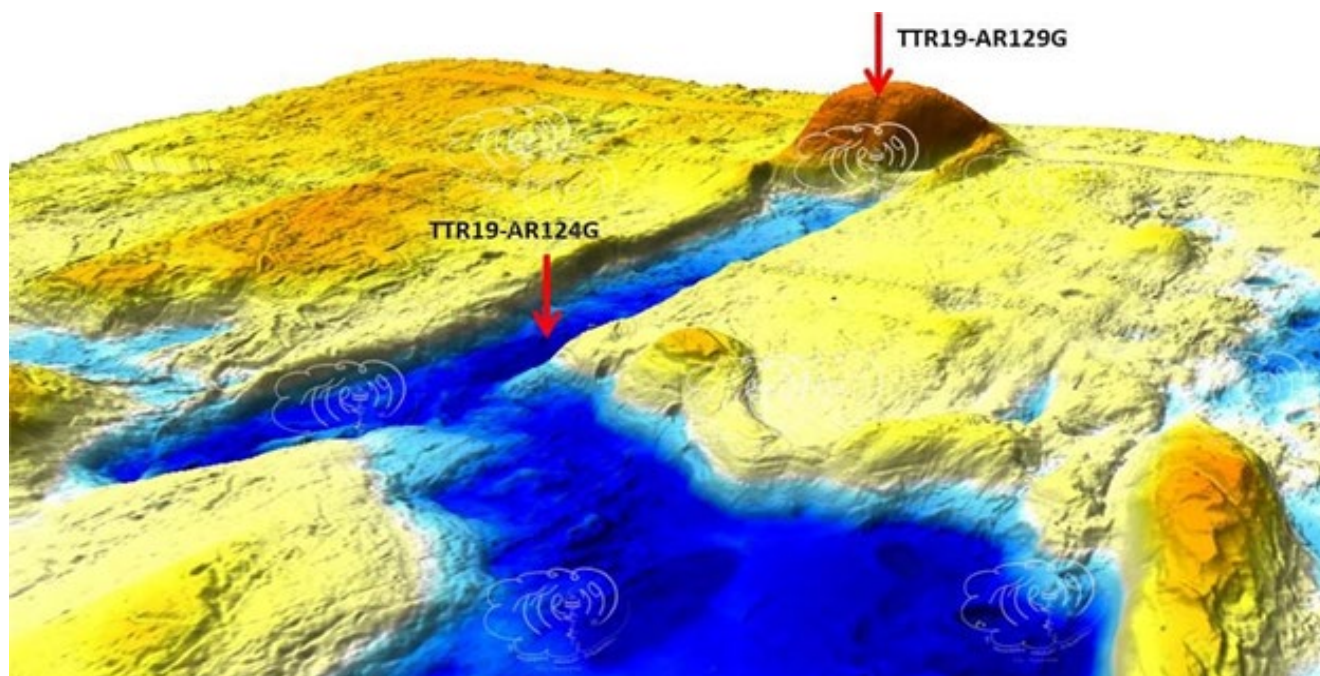


Рис. 2. Трехмерная модель рельефа дна по результатам батиметрической съёмки в экспедиции TTR-19, иллюстрирующая морфологию гляциотектонической пары, обнаруженной и закартированной в северо-восточной части Баренцева моря.

Красные стрелки указывают на местоположения станций донного пробоотбора TTR19-AR124G и TTR19-AR129G

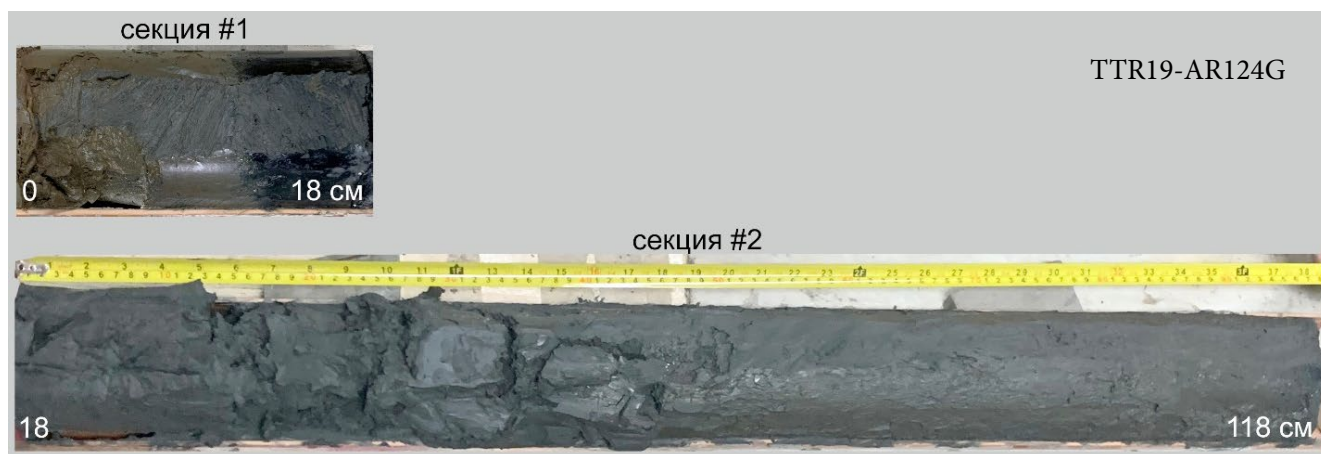


Рис. 3. Керн со станции TTR19-AR124G после раскрытия пластикового тубуса в лаборатории

цвета; ниже, в промежутке 11–18 см — черный, обогащенный органическим веществом слой с характерным запахом сероводорода; далее, до глубины 118 см, грунт имеет однородный серый цвет. Строение комковатое, текстура массивная, слоистость не отмечена. Грунт содержит значительное количество (до 5%) неокатанных фрагментов литифицированных пород дресвяной размерности, а также характеризуется отсутствием видимых макропор и трещин.

Рентгеновская томография донных отложений, отобранных в этой станции, показала (рис. 4), что матрикс грунта неоднородный, плотный и характеризуется невысокой степенью рентгеновской абсорбции — темно-серый цвет на рентгеноплотностных срезах. На томографии отчетливо заметны минералы тяжелой фракции и включения мелких раковин моллюсков, отличающиеся очень высокой степенью поглощения рентгеновского излуче-

ния — белый цвет на рентгеноплотностных срезах, а также включения неокатанного грубообломочного материала размером до 4 см — светло-серые оттенки. В некоторых местах отмечены рыхлые участки и пустоты, связанные с пористостью или с поганофорами.

Трубка донного грунта, отобранного на станции TTR19-AR129G с вершины холма гляциотектонической пары (рис. 2), имела длину 43 см (рис. 5). Пробы для определения параметров переуплотнения в условиях компрессии были взяты из нее из интервалов 17–22 см и 36–40 см.

Керн TTR19-AR129G представлен связным дисперсным, преимущественно глинистым, грунтом однородным плотным влажным пластичным серого цвета. Видимые включения, макропоры и трещины отсутствуют. Строение комковатое, текстура массивная, слоистости не отмечено.

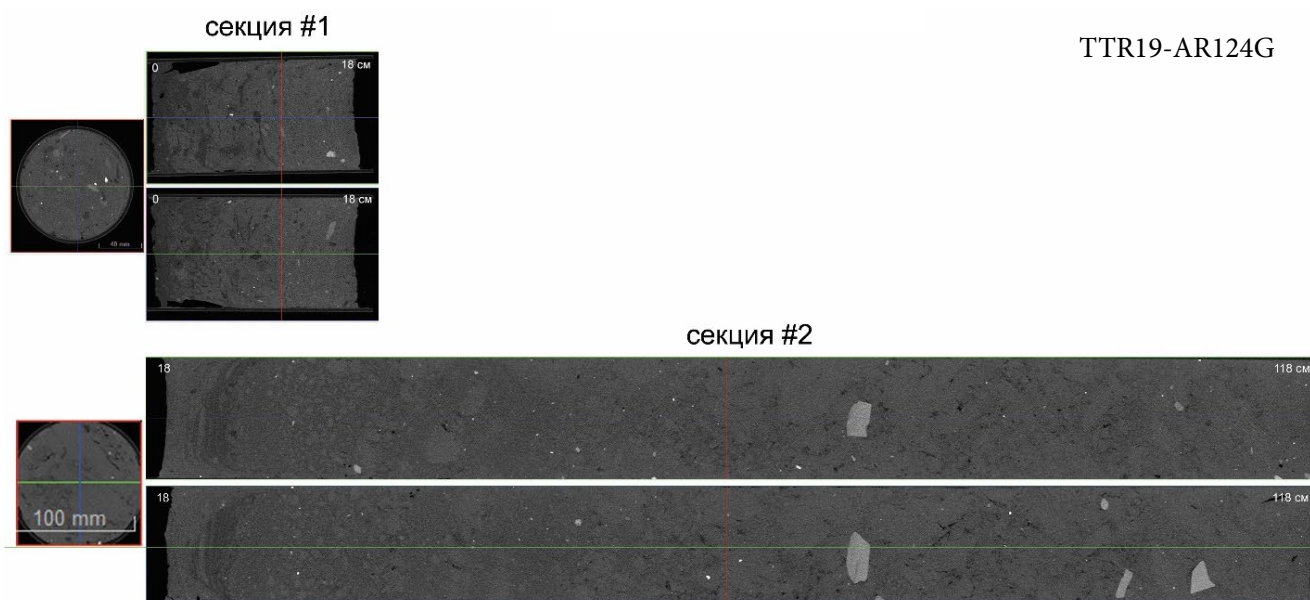


Рис. 4. Результаты рентгеновской томографии трубки TTR19-AR124G.

TTR19-AR129G, секция #1

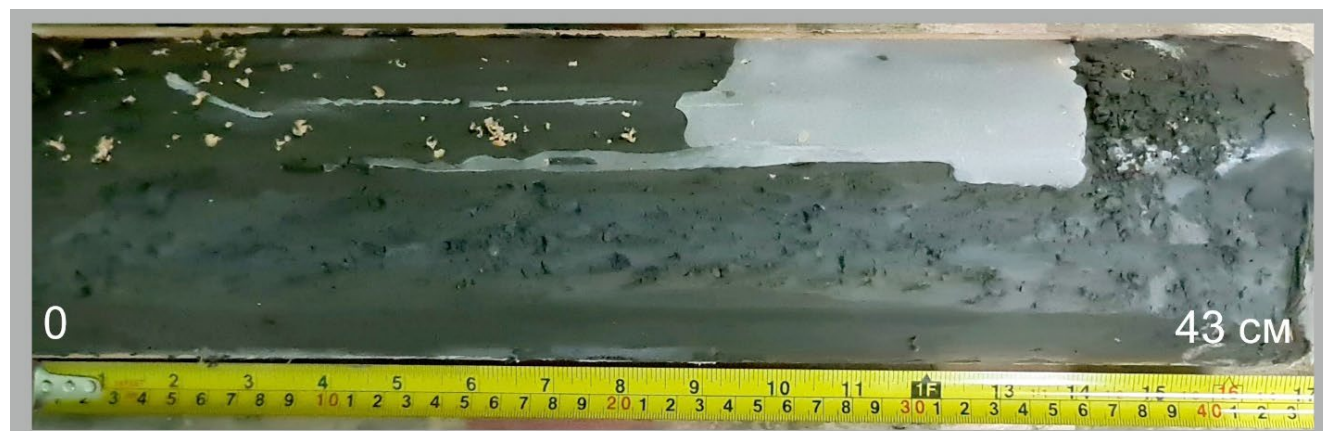


Рис. 5. Керн со станции TTR19-AR129G после раскрытия пластикового тубуса в лаборатории

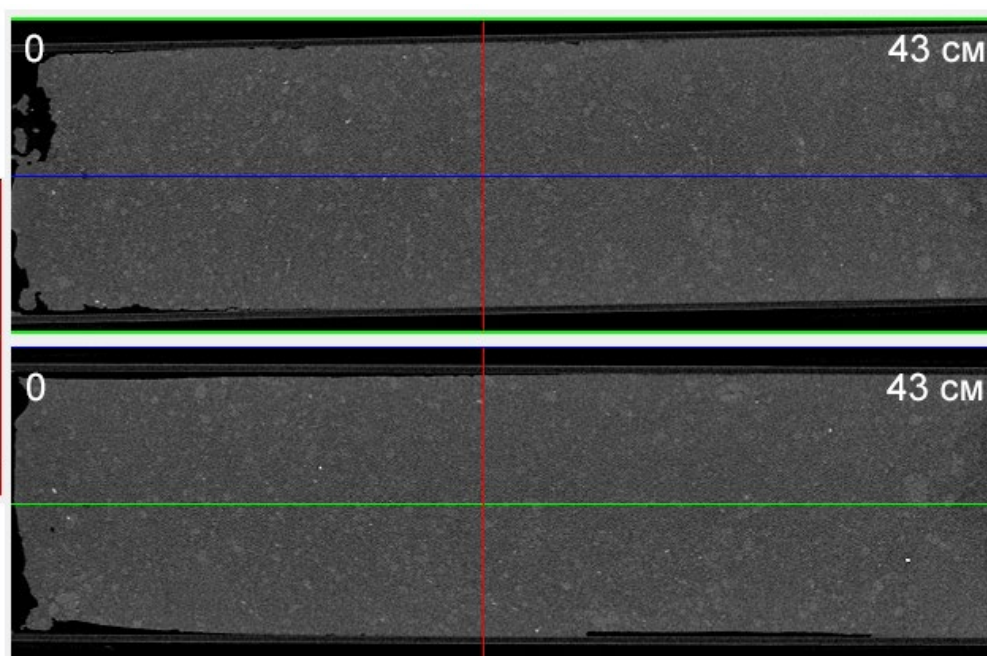
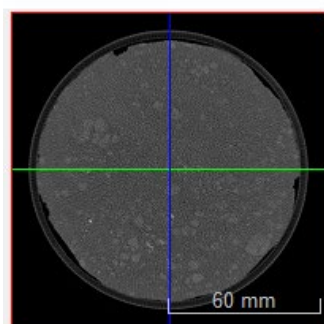
TTR19-AR129G,
секция #1

Рис. 6. Результаты рентгеновской томографии трубки TTR19-AR129G

Для этой трубки донных отложений также была проведена томография (рис. 6), по результатам которой был выявлен плотный матрикс, характеризующийся высокой степенью рентгеновской абсорбции (серый цвет на рентгеноплотностных срезах). В матриксе отмечаются участки-фрагменты с относительно повышенной плотностью более светлого оттенка серого и отсутствие крупных включений грубообломочного материала.

Ниже рассматриваются характеристики донных четвертичных грунтов по двум описанным разрезам.

Минеральный состав и содержание органического вещества

Минеральный состав грунтов в изученных интервалах достаточно однообразен (табл. 1) — кварц,

плагиоклаз, полевой шпат и глинистые минералы с примесью карбонатов и аутигенного пирита. Обращает на себя внимание высокое содержание глинистых минералов (36–42%) и их широкий спектр, характеризующийся присутствием минералов разных групп с преобладанием иллит и смешаннослойного образования типа иллит-сметит с разбухающими межслоями.

Содержание водорастворимых солей в разных интервалах опробования составляет около 1% (0,9–1,4%) — слабозасоленные грунты по ГОСТ 25100–2020.

Общее содержание органического вещества, которое влияет на структурирование и агрегирование частиц донных грунтов, определялось двумя способами: методом прокаливания до постоянной массы (ГОСТ 23740–2016) и методом «мокрого

сжигания» (метод Тюрина — по ГОСТ 26213–91). Исследования показали, что содержание органического вещества в грунтах из борозды (станция TTR19-AR124G) варьирует от 8 до 21% по первому и от 1 до 2,3% — по второму методу, что намного больше, чем в пробах с вершины подводного холма, станция TTR19-AR129G (около 7% и 0,16%, соответственно). Вероятно, различия между данными по разным методам можно объяснить тем, что прокаливание при $350 \pm 10^\circ\text{C}$ вызывает, возможно, не только выгорание органического вещества, но и разложение солей (карбонатов, галоидов), а также удаление всей связанной воды. Таким образом, содержание органического углерода надежнее принимать по методу Тюрина. Возможно, органическое вещество, содержащееся в отложениях, вскрытых станцией TTR19-AR129G, в большей степени окислено или минерализовано. И это косвенно может указывать на то, что грунты, отобранные с подводного холма более древние, чем грунты из борозды изученной гляциотектонической пары.

Дисперсность грунтов

Все исследованные грунты характеризуются высокой дисперсностью: по данным гранулометрического анализа (по ГОСТ 12536–2014) более 50% частиц имеют эквивалентный диаметр менее 0,01 мм (рис. 7), а более 40% частиц — менее 5 мкм, что хорошо согласуется со значительным количеством глинистых минералов в минеральном составе. Несколько меньшей дисперсностью выделяются верхние 17–18 см в обеих станциях.

Сопоставление данных гранулометрического и микроагрегатного анализов (рис. 8) показывает некоторую агрегированность глинистых и тонкопылеватых частиц, проявляющуюся преимущественно во фракциях 0,01–0,05 мм и 0,1–0,25 мм.

Влажность, физические и физико-химические свойства грунтов

Изучение состояния и свойств грунтов по колонке из борозды гляциотектонической пары выявило (табл. 2) небольшие вариации показателей при общем тренде к сокращению пористости и влажности вниз по разрезу и увеличению плотности с глубиной. Естественная влажность изученных грунтов меняется в пределах 27–33%, пористость — от 44 до 39%. Вариации других показателей не носят закономерного характера. Полученные вариации показателей свойств этих грунтов связаны с изменениями по разрезу минерального и гранулометрического составов, а также присутствием в отдельных интервалах неокатанного грубообломочного материала и включений карбонатных раковин моллюсков. Соответствующие характеристики для грунтов, отобранных с вершины холма гляциотектонической пары, укладываются в схожие пределы.

Число пластичности для всех образцов варьирует от 7 до 13, а показатель текучести — от 0,4 до 1,4. Таким образом, грунты из борозды гляциотектонической пары представлены илами суглинистыми — суглинками [ГОСТ 25100–2020, табл. Б.13] легкими и тяжелыми, пылеватыми, от текучих до мягкопластичных, а грунт, взятый на холме — суглинками тяжелыми, пылеватыми, тугопластичными.

Состав и свойства донного грунта, отобранного из борозды изученной гляциотектонической пары (станция TTR19-AR124G), указывают на его накопление в ледниково-морских (дегляциация) и современных морских обстановках. Такие грунты должны характеризоваться нормальным уплотнением. С вершины сопряженного холма (станция TTR19-AR129G) отобран весьма плотный, возможно переуплотненный, суглинок. Оценке

Таблица 1. Минеральный состав (% по массе) исследованных донных грунтов

Скважина	TTR19-AR-124G						TTR19-AR-129G
Интервал глубины опробования, см	0–18	18–38	38–58	58–78	78–98	98–118	0–17
Кварц	28,7	31,1	30,3	28,4	29,1	30,6	27,3
Альбит	19,3	16,9	14,5	15,6	13,3	13,3	14,6
Микроклин	9,6	9,5	10,4	9,2	12	9,2	13,5
Каолинит	4,7	3,3	6,9	3,1	4,6	4	5,4
Хлорит	7,7	7,1	7,8	12,9	5,6	7,1	7,7
Иллит	8,9	11,3	10,3	11,3	10,8	11,8	6,9
Смешаннослойные минералы типа иллит — смектит	14,6	15,5	14,8	15	19	18,6	21,3
Карбонаты (кальцит, хантит)	6,1	4,8	4,5	4	5	4,6	2,9
Пирит	<0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,8	0,5

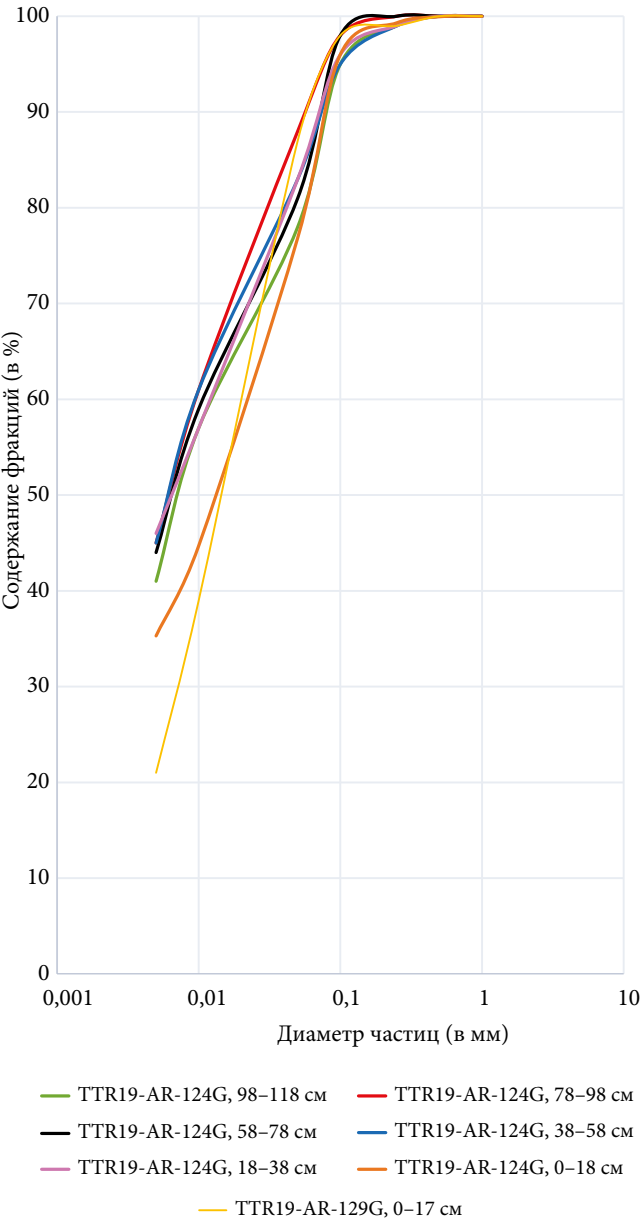


Рис. 7. Гранулометрический состав исследованных образцов донных грунтов

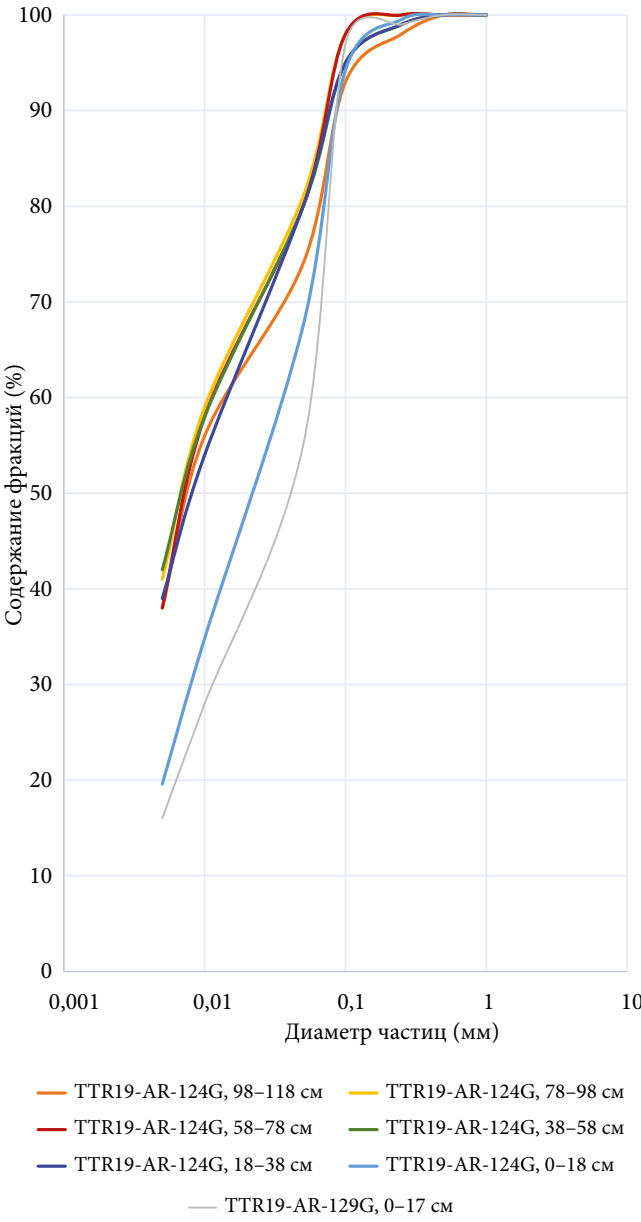


Рис. 8. Микроагрегатный состав исследованных образцов донных грунтов

Таблица 2. Показатели влажности, физических и физико-химических свойств донных грунтов

Показатель	Скважина	
	TTR19-AR-124G Глубина 0–118 см	TTR19-AR-129G Глубина 0–17 см
Влажность We, %	27–33	31
Плотность ρ, г/см³	1,94–2,15	2,00
Плотность частиц ρs, г/см³	2,63–2,73	2,70
Плотность скелета грунта ρд, г/см³	1,52–1,67	1,53
Пористость n	0,39–0,44	0,43
Влажность предела раскатывания Wp, %	20–23	26
Влажность предела текучести WL, %	29–33	39
Число пластичности Ip	7–12	13
Показатель текучести IL	0,73–1,43	0,40

степени переуплотнения грунтов посвящена следующая часть работы.

Современные представления о переуплотнении глинистых грунтов и методика определения его параметров

В широком смысле переуплотненными называются дисперсные грунты, которые в условиях их современного залегания испытывают меньшие вертикальные эффективные сжимающие напряжения (σ'_{ov}), чем действовавшие на них ранее в течение их геологической истории (σ'_p). Эта последняя величина обычно называется нагрузкой предварительного уплотнения, а ее отношение к текущему природному давлению — коэффициентом переуплотнения (OCR), который чаще всего и выступает количественной мерой переуплотнения грунта.

Эффекты переуплотнения глинистых пород и закономерности изменения их пористости по разрезу с позиций историко-геологического подхода рассматривались в трудах Н. Г. Кассина (1933), А. С. Храмушева (1933), Ю. В. Мухина (1936), З. А. Макеева (1937), Г. Хедберга (1926, 1936), В. А. Приклонского (1936), Н. Я. Денисова (1951),

В. Д. Ломтадзе (1954, 1958), Дж. Уэллера (1959), Н. Б. Вассоевича (1954, 1955, 1958, 1960) и целого ряда других исследователей.

В механике грунтов первым понятие о переуплотненных грунтах ввел А. Казагранде [Casagrande, 1936], который и предложил использовать компрессионную кривую в полулогарифмическом масштабе. Предполагалось, что характерный перегиб кривой, отвечающий резкому повышению сжимаемости образца при компрессионных испытаниях, соответствует максимальному геостатическому давлению — нагрузке предварительного уплотнения, испытанной породой в прошлом.

Сам факт переуплотнения устанавливается, как правило, в условиях лабораторного компрессионного испытания грунта по заметному повышению его сжимаемости при нагрузках, превышающих давление предварительного уплотнения, что с разной степенью отчетливости выражается перегибом зависимости коэффициента пористости от логарифма эффективного напряжения (рис. 9). Последующая обработка направлена на возможно более точное определение величины нагрузки предварительного уплотнения, что важно для правильного

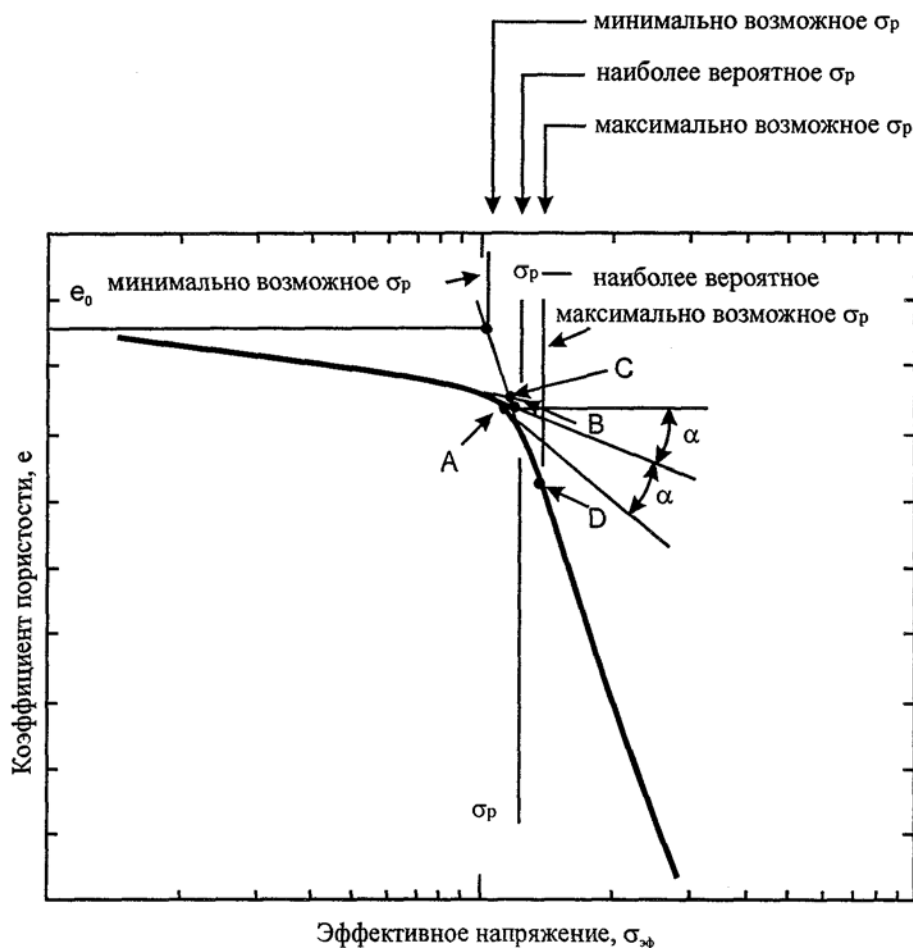


Рис. 9. Схема построений А. Казагранде (1936) для определения давления предварительного уплотнения

описания поведения грунта в разных диапазонах действующих давлений: до достижения величины σ'_p грунт переуплотнен, слабосжимаем, обычно проявляет выраженную дилатансию при значительных сдвиговых деформациях вплоть до разрушения, а свыше этого уровня он становится нормально уплотненным, сжимаемость возрастает, а дилатантные свойства не выражены.

Параметры переуплотнения — σ'_p и OCR — учитываются в некоторых современных моделях деформирования грунта (например, HS и HSSmall), влияют на правильную инженерную оценку поведения основания при взаимодействии с инженерными сооружениями и используются (в частности, OCR) как классификационные показатели. Для определения нагрузки предварительного уплотнения по результатам компрессионных испытаний разными авторами предложен целый ряд методов, весьма полный обзор которых приведен в работе [Труфанов и др., 2014]. Наиболее надежными и широко используемыми считаются графоаналитический метод А. Казагранде (включенный в стандарт ASTM D2435–04) и метод анализа суммарной работы деформаций Д. Беккера [Becker et al., 1987]. Эти же методы включены и в российский стандарт на метод лабораторного определения параметров переуплотнения [ГОСТ Р 58236].

Изменения геологической обстановки должны отражаться на свойствах глинистых грунтов, в том числе на характере поведения их под нагрузкой. Исследуя характер компрессионной кривой, можно до некоторой степени реконструировать геологическую историю образования глинистых пород. Основной причиной залегания переуплотненного грунта на вершине подводного холма является эрозия вышележащих отложений. Это позволяет для условий простого тектонического режима перейти от величины нагрузки предварительного уплотнения к оценке мощности размытых отложений. Например, оценить глубину эрозии можно для условий смены осадконакопления денудацией на фоне устойчивого подъема территории без значительных латеральных напряжений, а также дизъюнктивных или пликативных дислокаций. В такой модели диагенетическое уплотнение осадка сменяется разгрузкой толщи с частичным увеличением пористости за счет упругих свойств породы и набухания. А. С. Храмушев (1939), анализируя перегибы компрессионных кривых, определял мощность когда-то перекрывавших породу отложений. Тем не менее, такой подход не учитывает ряд процессов, проявляющихся в ходе диагенеза и эпигенеза и повышающих прочность породы независимо от испытанного ею давления, а именно синергиче-

ское и тиксотропное упрочнение, дегидратацию и цементацию. Важно понимать, что «переуплотнение» в общем смысле — некий интегральный эффект проявления разных природных процессов. Влияние геостатических нагрузок в геологическом прошлом на уплотнение глинистых толщ отражается на структурных связях глин, которые обладают способностью «запоминать» максимальные напряжения. Это, в свою очередь, отражается на деформируемости и прочности грунтов [Ломтадзе, 1958]. При этом, наряду с сокращением пористости и увеличением общей площади взаимодействия частиц, при уплотнении грунта с исходно коагуляционной структурой происходит и его «старение», под которым подразумевается медленное изменение прочности структурных связей в результате тиксотропного упрочнения, ионообменных процессов и цементации. Результатом этого становится появление переходных и цементационных контактов и возникновение другого типа структуры глинистого грунта, обладающего иными свойствами. И уже прочность новых контактных взаимодействий определяет тот уровень нагрузки, при котором будет зафиксировано заметное повышение сжимаемости грунта в испытании. Большое значение могут иметь изменения свойств грунтов, происходящие при длительном уплотнении. Речь идет о замедленной (или «отложенной», по Л. Бьерруму [Bjerrum, 1967]) вторичной консолидации, которая происходит при относительно постоянной геостатической нагрузке. Степень такой консолидации зависит от времени и *никогда* не воспроизводится в лабораторном эксперименте. Роль возраста глинистой толщи *никак* методически не учитывается при определении характеристик переуплотнения.

Таким образом, эффекты, определяющие изменение свойств грунта при переуплотнении, обусловлены тремя главными причинами: прогрессирующим уплотнением при росте геостатической нагрузки, длительным уплотнением при постоянном давлении в геологическом времени и преобразованием структурных связей на контактах частиц. Другие факторы — вариации порового давления при колебаниях уровня подземных вод, транспирации, изменения температурного режима и др. — могут лишь модифицировать их.

Переуплотнение моренных глинистых отложений Баренцева моря и его возможная природа

По результатам проведенных компрессионных испытаний ил суглинистый — суглинок из донной борозды описываемого района (станция TTR19-AR124G), как и ожидалось, оказался нормально

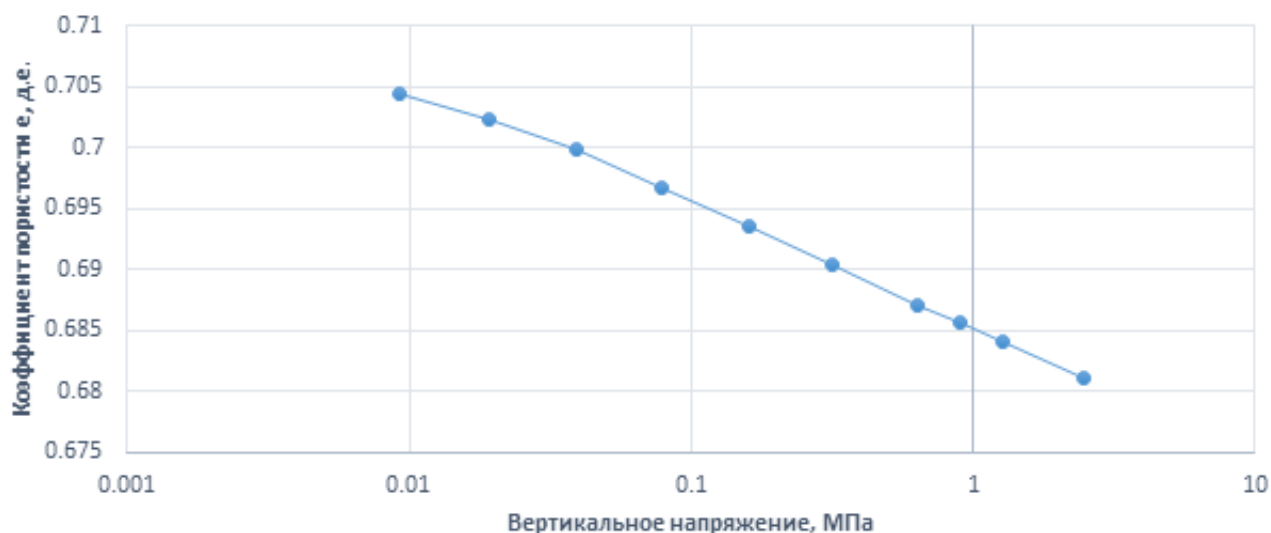


Рис. 10. Компрессионная кривая нормально уплотненного грунта (станция TTR19-AR-124G, интервал отбора образца — 48 см)

уплотненным (рис. 10), что полностью согласуется и с условиями его залегания, и с установленными характеристиками состава и свойств.

В суглинках с подводного холма (станция TTR19-AR129G) установлен эффект переуплотнения. Параллельные испытания проведены для двух проб из интервалов керна 17 и 36 см. После обработки результатов компрессионных испытаний напряжение предварительного уплотнения (σ'_p) для обеих проб составило 280–290 кПа ($OCR = 40–89$), как по методу Казагранде, так и по методу Беккера (рис. 11).

Установленное лабораторными испытаниями переуплотнение грунта, отобранного в станции TTR19-AR-129G с вершины холма гляциотектонической пары, вполне согласуется с предполагаемой природой формирования этой донной структуры. Широкие борозды и сопряженные с ними крупные холмы — типичные формы подледникового рельефа районов покровных оледенений. Подледниковые накопления (тиль) часто изначально весьма плотной консистенции, так как формировались под давлением ледового панциря в несколько сотен метров толщиной. Сверх того, как считается, холмы гляциотектонических пар являются результатом локального выпавивания и последующего сгущивания материала на подошве движущегося ледника, что подразумевает особое уплотняющее воздействие со стороны ледовых масс на грунт, который формирует подледниковую возвышенность. Таким образом, переуплотнение осадочного материала, слагающего холм изученной гляциотектонической пары и обнажающегося на его вершине, могли определить особенности ледового седиментогенеза. В постледниковое время на вершине холма не

задерживался осадочный материал, и не сформировались сколько-нибудь значительные по мощности морских грунтов, в отличие от участка борозды, опробованной в станции TTR19-AR-124G, где трубка вскрыла нормально уплотненные постледниковые и современные осадки мощностью более метра.

Также возможно другое объяснение установленного факта переуплотнения грунта на вершине возвышенности. Вне зависимости от своей природы изученный холм — это крупная морфоструктура дна, он возвышается над окружающей шельфовой равниной более чем на 200 м, а его вершина отмечается на глубине всего лишь 41-го м. В четвертичное время уровень воды в Баренцевом море неоднократно снижался по отношению к нынешнему. Следовательно, в какое-то время верхняя часть изученной возвышенности могла экспонироваться субаэрально, а также находиться в прибрежных условиях, в зоне активного волнового воздействия, подвергаясь интенсивной эрозии. Считая, что залегание изученного грунта с эффектом переуплотнения с самого верха подводного холма обусловлено частичным размывом вышележавших отложений, и принимая их плотность равной плотности грунтов, отобранных в станции TTR19-AR-124G из борозды, можно даже оценить мощность эродированной части холма. Она составит 14–15 м.

Выводы

(1) Ледниково-морские и морские (неоплейстоцен-голоцен) отложения, отобранные в северо-восточной части Баренцева моря, предположительно в борозде гляциотектонической пары, представлены илами суглинистыми, переходящими в суг-

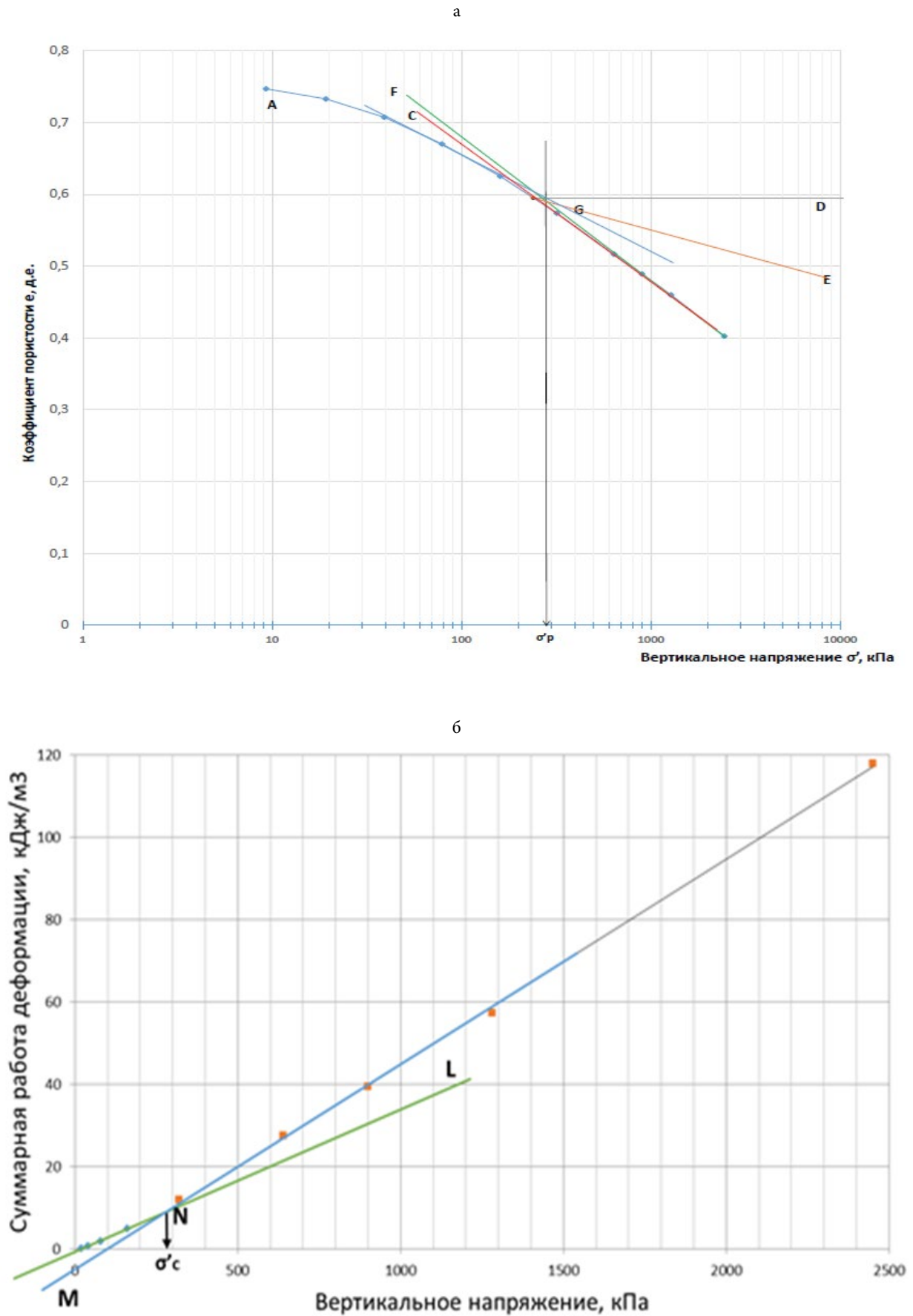


Рис. 11. Результаты обработки компрессионных испытаний суглинка с вершины подводного холма (станция TTR19-AR-129G, интервал отбора образца — 0,36 м) по Казагранде (а) и Беккеру (б). Обозначения линий и ключевых точек соответствуют принятым в ГОСТ Р 58326.

линки, легкими и тяжелыми, пылеватыми, от текучих до мягкопластичных;

(2) Ледниковые моренные грунты, отобранные в Баренцевом море, предположительно на вершине холма гляциотектонической пары, представлены суглинками тяжелыми, пылеватыми, тугопластичными;

(3) Изученные донные грунты характеризуются полиминеральным составом и довольно высоким суммарным содержанием глинистых минералов (36–42%) с преобладанием иллита и смешанно-слоистых образований типа иллит-сметтит с разбухающими межслоями. Содержание органического вещества и водорастворимых солей несколько выше в ледниково-морских и морских отложениях, чем в ледниково-моренных;

(4) В гранулометрическом составе ледниково-морских и морских грунтов преобладающей является фракция <0,005 мм, в ледниково-моренных суглинках преобладает пылеватая фракция.

Микроагрегатный анализ показал определенную агрегированность глинистых и тонкопылеватых частиц, проявляющуюся преимущественно во фракциях 0,01–0,05 мм и 0,1–0,25 мм. Для отложений характерны небольшие вариации физических свойств при общем закономерном тренде к сокращению пористости и влажности, а также увеличению плотности вниз по разрезу;

(5) Согласно результатам компрессионных испытаний, ледниково-морские и морские осадки, накопившиеся в борозде гляциотектонической пары, являются нормально уплотненными. Моренные суглинки, слагающие сопряженный холм, переуплотнены. Нагрузка предварительного уплотнения для них составила 280–290 кПа, а OCR — от 40 до 89. Переуплотнение суглинков может объясняться как, собственно, их моренной природой, так и частичной эрозией, а также сносом перекрывавших их накоплений. Для последнего случая мощность эродированной части оценивается в 14–15 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 26213–91 Почвы. Методы определения органического вещества. М., 1996. 8 с.
2. ГОСТ 25100–2020 Грунты. Классификация. М., 2020. 41 с.
3. ГОСТ 23740–2016 Грунты. Методы определения содержания органического вещества. М., 2019. 12 с.
4. ГОСТ 12536–2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М., 2019. 24 с.
5. ГОСТ Р 58326–2018. Грунты. Метод лабораторного определения параметров переуплотнения. Москва. Стандартинформ. 2018. 14 с.
6. Гуревич В. И., Мусатов Е. Е. К истории геологического изучения шельфа Баренцева и Белого моря // Известия русского географического общества, 2000. Т. 132, № 6. С. 80–85.
7. Гусев Е. А., Костин Д. А., Рекант П. В. Проблема генезиса четвертичных образований Баренцево-Карского шельфа (по материалам Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1 000 000) // Отечественная геология, 2012. № 2. С. 84–89.
8. Ломтадзе В. Д. Формирование физико-механических свойств глинистых пород при литификации. Автореферат дис. на соискание ученой степени док. геолого-минералогических наук. Москва, МГУ, 1958. 50 с.
9. Мурдмаа И. О., Иванова Е. В. Последлениковая история осадконакопления в шельфовых впадинах Баренцева моря // Литология и полезные ископаемые, 1999. № 6. С. 576–595.
10. Павлидис Ю. А., Богданов Ю. А., Левченко О. В., Мурдмаа И. О., Тарасов Г. А. Новые данные о природной обстановке в Баренцевом море в конце валдайского ледниковья // Океанология, 2005. Т. 45. № 1. С. 92–106.
11. Рокос С. И., Люстерник В. А. Формирование состава и физико-механических свойств плейстоценовых отложений южной и центральной частей шельфа Баренцева моря (генетический и палеогеографический аспекты) — К.: ИГН АН Украины, 92–11, 1992. 60 с.
12. Труфанов А. Н., Шулятьев О. А., Ростовцев А. В., Габсалимов Г. У. Методы определения параметров переуплотнения грунтов и их практическое применение в условиях Санкт-Петербурга // Инженерные изыскания. 2014. № 11. С. 32–37.
13. Храмушев А. С. Компрессионные испытания глины как метод геологического исследования. ГОНТИ, Ред. гор.-топлив. и геол.-развед. лит.-ры, Москва. Труды Всесоюзной конторы специального геологического картирования. Вып. 3. 1939. 28 с.
14. ASTM D2435–04. Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soil using incremental loading. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2004.
15. Becker D. E., Crooks J. H. A., Been K., Jefferies M. G. Works as a criterion for determining in-situ and

- yield stresses in clays // *Canadian Geotechnical Journal*. 1987. V. 24. № 4. P. 549–564.
16. Bjerrum, L. Engineering geology of Norwegian normally consolidated clays as related to settlements of buildings // *Geotechnique*. 1967. Vol. 17. P. 214–235.
 17. Casagrande A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. *Proceeding, 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, MA. 1936. V. 3. P. 60–64.
 18. Dowdeswell J., Montelli A., Akhmanov G., Solovyeva M., Terekhina Ya., Mironyuk S., Tokarev M. Late Weichselian ice-sheet flow directions in the Russian Northern Barents Sea from high-resolution imagery of submarine glacial landforms // *Geology*, 2021. Vol. 49 (12). P. 1484–1488.
 19. Hogan K., Dowdeswell J., Noormets R. Evans J., Ó Cofaigh, C. Evidence for full-glacial flow and retreat of the Late Weichselian ice sheet from the waters around Kong Karls Land, eastern Svalbard // *Quaternary Science Reviews*, 2010, V. 29. P. 3545–3562.
 20. Jakobsson M., Andreassen K., Bjarnadóttir L. R., Dove D., Dowdeswell J. A., England J. H., Funder S., Hogan K., Ingólfsson O., Jennings A., Larsen N. K., Kirchner N., Landvik J. Y., Mayer L., Mikelsen N., Möller P., Niessen F., Nilsson J., O'Regan M., Polyak L., Nørgaard-Pedersen N., Stein R. Arctic Ocean glacial history // *Quaternary Science Reviews*, 2014. Vol. 92. P. 40–67.
 21. Jakobsson M., Mayer L., Bringensparr C., Castro C., Mohammad R., Johnson P., Ketter T., Accetella D., Amblas D., An L., Arndt J., Canals M., Casamor J., Chauché N., Coakley B., Danielson S., Demarte M., Dickson M.-L., Dorschel B., Dowdeswell J., Dreutter S., Fremand A., Gallant D., Hall J., Hehemann L., Hodnesdal H., Hong J., Ivaldi R., Kane E., Klaucke I., Krawczyk D., Kristoffersen Y., Kuipers B., Millan R., Masetti G., Morlighem M., Noormets R., Prescott M., Rebesco M., Rignot E., Semiletov I., Tate A., Travaglini P., Velicogna I., Weatherall P., Weinrebe W., Willis J., Wood M., Zarayskaya Yu., Zhang T., Zimmermann M., Zinglarsen Karl. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0 // *Scientific Data*, 2020. Vol. 7:176. P. 1–14.
 22. Ottesen D., Dowdeswell J., Rise, L. Submarine landforms and the reconstruction of fast-flowing ice streams within a large Quaternary ice sheet: The 2500-km-long Norwegian-Svalbard margin (57–80°N) // *Geological Society of America Bulletin*, 2005. V. 117. P. 1033–1050.
 23. Patton H., Andreassen K., Bjarnadóttir L. R., Dowdeswell J. A., Winsborrow M. C. M., Noormets R., Polyak L., Auriac A., Hubbard A. Geophysical constraints on the dynamics and retreat of the Barents Sea ice sheet as a paleobenchmark for models of marine ice sheet deglaciation // *Reviews of Geophysics*. Vol. 53. 2015. P. 1051–1098.
 24. Polyak, L., Solheim, A. Late- and postglacial environments in the northern Barents Sea west of Franz Josef Land // *Polar Research*. Vol. 13, № 2, 1994. P. 197–207.
 25. Rise L., Bellec V., Ottesen D. Bøe R., Thorsnes T. Hill-hole pairs on the Norwegian continental shelf. In: Dowdeswell, J. A., Canals, M., Jakobsson, M., Todd, B. J., Dowdeswell, E. K. and Hogan, K. A. (eds), *Atlas of Submarine Glacial Landforms: Modern, Quaternary and Ancient* // *Geological Society, London, Memoirs*, 2016. Vol. 46. P. 203–204.
 26. Winsborrow M., Andreassen K., Hubbard A., Plaza-Faverola A., Gudlaugsson E., Patton H. Regulation of ice stream flow through subglacial formation of gas hydrates // *Nature Geoscience*, 2016. Vol. 9 (5), P. 1–6.