

На правах рукописи



Сухих Елена Александровна

**Состав и строение верхнего слоя донных осадков
юго-западной части Карского моря**

Специальность 1.6.5 – Литология

1.6.21 – Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Геологический институт РАН»

Научный руководитель: **Хуторской Михаил Давыдович**
доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией теплопереноса, главный научный сотрудник, профессор

Официальные оппоненты: **Сорокин Валентин Михайлович**
доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», кафедра нефтегазовой седиментологии и морской геологии, профессор

Кутинов Юрий Григорьевич
доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова», главный научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН»

Защита диссертации состоится « 03 » июня 2025 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета 24.1.019.03 в Геологическом институте РАН (ГИН РАН) по адресу: 119017, Москва, Пыжевский пер. 7, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в Библиотеке по естественным наукам РАН по адресу: 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35, ИГЕМ РАН и на сайте <http://ginras.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Латышева Ирина Валерьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Изучение состава и строения донных осадков на протяжении долгого времени остается одной из фундаментальных проблем морской геологии и экологии. Особенности процессов седиментогенеза и диагенеза донных осадков являются отражением условий среды осадконакопления. Их исследование позволяет реконструировать палеогеографические обстановки в таком относительно мало изученном районе Арктики, как юго-западная часть Карского моря. Сочетание классических методов литологического анализа с данными акустической съемки и практически не использовавшимся ранее для морских слабо консолидированных осадков региона микроморфологическим анализом, который является информативным инструментом при палеореконструкциях среды осадконакопления, позволяет по-новому взглянуть на вопрос генетической типизации ряда осадочных сеймостратиграфических комплексов.

В данной работе использован комплексный анализ данных, характеризующих верхнюю часть осадочного разреза, где сосредоточена информация о четвертичной истории региона, периоде перехода от последнего ледникового максимума к голоценовым трансгрессивным условиям осадконакопления, которые по техническим критериям не могут быть охарактеризованы глубинными сейсмическими методами. Представлены материалы экспедиционных исследований (2019–2022 гг.) с использованием высокоточного гидроакустического оборудования. Благодаря современному навигационному оборудованию, которым оснащены НИС «Академик Николай Страхов» и НИС «Академик Борис Петров», во время пробоотбора существовала возможность точного позиционирования процесса относительно исследуемых форм рельефа, даже если они отличаются небольшими размерами (как, например, ледово-экзарационные борозды). Невысокие скорости осадконакопления в полярных широтах позволили вещественно исследовать и охарактеризовать не только осадки голоценовой трансгрессии (ЛСК-I), но также осадки дегляциала (ЛСК-II) и диамиктонового комплекса (ЛСК-III).

Исследования геологической среды и природных рисков, связанных с ее изменчивостью, весьма актуальны, поскольку район обладает высоким ресурсным потенциалом, связан с современной (платформа Приразломная) и потенциальной эксплуатацией месторождений углеводородов, а также является участком трассы Северного морского пути.

Степень разработанности проблемы. Постоянное развитие проблем полярного седиментогенеза требует решения задач в целом спектре научных областей: литологии, геохимии, минералогии, гляциологии, гидрологии, геоморфологии, геоэкологии и других науках о Земле. Рельеф дна и акустическое строение осадочного разреза Баренцево-Карского региона изучается на протяжении десятилетий. По результатам непрерывного сеймопрофилирования (НСП) выделены основные черты акустического строения осадочного разреза шельфовых морей Западной Арктики, выполнено подразделение разреза на сеймостратиграфические комплексы (ССК) [Мусатов, 1998а; Эпштейн, 2003, 2010, 2014; Эпштейн и др., 2014; Крапивнер, 2006, 2007, 2009;

Рокос и др., 2021]. Характерные акустические картины, присущие выделяемым ССК, интерпретируются в рамках действия трансгрессивно-регрессивных циклов, чередования эпох оледенений и дегляциалов, а также различных тектонических перестроек территории [Мусатов, 1989, Рокос и Люстерник, 1992, Гайнанов, 2005]. Важный вклад в формирование наших знаний о геологическом развитии региона внесли работы, посвященные распространению многолетнемерзлых пород и динамике криогенных процессов в субаквальной обстановке [Мельников, Спесивцев, 1995 Длугач, Антоненко, 1996; Рекант, Васильев, 2011; Portnov et al., 2013].

Последние десятилетия активно изучается действие ледовой экзарации на донные отложения [Огородов, 2011; Maznev et al., 2023], выполняются датировки постэкзарационных осадков с целью определения возраста образования борозд и оценки периодичности подобных событий [Kokin et al., 2023].

Достаточно сложным вопросом для региона являются определения возраста донных осадков, выполняемые при помощи радиоуглеродных датировок карбонатных раковин микрофоссилий [Polyak et al., 2000; 2002; 2003; Иванова, Мурдмаа, 2005; Murdmaa et al., 2006]. Зачастую, в исследуемых осадочных горизонтах дегляциала, а также в диамиктонах, если этот комплекс удастся вскрыть в ходе пробоотбора, достаточный объем карбонатного материала, необходимого для датирования, отсутствует.

Состав донных отложений Карского моря исследуется достаточно давно. Гранулометрический и минеральный состав кропотливо изучался по экспедиционным материалам рейсов середины прошлого века [Кордилов, 1953, Куликов, 1961, 1963]. Сбор многолетних результатов исследований акваторий шельфовых морей Евразии сотрудниками ВНИИОкеангеология и обобщающие работы по минералогии и литологическим характеристикам донных осадков Карского моря были выполнены В.А. Кошелевой [Кошелева, Яшин, 1999; Кошелева, Павлов, 2014].

В исследовании состава и строения верхней части осадочного разреза Карского моря значительную роль сыграло проведение там в конце XX – начале XXI века ряда международных проектов (SIRRO: 1995–2003 гг., QUEEN: 1996–2003 гг.). Благодаря полученным комплексным данным были построены площадные реконструкции распространения оледенения на Баренцево-Карском шельфе [Mangerud et al., 2002; Svendsen et al., 2004]. Выполнена типизация осадочных разрезов Карского моря [Левитан и др., 1994], описаны особенности их минерального состава, как для алевроитовой [Левитан и др., 1998], так и для глинистой фракции [Левитан и др., 1995; Шелехова и др., 1995], охарактеризованы состав органического вещества (ОВ) и особенности его распределения на акватории Карского моря [Kodina, Peresypkin, 2002; Stein et al., 2004; Galimov E.M. et al., 2006].

Примерами применения микроморфологического анализа малоразмерных ненарушенных фрагментов керна в отечественных исследованиях являются весьма информативные интерпретации криогенных процессов в кайнозойских осадочных толщах Западной Сибири [Слагода,

2005, Слагода и др., 2014]. Микроморфологические исследования слабо консолидированных осадков в петрографических шлифах активно ведутся со второй половины прошлого века и направлены на палеорекострукции среды осадконакопления, в том числе, через выявление различных видов деформаций [Mills, 1983; Dreimanis, 1990; Carr, Rose, 2003; Evans et al., 2006; Meer van der, Menzies, 2011]. Проведение микроскопического анализа большого количества осадочного материала, в петрографических шлифах привело к формированию базы микроморфологических проявлений, являющихся результатом различных деформаций [Meer van der et al., 1993, Larsen et al., 2007]. Данный метод широко применяется для отложений районов действия ледников и айсбергов [Carr, 1999, Iverson et al., 1999; Larsen et al., 2007; Linch et al., 2012, Linch and Dowdeswell, 2016], однако донные осадки Карского моря с этой позиции ранее не рассматривались.

Цель исследования: обнаружение в осадочных отложениях литологических, минеральных, геохимических, микроморфологических проявлений действия различных рельефообразующих факторов (ледниковый, водно-ледниковый, ледово-экзарационный, криогенный, дегазационный, трансгрессивно-регрессивный) в морской обстановке осадконакопления. Для этого необходимо было решить следующие задачи:

1. По данным акустической съемки описать основные особенности рельефа дна и акустического строения осадочного разреза на исследуемых полигонах, определив для каждого полигона рельефообразующие факторы, действие которых (физическое, химическое, либо комплексное) оказывало влияние на процессы седименто- и диагенеза.

2. Выполнить литологическое описание осадочного материала, полученного в результате опробования форм мезорельефа различного генезиса, по литологической неоднородности разреза выделить региональные литостратиграфические комплексы (ЛСК), отобрать образцы для лабораторных исследований, характеризующие разные ЛСК.

3. В камеральных условиях исследовать гранулометрический, минеральный, химический состав донных осадков, применяя при этом современные аналитические методы (оптическая, электронная, люминесцентная микроскопии, рентген-дифрактометрический анализ).

4. В вещественном составе осадочных отложений, а также в их петрографических шлифах выявить микроморфологические и минералогические проявления палеообстановок осадконакопления и действия рельефообразующих факторов на донные отложения.

5. Полученные данные интерпретировать на основе сбора и анализа соответствующего архивного и литературного материала по району исследований с использованием современных картографических, аналитических и графических программных пакетов.

Объектом исследования являются цифровые модели рельефа, сейсмограммы осадочного разреза, литологические, геохимические, минералогические, микроморфологические характеристики позднеплейстоцен-голоценовых осадочных отложений юго-западной части

Карского моря. **Предметом исследования** стали структурно-текстурные проявления действия рельефообразующих факторов и обстановок осадконакопления в верхнем слое донных осадков.

Научная новизна исследования:

- Впервые подробно описаны микротекстурные особенности верхнего слоя донных осадков в контексте палеообстановок осадконакопления и рельефообразующих процессов в юго-западной части Карского моря.

- Впервые установлены и описаны микроморфологические проявления деформаций в субгляциальных, парагляциальных, гляциально-морских обстановках осадконакопления в Приновоземельской зоне Баренцево-Карского шельфа. Результаты микроморфологического анализа в совокупности с данными акустической съемки дополнили районирование Приновоземельской зоны по областям распространения комплексов форм рельефа различного генезиса.

- Выявлены микроморфологические и минералогические особенности действия ледовой экзарации на донные осадки. Впервые в осадках ниже границы экзарационного контакта обнаружен хлорит, имеющий нетермостойкую структуру, принятый в качестве индикатора гляциодинамического воздействия ледовых образований на донные осадки района исследований.

- Впервые для осадков юго-западной части Карского моря выполнено моделирование экспериментальных дифракционных картин глинистого вещества, и существенно уточнено процентное содержание глинистых минералов в составе различных генетических типов отложений района исследований.

- Впервые для рассматриваемого района с использованием различных видов микроскопических исследований (поляризационная, сканирующая электронная (СЭМ), люминесцентная микроскопии) описаны структурно-текстурные особенности, связанные с наличием и неравномерным распределением ОВ в верхней части осадочного разреза, а также с высоким сорбционным потенциалом установленного состава глинистых фаз.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии разделов теории и методов изучения полярного седиментогенеза.

Практическая значимость работы представлена полученными данными о строении и происхождении рельефа, существовании опасных геологических процессов и явлений (выбросы газа, деградация мерзлоты, айсберговая и ледовая экзарация, подводные оползни, неоднородность распределения прочностных характеристик донных отложений по разрезу и по латерали) в южной части Баренцево-Карского шельфа, которые необходимо учитывать при проведении инженерных работ в данном районе.

Рассмотренный объем микротекстур донных осадков, образовавшихся в различных условиях и под воздействием различных рельефообразующих факторов, позволяет выделить микроморфологические индикаторы среды осадконакопления (турбаты, линейки зерен, микроскладчатые формы, флюидальные и псевдослоистые микротекстуры) в осадочном разрезе

рассматриваемой части Западно-Арктического шельфа, что, при недостаточности микропалеонтологических данных, и в совокупности с результатами акустической съемки, становится уникальным индикатором палеообстановок и их изменений.

Представленный автором комплекс акустических, литолого-фациальных и минералогических данных, характеризующих состав и строение верхнего слоя донных осадков Карского моря необходимо учитывать при геоэкологическом районировании шельфа.

Методология и методы исследования. В ходе работы использовались два методологических блока. Для сбора, обработки и интерпретации данных экспедиционной акустической съемки использовались методы многолучевого эхолотирования (МЛЭ), сейсмостратиграфии, геоморфометрии и геоинформатики.

МЛЭ и высокочастотное акустическое профилирование (ВАП) проводились сотрудниками ГИН РАН с борта научно-исследовательских судов (НИС) «Академик Николай Страхов» (2019–2020 гг.) и «Академик Борис Петров» (2022 г.). НИС «Академик Николай Страхов» оснащено глубоководным (RESON Seabat 7150) и мелководным (Seabat 8111) комплексами МЛЭ с навигационной системой динамического позиционирования POS MV, а также акустическим профилографом EdgeTech 3300. Гидроакустический комплекс НИС «Академик Борис Петров» представлен многолучевым мелководным эхолотом Seabat T50-ER и параметрическим профилографом Parasound P70. Непрерывное сейсмопрофилирование (НСП) с частотой спектра излучаемого сигнала 300–1000 Гц проводилось на аппаратуре «Геонт-шельф». В качестве излучателя и приемника использовались спаркер ($W=600$ Дж) и одноканальная сейсмокоса (длина 25 м). Работы выполнялись сотрудниками лаборатории сейсмостратиграфии ИО РАН.

Сбор и обработка данных МЛЭ осуществлялись в программных пакетах PDS2000 V3.7.0.53 и PDS V4.4.3.1. Для картографирования результатов применялись программы ArcMap 10.0 и GlobalMapper 2018. Использовалась общедоступная ЦМР: ИВСаО V.3. Анализ и обработка данных ВАП и НСП в формате SEG-Y выполнялись в программах SeiSee (Россия) и RadexPro 2011.1 (Россия).

Исследование вещественного состава осадочных отложений проводилось при помощи группы методов. Определен валовый химический состав образцов (64 образца). Изучение содержания макро- и микроэлементов в осадках проведено методом рентгено-флуоресцентного анализа (РФА) в лаборатории химико-аналитических исследований ГИН РАН (г. Москва). Совместно с РФА использованы методы аналитической химии для отдельного определения Fe_2O_3 и FeO , а также потерь при прокаливании и содержаний CO_2 , H_2O , Cl (64 образца).

Микроскопическое изучение осадков в петрографических шлифах проведено под микроскопом Zeiss AxioLab Pol, изучение отдельных фракций (включая тяжелую подфракцию) сделано под бинокляром [Руководство..., 1987]. Изучение образцов (тяжелой и легкой подфракции, прозрачно-полированных шлифов, свежих сколов кернов) проведено в ГИН РАН на

сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega-3 с микронзондовой приставкой Aztec (Чехия, г. Брно).

Прозрачно-полированные шлифы для установления форм распространения в осадках ОВ исследовались в люминесцентном микроскопе МСФУ-К (ЛОМО, Россия) с использованием различных светоделительных пластин.

Разделение образцов на гранулометрические фракции выполнено отмучиванием глинистой фракции (<0.001 мм и 0.001–0.01 мм) и ситованием материала >0.01 мм. Глинистые минералы изучались во фракции <0.001 мм, из которой изготавливались ориентированные препараты тонкодисперсных частиц. Рентгеновское изучение препаратов тонкодисперсных частиц проводилось на дифрактометре D8 Advance Bruker на $\text{CuK}\alpha$ излучении в режиме экспресс-съемки. Препараты были сняты со скоростью $2^\circ 2\theta$ в минуту в интервале от 2° до $34^\circ 2\theta$ в воздушно-сухом состоянии, насыщенные этиленгликолем и прогретые при 550°C в течение 2-х часов (выполнено Е.В. Покровской, ГИН РАН) (59 образцов). По результатам съемки были выбраны образцы для более точной диагностики фазового состава и его количественной оценки методом моделирования рентгеновских экспериментальных дифракционных картин от ориентированных препаратов тонкодисперсных частиц [Sakharov et al., 1999]. Моделирование экспериментальных дифракционных картин (40 образцов) осуществлено Б.А. Сахаровым с использованием программ Б.А. Сахарова и А.С. Наумова, которые основаны на математических алгоритмах, приведенных в монографиях [Дриц, Сахаров, 1976; Drits, Tchoubar, 1990; Sakharov, Lanson, 2013].

Пиролиз ОВ в составе темноцветных углеродистых агрегатов, отобранных из песчаной фракции (могут находиться как в тяжелой, так и легкой подфракциях), проводился по методу Rock-Eval на кафедре геологии и геохимии горючих ископаемых МГУ (5 выборок).

На защиту выносятся структурно-текстурные маркеры среды осадконакопления и постседиментационных преобразований осадка. Структурные изменения связаны с образованием аутигенных минеральных сообществ, а для терригенных минералов — с изменением источника сноса и путей транспортировки, обусловленным колебаниями уровня моря. Текстурные изменения отражают действие деформационных процессов и взаимодействие обломочного вещества с органическим. Данные преобразования объединены в группы и представлены в следующих защищаемых положениях:

1) Микроморфологические особенности осадков акустически прозрачного комплекса Приновоземельской части района исследований соответствуют субгляциальной, гляциально-морской и парагляциальной обстановкам осадконакопления.

2) Изменение текстурных особенностей, гранулометрического и минерального составов свидетельствует о чередовании относительно глубоко- и мелководных обстановок осадконакопления во время наступления верхненеоплейстоцен-голоценовой трансгрессии в Приамальской части района исследований. Минеральный состав тяжелой фракции в интервалах разреза со

слоистыми текстурами указывает на привнос вещества в результате размыва щелочных пород.

3) Микроморфологические особенности осадка борозд выпахивания отличаются как для западной и восточной частей района исследований, так и в пределах одной борозды в зависимости от расположения точки пробоотбора на поперечном профиле морфоскульптуры.

4) В ненарушенных верхнеплейстоцен-голоценовых осадках Приямальской части района исследований неравномерное распределение органического вещества по разрезу оказывает влияние на цветовые характеристики и структурно-текстурные особенности осадочных отложений. Проявление в осадочном разрезе литологической границы типа хардграунд, слоистых и флюидалных текстур связано с высокой сорбционной способностью глинистых фаз при взаимодействии с органическим веществом. Высокий сорбционный потенциал донных осадков обусловлен значительным содержанием в отложениях юго-западной части Карского моря смешанослойного иллит-сметита, что, даже при малом содержании тонкодисперсного вещества, делает поверхностный слой зоной аккумуляции потенциальных загрязнителей, особенно в условиях геоморфологических ловушек.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Достоверность полученных результатов определяется: 1) использованием общедоступных архивных материалов по гранулометрии и минералогии района исследований, общедоступной базы данных микроморфологических проявлений деформации в моренных осадках и осадках ледово-экзарационных борозд; 2) соответствием полученных данных ранее проведенным исследованиям; 3) использованием современной высокоточной приборной базы в оптической, люминесцентной, сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии для выполнения микроморфологического, геохимического, минералогического, рентген-дифрактометрического анализов; 4) для выбора точек пробоотбора, соответствующих различным формам мезорельефа и строению осадочного разреза — применением методов гидрографии, цифровой картографии, геоинформатики, сейсмостратиграфии и геоморфометрии, а также применением современного высокоточного оборудования для проведения акустической съемки и соответствующего современного программного обеспечения для графического отображения полученных данных; 5) использованием программного пакета STATISTICA для статистической обработки данных.

Результаты исследований докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях с 2019 по 2024 гг.: Международная научная конференция (Школа) по морской геологии (г. Москва, 2019, 2022, 2023 гг.); IV-VI Всероссийские научные конференции молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (г. Севастополь, 2019 г., г. Калининград, 2020 г., г. Москва, 2021 г.); Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование» (г. Москва, 2020, 2023, 2024 гг.), VII Молодежная конференция «Новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и Мирового океана» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.); «Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-запада

России» (г. Санкт-Петербург, 2022); «Пустоваловские чтения» (г. Москва, 2022 г.), научно-практический форум «Современные вопросы литологии и морской геологии» (г. Москва, 2024 г.).

Личный вклад. Экспедиционные работы выполнялись соискателем в ходе 41-го и 49-го рейсов НИС «Академик Николай Страхов» (июль – авг. 2019, авг. – сент. 2020) и 51-го рейса НИС «Академик Борис Петров» (авг. – сент. 2022). Соискателем в рамках данного исследования собрано, обработано и проинтерпретировано 24590 км акустической съемки методами МЛЭ и ВАП. Соискатель принимал участие в первичном литологическом описании отобранных осадочных колонок и измерении прочности осадка на сдвиг (ПНС, кПа) методом вращательного среза при помощи лабораторной микрокрыльчатки. Соискателем выполнялся отбор проб осадочного материала, поднятого ударными грунтовыми трубками (УГТ) и дночерпателями. В камеральных условиях соискателем выполнялся цикл пробоподготовки, включающий: подразделение осадочных образцов на гранулометрические фракции (полный цикл разделения на фракции выполнен для 49 образцов), изготовление препаратов из выделенного материала <math><0.001\text{ мм}</math> для рентгеновской дифрактометрии глинистого вещества (59 образцов) (под руководством Т.Д. Зеленовой). Соискателем выполнялась интерпретация полученных экспериментальных дифракционных картин фазового состава глинистого вещества (под руководством Б.А. Сахарова). Соискателем подробно исследованы донные осадки в петрографических (90 образцов) и прозрачно-полированных (66 образцов) шлифах с выделением характерных структурно-текстурных особенностей, для ряда образцов использовалась классификация деформаций в осадках ледниковых районов и зон действия ледовой экзарации. Изучение отдельных фракций образцов (включая тяжелую подфракцию) выполнено под бинокляром (под руководством В.В. Петровой) (125 образцов). Выполнены отбор, подготовка и изучение образцов (тяжелой и легкой подфракций, прозрачно-полированных шлифов, свежих сколов керна) на сканирующем электронном микроскопе (под руководством Н.В. Горьковой и В.В. Петровой) (168 микрообъектов, 317 точек сканирования), по данным сканирования рассчитаны формульные единицы минералов. Соискателем проводилось исследование состава и распределения ОВ в образцах на люминесцентном микроскопе (25 шлифов), а также с применением методики люминесцентно-битуминологического анализа капиллярных вытяжек (20 образцов). Выполнено графическое представление полученных различными методами результатов с использованием современного программного обеспечения.

Исследования поддерживались грантами РФФИ по конкурсам «мол_а_вед», «А» и грантом РФФИ № 21-77-20038 «Ледово-экзарационный рельеф Баренцево-Карского шельфа».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе 10 статей в журналах, рекомендованных ВАК. Из них – 8 статей в журналах, индексируемых в Web of Science (Science Citation Index Expanded) и/или Scopus.

Структура и объем. Работа включает в себя введение, 5 глав, заключение, список

литературы (300 наименований) и приложение. Общий объем: 255 страниц, в том числе 107 рисунков и 27 таблиц.

Благодарности. Автор искренне благодарит своего научного руководителя д.г.-м.н., профессора М.Д. Хуторского и коллег из лаборатории тепломассопереноса ГИН РАН за всестороннюю поддержку и помощь при написании диссертации. За помощь в получении и обработке экспедиционных данных автор выражает особую благодарность С.Ю. Соколову, Е.А. Морозу, Ю.А. Зарайской, А.С. Абрамовой, О.В. Кокину, В.В. Архипову, Р.А. Ананьеву, Н.О. Сорохтину, С.Л. Никифорову. Автор выражает благодарность В.Б. Курносову за труд внутреннего оппонента и ценные советы при подготовке работы. За помощь в различных видах работ с осадочным веществом автор искренне благодарит Н.В. Горькову, Е.В. Покровскую, Б.А. Сахарова, Т.Д. Зеленову, И.Е. Стукалову, Е.В. Щепетову, А.Г. Рослякова, Е.Н. Полудеткину, И.В. Чикирёва. За бесценные консультации, формирование научного кругозора, внимание и поддержку автор бесконечно признателен В.В. Петровой. Данная работа стала возможной благодаря работе и высокому профессионализму группы технологической обработки пород ГИН РАН, сотрудников химико-аналитической лаборатории ГИН РАН, сотрудников лаборатории сейсмостратиграфии ИО РАН, членов экипажей НИС «Академик Николай Страхов» и «Академик Борис Петров», а также благодаря поддержке и заботе моей семьи.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, излагаются цель и задачи работы, указаны научная новизна, защищаемые положения, теоретическая и практическая значимость работы, апробация результатов исследования, указан личный вклад соискателя.

В **первой главе** рассмотрено современное лито- и сейсмостратиграфическое подразделение четвертичного осадочного чехла Баренцево-Карского региона. Подробно описываются литологические и сейсмоакустические исследования, которые позволили выделить региональный осадочный сейсмостратиграфический комплекс (ОССК) диамиктонов. Рассматривается история интерпретации его происхождения как на примере полярных шельфовых морей, так и в составе отложений субарктических низменных равнин. Приводится аргументация сторонников гляциального, ледниково-морского и морского происхождения диамиктонов. По данным сейсмоакустической съемки выделяются акустически прозрачная и хаотическая волновые картины диамиктонового ОССК для Баренцево-Карского региона. При этом акустически прозрачный комплекс (АПК) диамиктонов характеризуется нормальными и пониженными значениями показателя пластичности, а также величины ПНС, относительно осадков комплекса с хаотической акустической структурой, которые интерпретируются как основные морены (тиллы). Описываются интерпретации происхождения АПК в контексте гляциальной, ледниково-морской и морской

концепций четвертичной истории развития шельфовых осадочных отложений.

Во **второй** главе дана характеристика использованному в ходе экспедиционных работ гидроакустическому оборудованию на НИС «Академик Николай Страхов» и НИС «Академик Борис Петров». Рассматриваются результаты МЛЭ, ВАП и НСП на выделенных 14 полигонах, где выполнены станции пробоотбора, а также на некоторых показательных участках транзитной съемки (рис. 1).

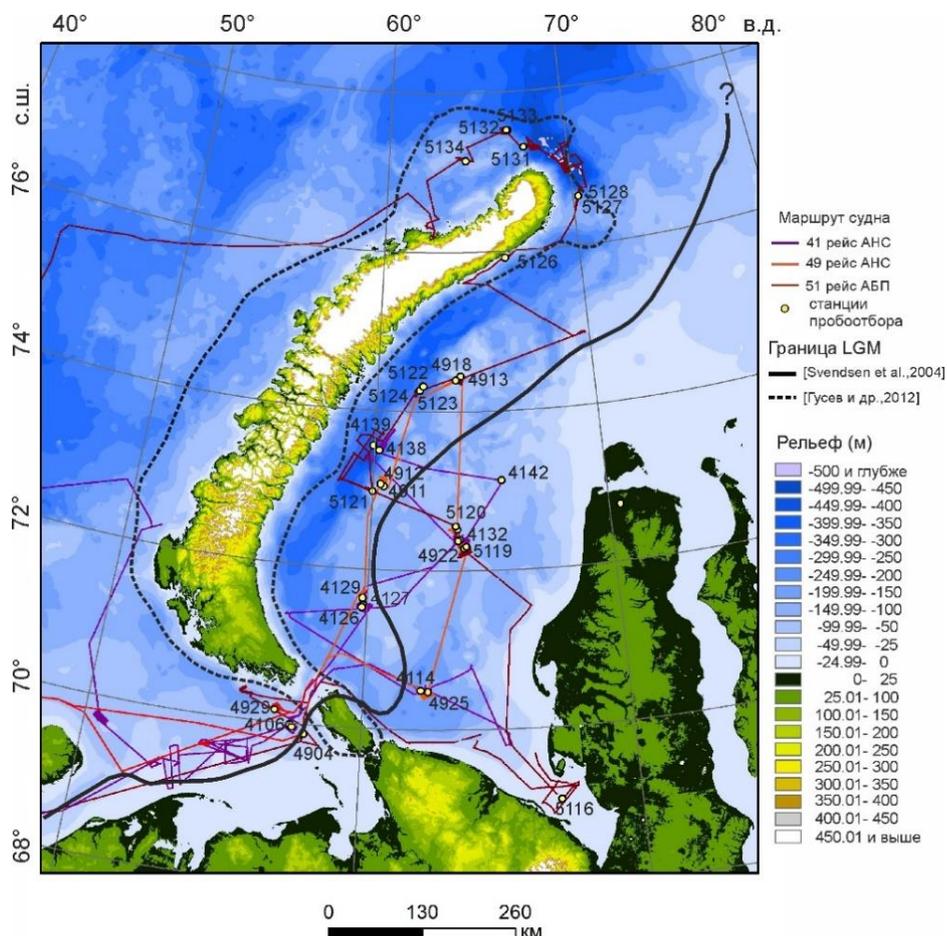


Рисунок 1 – Район исследований в 41-м и 49-м рейсах НИС «Академик Николай Страхов» и в 51-м рейсе НИС «Академик Борис Петров» в Карском, Печорском и Баренцевом морях. Обозначено положение границы последнего ледникового максимума (LGM) по данным [Svendsen et al., 2004; Гусев и др., 2012].

По результатам комплексной интерпретации данных акустической съемки выделяются рельефообразующие факторы, способные оказать влияние на текстурные и вещественные характеристики осадочных отложений. Установлено, что на полигонах в восточной части района исследований в результате пробоотбора получены осадки верхнего и среднего ЛСК (ЛСК-I и ЛСК-II, соответственно). В западной и северной частях Приновоземельской зоны района исследований в составе грядовых и останцовых форм были вскрыты отложения АПК, представленные диамиктонами (ЛСК-III) и практически не перекрытые голоценовыми осадками.

Рассматривается связь геоэкологической обстановки с геоморфологией и литологическими характеристиками донных осадков, вводится понятие геоморфологической ловушки как участка дна, где прерывается движение осадочных потоков и происходит осадконакопление материала природного и антропогенного происхождения [Диагностический..., 2011]. Выявление участков морских шельфов с соответствующим сочетанием геоморфологических и

литологических параметров среды является необходимым этапом геоэкологического районирования.

В третьей главе исследуется литология донных осадков района исследований. Выполнена группировка колонок по литологическим признакам (рис. 2).

К первой группе отнесены колонки с высокими значениями ПНС по всему осадочному разрезу, представленные осадками АПК (рис. 2-1). По своему гранулометрическому составу они были отнесены к диамиктонам, т. е. плохо сортированным отложениям, в которых содержание каждой из фракций не превышает 50% и в которых существенно увеличивается содержание обломков гравийно-галечной размерности (рис. 3, центральная область треугольника грансостава).

Подробно рассматривается структура и микротекстурные особенности отложений АПК (т.е. микроморфология осадка). Для интерпретации использована классификация микроморфологических проявлений деформации в субгляциальной среде [van der Meer, 1993; Linch, Dowdeswell, 2016]. Поскольку русскоязычные аналоги данной классификации в литературе отсутствуют, соискателем были использованы переводные конструкции.

По итогам анализа в отложениях некоторых АПК был выявлен комплекс деформаций «турбат-линейка-мостик» (рис. 4), который характеризует пластическую деформацию при сдвиговом напряжении в среде с различными показателями ПНС.

Турбаты (grain turbate) описываются как расположение близких по размеру обломочных зерен по окружности таким образом, что длинные оси этих зерен образуют точку контакта (или почти соприкасаются) с соседним зерном. Встречаются два вида турбатов: 1) зерна формируют кругообразный рисунок вокруг центрального зерна или ядра турбата и 2) центральная зона внутри кругообразного рисунка зерен свободна (безъядерный турбат) [van der Meer, 1993; Linch, Dowdeswell, 2016]. По результатам исследований соискателем были выделены турбаты, выраженные в оптической ориентировке глинистого матрикса (ООГМ) (рис. 4в-е). Линейки зерен (grain lineation) часто встречаются в ледниковых отложениях и являются маркером сдвиговой нагрузки. Они состоят более, чем из трех зерен, которые вращаются и выравниваются внутри сдвиговых зон таким образом, что длинная ось зерен параллельна направлению сдвига [Hiemstra, Rijdsdijk, 2003]. Мостик (grain stack /bridge): состоит как минимум из 5 зерен одинакового размера и развивается под углом к направлению сдвига [Larsen et al., 2007].

Подобное сочетание деформационных проявлений становится возможным при наличии 1) нормально и недоуплотненных (относительно базальных морен) осадочных отложений, 2) неравномерного распределения ПНС по разрезу, 3) полимодального состава осадков. На границах зон с разной прочностью осадка на сдвиг возникают линейки зерен с ориентировкой длинных осей зерен параллельно направлению сдвига. Внутри менее уплотненных зон вдоль линеек образуются турбаты, сопровождаемые мостиками (рис. 4а).

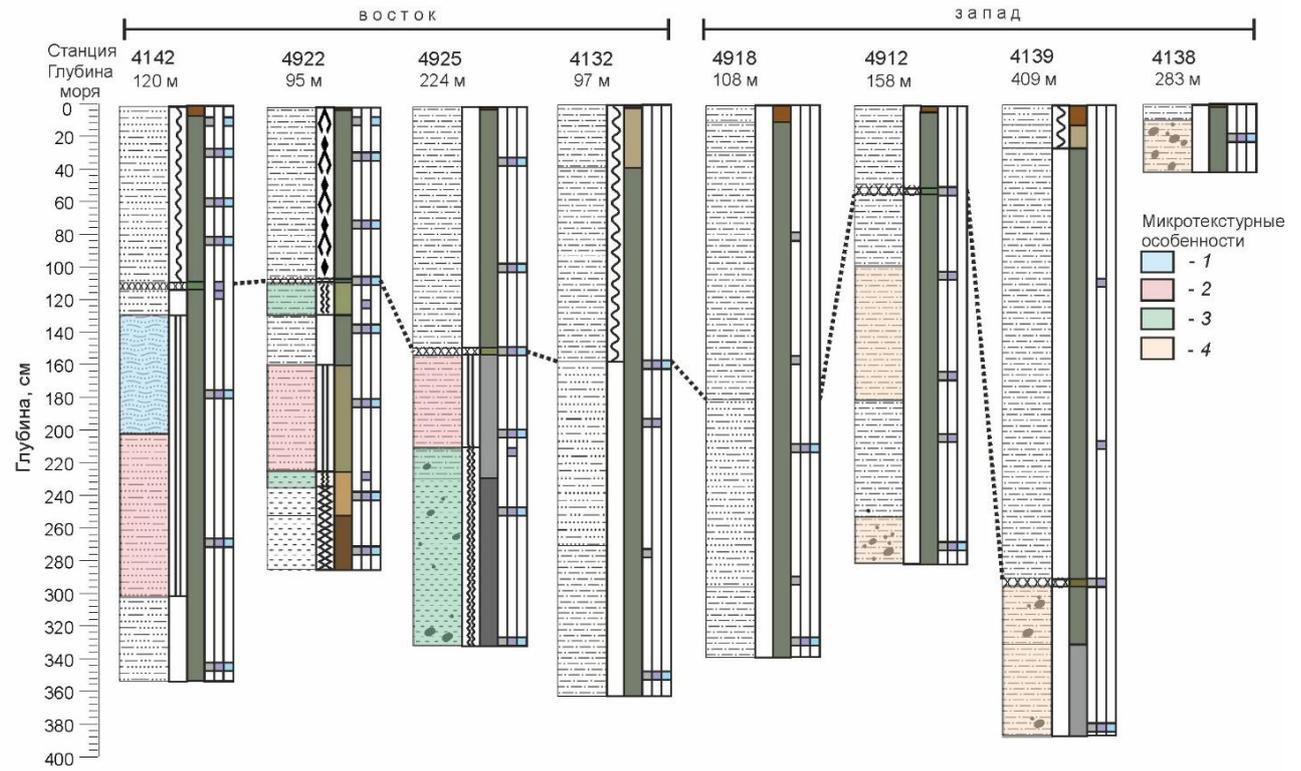
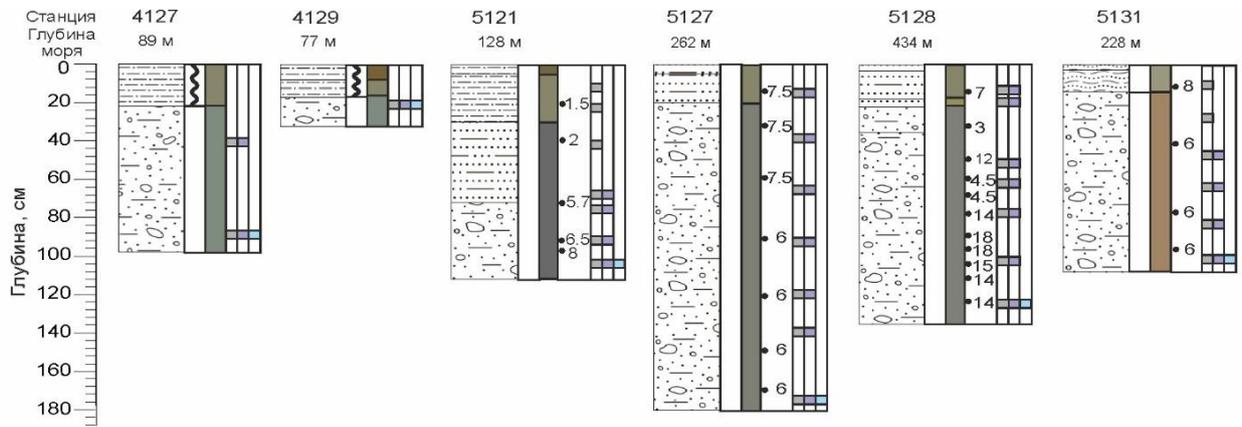


Рисунок 2 – Литологические колонки района исследований с подразделением на группы: I – первая группа осадочных отложений с повышенными значениями ПНС по всему разрезу (осадки АПК); II – вторая группа: пунктиром отмечена граница между литологически однородным верхним горизонтом и горизонтом со сменой гранулометрического состава и появлением текстурных изменений, в некоторых колонках граница маркируется хардграундом; III – литологические колонки, полученные в бороздах ледовой экзарации, для которых характерен выраженный экзарационный контакт, и на фоновых поверхностях. Структура: 1 — алеврито-глинистый ил, 2 — глинистый ил, 3 — глина, 4 — глинисто-алевритовый ил, 5 — песчано-алевритовый ил, 6 — песок, 7 — диамиктон, 8 — хардграунд, 9 — экзарационный контакт, 10 — крупнообломочный материал. Текстура: 1 — однородная, 2 — полосчатая, 3 — слоистая, 4 — флюидальная, 5 — биотурбационная, 6 — оползневая, 7 — комковатая. Микротекстурные особенности: 1 — слоистость, 2 — псевдослоистость, 3 — флюидальная (восточный тип), 4 — флюидальная (западный тип). Анализируемый материал в интервале опробования: 1 — шлик, 2 — шлиф, 3 — глинистая фракция (<0.001 мм), 4 – точки измерения сопротивления ядра недренированному сдвигу и результаты измерения (ПНС, кПа). Цветовые колонки схематично отображают цвет донных осадков.

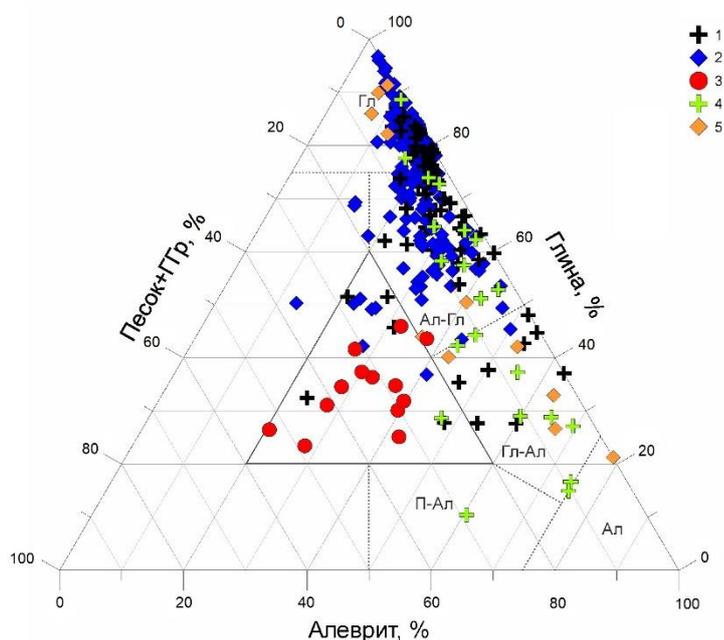


Рисунок 3 – Гранулометрический состав осадков юго-западной части Карского моря. 1- восточная часть района исследований, 2 – западная часть района исследований, 3 – осадки АПК Приновоземельской области, 4 – результаты, полученные в ходе данной работы в восточной части района исследований, 5 – результаты, полученные в ходе данной работы в западной части района исследований за пределами зон распространения АПК.

Другая часть исследованных акустически прозрачных пачек по своим микроморфологическим особенностям была классифицирована в ходе работы как ледниково-морские отложения, сформированные в гляциально-стоковой обстановке, и ледниково-морские парагляциальные отложения (шельфовая морена). Также были выделены микротекстуры, характерные для осадков перигляциальных зон и зон ледового разноса. Литологическая характеристика осадков АПК подтверждает *первое защищаемое положение*.

Таким образом, отложения АПК по составу могут быть весьма разнообразны. В составе акустически прозрачных пачек были рассмотрены диамиктоны и алеврито-глинистые тонкослоистые ритмиты. Акустическое осветление происходит, когда нивелируются перепады физических свойств и сигнал НЕ отражается и НЕ рассеивается. Если есть точечные рассеиватели, которые можно было бы предполагать в диамиктонах, то запись получает свойство, называемое акустической мутностью (или хаотической волновой картиной). Исходя из

вышеперечисленного, следует вывод, что «сгладить» перепады физических свойств в диамиктоне, обусловленные наличием многочисленных включений крупно- и грубообломочного материала внутри глинистого матрикса, позволяет повышенная (относительно морских слабо консолидированных осадков верхнего ЛСК) прочность осадка.

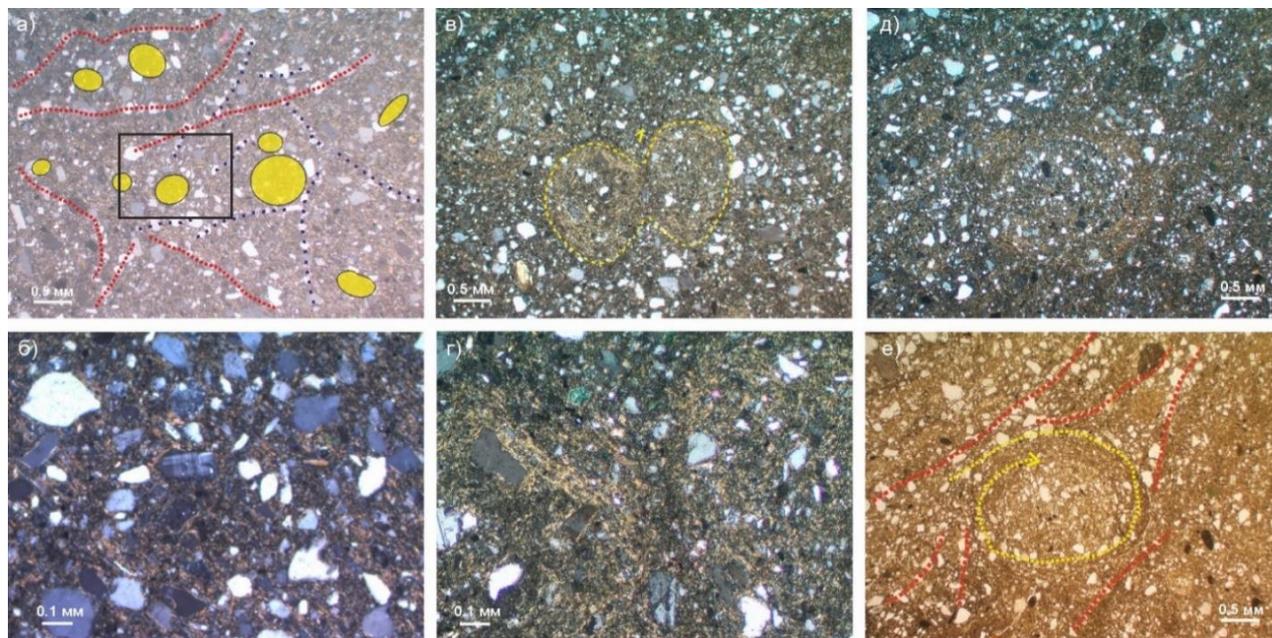


Рисунок 4 – Примеры деформаций, наблюдаемых в петрографических шлифах:

отложений АПК: а) интерпретация: турбат (желтая окружность), линейка (красный пунктир), мостик (фиолетовый пунктир); б) турбат на увеличенном фрагменте (фото в проходящем свете с анализатором), выделенном черным прямоугольником на рисунке (а); в) турбаты, выраженные в оптической ориентировке глинистого матрикса (желтый пунктир); г) зона контакта турбатов на увеличенном фрагменте (фото в проходящем свете с анализатором), отмеченная цифрой 1 на рисунке (в);

отложений на экзарационном контакте в ледово-экзарационной борозде: ротационная структура турбата подчеркивается оптической ориентировкой глинистого матрикса, фото в проходящем свете с анализатором (д) и без анализатора (е); пунктир: желтый – турбат, красный – линейки зерен.

Ко второй группе (рис. 2-II) отнесены колонки с выраженным, достаточно однородным ЛСК-I с низкой ПНС, с многочисленными примазками и прослоями гидротроилита. Ниже следует горизонт со структурно-текстурной изменчивостью, иногда отделяясь от вышележащего ЛСК-I литологической границей типа хардграунд [Левитан и др., 1994]. Для ряда рассматриваемых восточных колонок выделяется горизонт с увеличением в осадке количества алевритовой фракции, там же отмечены слоистые текстуры, сформированные за счет окрашивания слойков ОВ, что проявляется при микроскопическом изучении образцов (рис. 5-I), а не за счет смены гранулометрического состава, как это наблюдается при макроскопическом описании. Данная микротекстурная особенность обозначена как псевдослоистость.

Ниже и выше по разрезу выделены флюидальные текстуры (текстуры потока) восточного (рис. 5-II) и западного типов, также связанные с присутствием различных форм и

неравномерным распределением ОВ по разрезу.

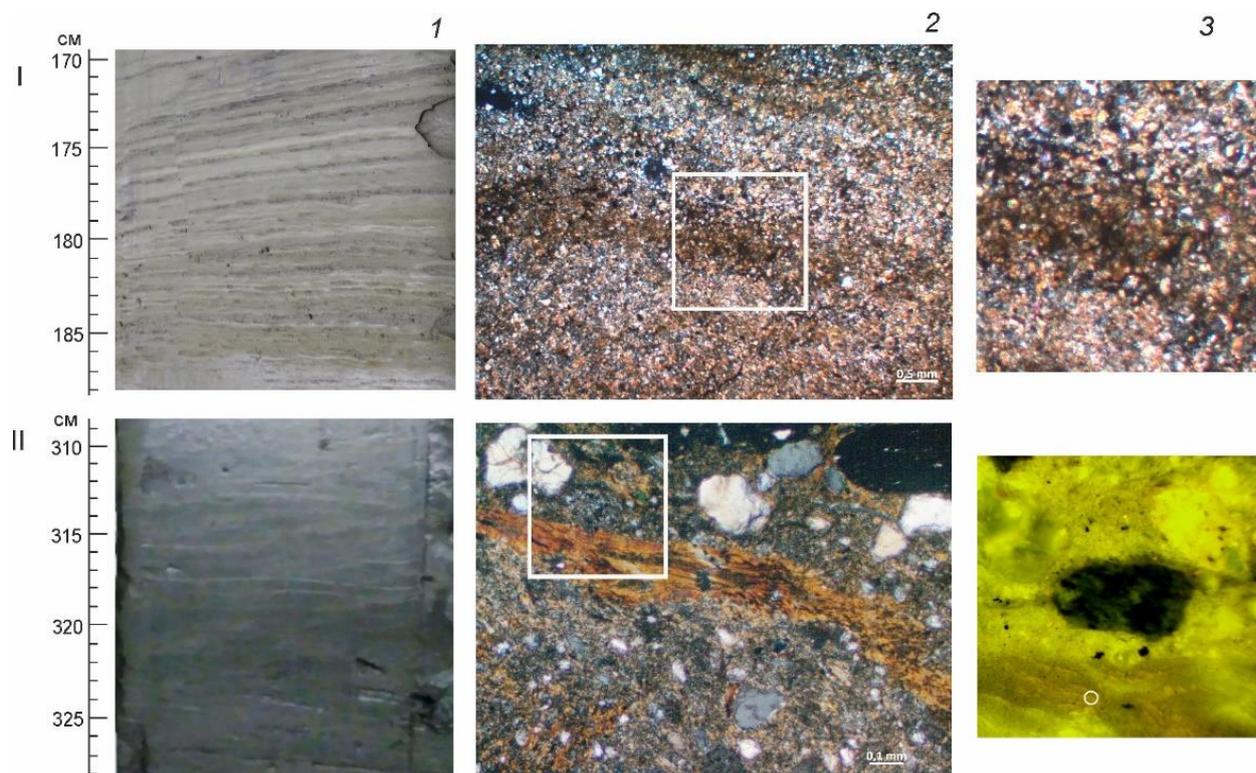


Рисунок 5 – 1 – Интервалы осадочного разреза: I - слоистая текстура в колонке 4922 (170–188 см); II – флюидальная текстура в колонке 4925 (309–328 см); 2 – микроскопические проявления текстурных особенностей: I – проявление эффекта псевдослоистости в микротекстуре за счет окрашивания осадка ОВ в образце 4922_183; II – специфическая окраска участков глинистого вещества, образец 4925_330, фото в проходящем свете с анализатором; 3 – увеличенные фрагменты (выделены белыми квадратами): I – зона окрашивания, где через тонкодисперсное ОВ прорастает алевритовая структура осадка; II – люминесценция ОВ внутри специфически окрашенного глинистого вещества (белый кружок).

Для определения возможных фациальных обстановок и гидродинамических условий седиментации для восточных колонок были построены кумулятивные кривые гранулометрического состава, с которых были сняты значения 50% квантиля (Q₂) и 1% квантиля, а затем нанесены на генетическую диаграмму Р. Пассеги, известную также как диаграмма СМ [Методы..., 1984; Логвиненко, Сергеева, 1986] (рис. 6). Нанесенные на диаграмму результаты хорошо соответствуют имеющимся данным структурно-текстурного анализа, подразделяя имеющиеся образцы на обломочный материал, отложенный потоками с невысокой и средней скоростью, а также отложения спокойной воды. Образцы с характерными псевдослоистыми микротекстурами вошли на диаграмме СМ в единую зону, соответствующую отложениям из суспензии, переносимой потоком с невысокой скоростью. Таким образом, их структурно-текстурная схожесть обусловлена генетически. Данные результаты, а также результаты минералогического анализа, которые будут описаны ниже, обосновывают *второе защищаемое положение*.

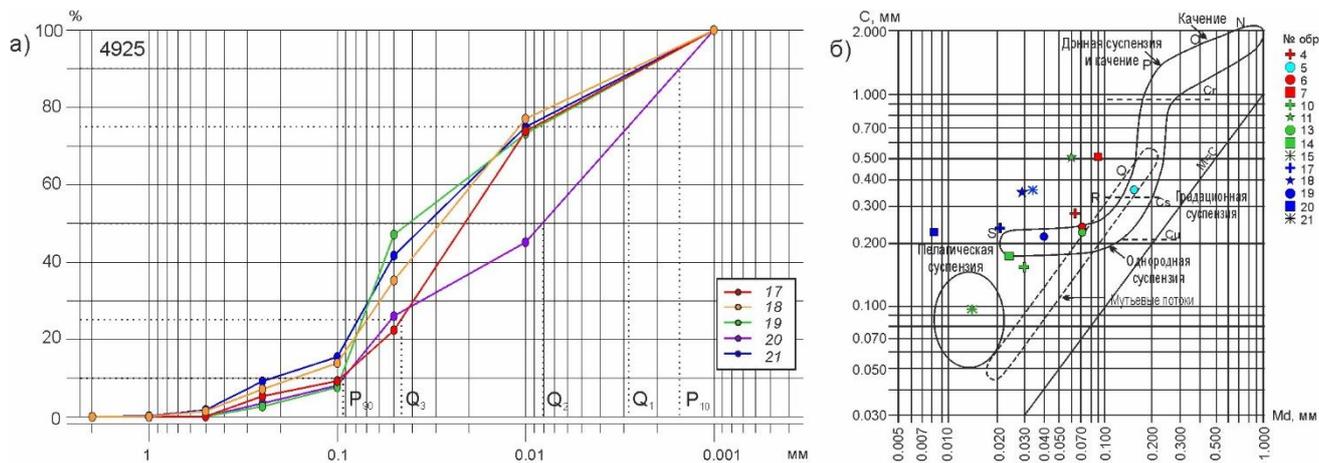


Рисунок 6 – Представление результатов гранулометрического анализа в виде кумулятивных кривых гранулометрического состава (а) и генетическая интерпретация гидродинамических условий седиментации с использованием диаграммы Пассеги (б). Образцы № 4–7 – колонка 4142, 10–15 – колонка 4922, 17–21 – колонка 4925. Условные обозначения: крестик – ЛСК-I, звезда – граница-хардграунд, кружок – интервал со слоистой текстурой (для образцов характерна микротекстурная псевдослоистость, кроме образца 5), Квадрат и звездочка – ЛСК-II, образцы, полученные ниже слоистых интервалов.

Колонки третьей группы (рис. 2-III) относятся к зонам ледовой экзарации, для которых в распределении ПНС по разрезу характерна резкая прочностная граница, характеризующаяся как экзарационный контакт, который является границей между доэкзарационными отложениями, подвергшимися выпахивающему воздействию, и постэкзарационными, накапливающимися после действия айсберга (или другого ледового тела) [Сухих и др., 2024б].

Подробно рассматриваются микротекстурные особенности отложений в колонках, отобранных в осевой и прибортовой зонах единой системы борозд в мелководных условиях (глубина моря 23–25 м) Байдарацкой губы, а также в борозде на восточном борту Восточно-Новоземельского желоба (ВНЖ) (глубина моря 260–270 м). Для прибортовой зоны мелководной борозды характерными являются микроскладчатые деформационные проявления. В осевой части данной борозды соискателем обнаружены турбаты в доэкзарационных отложениях, представленных морскими алевроито-глинистыми илами. Несмотря на меньшее количество материала песчаной размерности (особенно, в нижней части колонок), ротационная структура турбата подчеркивается оптической ориентировкой глинистого матрикса (см. рис.4д, е; рис.7а–в).

Турбаты, представленные в отложениях борозды в бортовой зоне ВНЖ сцементированными обломочными агрегатами внутри тонкозернистого глинистого матрикса, (рис. 4г-е), являются индикатором ледового давления на осадок полимодального состава. По данным ВАП данной колонкой в ледово-экзарационной борозде вскрыт ЛСК-III (диамиктоновый комплекс). Граничные зоны между турбатом и тонкозернистым материалом вмещающего матрикса маркируются комковатыми выделениями хлорита (рис. 6в, е), которые встречаются в сходном положении и в мелководных ледово-экзарационных отложениях.

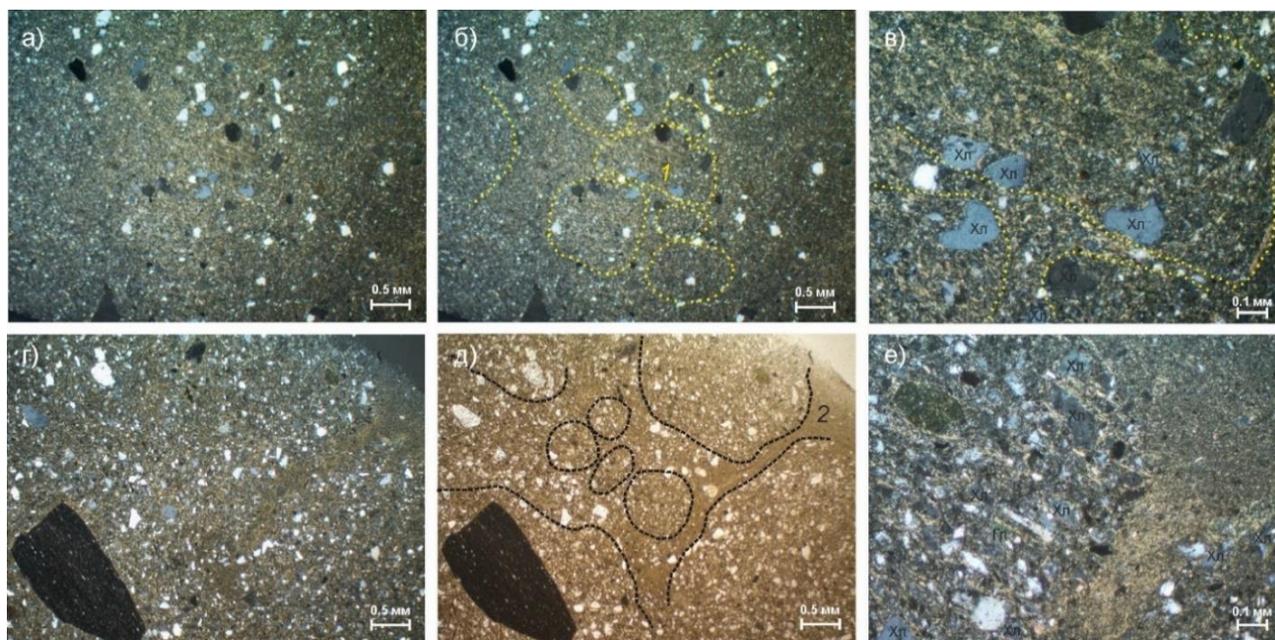


Рисунок 7 – Турбаты в образцах ниже экзарационного контакта, выраженные в оптической ориентировке глинистого матрикса: а–в — отложения в осевой зоне борозды в Байдарацкой губе, фотографии петрографического шлифа алевроито-глинистых голоценовых илов в проходящем свете с анализатором. Турбаты выделены желтым пунктиром; рис. (в) – увеличенный фрагмент зоны 1 на рис. (б); г–е — отложения в осевой зоне борозды в бортовой части ВНЖ, фотографии петрографического шлифа позднеплейстоценовых диамиктонов в проходящем свете с анализатором (г, е) и без анализатора (д); рис. (е) - увеличенный фрагмент зоны 2 на рис. (д). Турбаты, представленные сцементированными обломочными агрегатами, выделены черным пунктиром. Комковатые выделения хлорита «оконтуривают» турбаты.

Хл – хлорит. Гл – глауконит.

Структурные особенности и микротекстуры осадка борозд выпаживания отличаются как для западной и восточной частей района исследований, так и в пределах одной борозды в зависимости от расположения точки пробоотбора на поперечном профиле морфоскульптуры, что позволяет сформулировать *третье защищаемое положение*.

В четвертой главе приводятся результаты исследования состава осадочных отложений различными методами. По данным геохимического анализа 64 образцов донных осадков выполнен статистический анализ концентраций макро- (оксиды, %) и микроэлементов (ppm), а также содержания CO_2 , H_2O , Cl^- и значений потерь при прокаливании. Анализ статистических характеристик выборок указывает на относительно однородное распределение большинства элементов в осадках юго-западной части Карского моря. На это, кроме соответствия закону нормального распределения, указывают близкие значения среднего арифметического и медианы. Группа, которая данной закономерности не соответствует, достаточно мала. Несоответствие вызвано наличием в выборках экстремальных значений, что может быть связано с какими-либо локальными особенностями.

Для описания химизма донных осадков, а также с целью получения дополнительной информации об источниках и механизмах осадкообразования, была использована литохимическая

классификация [Юдович, Кетрис, 2000]. Для этого полученные результаты геохимического анализа были разделены на 5 групп в соответствии с проведенным подразделением осадочного разреза на ЛСК. Если внутри ЛСК наблюдались существенные различия образцов по гранулометрическому составу, то выполнялось подразделение осадков на литотипы внутри одного ЛСК. Построена корреляционная матрица гранулометрического состава и содержания макро- и микроэлементов в исследованных образцах. Содержание макро- и микроэлементов в осадочных отложениях подчинено их литотипу.

Результаты подразделения содержаний микроэлементов по ЛСК указывают на повышенное содержание в осадках АПК (ЛСК-III) элементов, обладающих сродством к обломочной компоненте осадка (Ba, Sr, Zr), а также имеющих положительную корреляцию с SiO_2 (Cr, Nb, V) и Al_2O_3 (Sc, Y), и соответственно, пониженное содержание элементов, имеющих положительную корреляцию с содержанием глинистой фракции (Co, Cu, Ga, Ni, Pb, Rb, Th, Zn). Наблюдаемая особенность хорошо соответствует описанному полимодальному составу диамиктонов с повышенным содержанием обломочной составляющей.

В третьем разделе главы рассматривается минеральный состав осадков, исследовавшийся в псаммитовой фракции (1–0.1 мм) под бинокляром, иногда с разделением фракции на тяжелую и легкую минеральные подфракции в бромформе. Условно выделены две группы минералов по их вкладу в формирование определенного типа осадка: 1) минералы, привнесенные извне (терригенные) и 2) минералы, образовавшиеся непосредственно на месте осадконакопления (аутигенные).

Среди привнесенных подробно, с привлечением данных СЭМ и расчетом формульных единиц, рассматриваются минералы групп пироксенов, гранатов, амфиболов, слоистые силикаты и рудные минералы, а также полиметаллические микрочастицы на поверхности более крупных минеральных зерен. Установлено, что для горизонта с глинисто-алевритовой структурой и со слоистой текстурой (см. рис. 2-II, рис. 5-I) характерно появление в гранатовой ассоциации гроссуляра и андрадита, также отмечается многообразие моноклинных кальциевых амфиболов (актинолит, ферроактинолит, ферричермакит, алюмоферричермакит), что свидетельствует о размыве щелочных пород во время изменения гидродинамического режима, обусловленного флуктуациями уровня моря. Базальный рефлекс амфиболов отмечается для слоистых интервалов разреза на рентгеновских дифрактограммах как валовых образцов, так и тонкодисперсной фракции. Результаты минералогического анализа дополняют *второе защищаемое положение*.

В ходе исследования минерального состава псаммитовой гранулометрической фракции, как в тяжелой, так и в легкой минеральной подфракциях, а также в петрографических шлифах донных осадков юго-западной части Карского моря были обнаружены черные зерна округлой или удлинённой формы с характерным маслянистым блеском (рис. 8). Сложный элементный

состав, полученный по данным СЭМ, не позволил идентифицировать их как какой-либо минерал. При схожем облике состав мог кардинально меняться не только от зерна к зерну, но и внутри одного зерна, из-за чего было выдвинуто предположение о наличии склеивающей и покрывающей различные минеральные зерна углеводородной пленки [Сухих и др., 2024а].

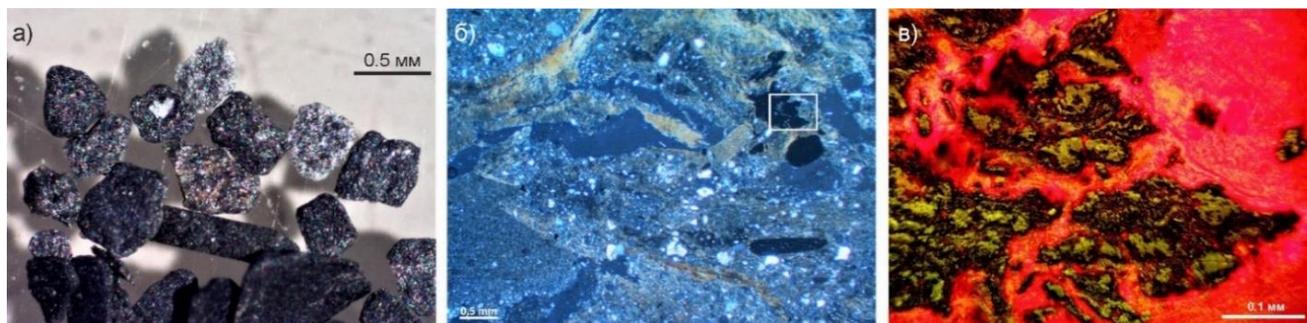


Рисунок 8 – Углеродистые агрегаты в образце с флюидальной текстурой: а) выборка из тяжелой подфракции среднезернистого песка под бинокляром; б) в прозрачно-полированном шлифе, фото в проходящем свете с анализатором; в) наблюдение люминесценции углеродистого агрегата в красной области видимого спектра (увеличенный фрагмент выделен белым прямоугольником на рисунке б).

Четвертый раздел главы посвящен особенностям распределения ОВ в верхней части осадочного разреза. Приводятся результаты СЭМ, люминесцентной микроскопии прозрачно-полированных шлифов, а также люминесцентно-битуминологического анализа капиллярных вытяжек, выполненных последовательно с использованием двух растворителей для зон с различными формами взаимодействия ОВ, глинистой и обломочной составляющих осадочных отложений.

По результатам СЭМ прозрачно-полированных шлифов зон осадка с флюидальными и псевдослоистыми микротекстурами были построены профили содержания углерода в зависимости от положения точки сканирования и цвета вещества в ней (определялся на поляризационном микроскопе в проходящем свете с анализатором). В распределении углерода в осадке была выявлена литологически обусловленная зональность, которая подтверждается результатами люминесцентных методов исследования.

Приведены данные пиролитического анализа выборок темноцветных углеродистых агрегатов (рис. 8а). Подтвердилась роль ОВ в их формировании (ТОС = 9–51 %). Значения НІ <100 мг/г вместе с высоким кислородным индексом ОІ свидетельствуют о терригенном, глубоко окисленном ОВ (гумусовое вещество, кероген III типа). По значению T_{max} , характеризующему степень термической зрелости ОВ, образцы делятся на две группы: западную, представленную более древним ОВ в составе осадков АПК грядовых форм ($T_{max} = 432–447^{\circ}\text{C}$), и восточную в состав которой входят осадки голоцена и дегляциала ($T_{max} = 411–417^{\circ}\text{C}$).

Исследования разнообразия и неравномерности распределения ОВ в контексте литологической неоднородности осадочного разреза позволяют сформулировать *четвертое*

защищаемое положение.

В **пятой главе** представлены результаты исследования состава тонкодисперсной фракции (<0.001 мм). Рассматриваются ранее собранные материалы по распределению содержаний глинистых минералов, в основном, в поверхностном слое (0–5 см) донных осадков района исследования [Wright, 1974, Nuernberg et al., 1995; Левитан и др., 1995; Шелехова, 1998; Washner et al., 1999, Krupskaya et al. 2004, Stein et al., 2006; Vogt, Knies, 2008, 2009, Соколов и др., 2020].

По результатам рентген-дифрактометрического анализа тонкодисперсных препаратов были выделены характерные для района минеральные ассоциации, которым также соответствовало подразделение на восточный, западный и северный типы. Для некоторых образцов была выполнена более точная количественная оценка содержания глинистых минералов в образце методом моделирования экспериментальных дифракционных картин. Результаты моделирования указывают на высокое содержание в тонкодисперсной фракции смешанослойных образований с различными сочетаниями иллитовых и смектитовых слоев, что в более ранних работах не отмечалось в силу использования полуколичественного метода [Biscaye, 1965]. Содержание смешанослойной фазы составило 51–74 % для восточной ассоциации глинистых минералов, 30–60 % в осевой и бортовой частях ВНЖ и 11–46 % в северной части Приновоземельской области; в нескольких образцах в прибрежной зоне арх. Новая Земля смешанослойная фаза отсутствовала. Концентрации иллита, хлорита и каолинита в рассматриваемых осадочных отложениях отличаются достаточным постоянством. Рассчитанные с использованием методики, представленной в работе [Геодекян и др., 1997], значения сорбционного потенциала донных осадков района исследований указывают на относительно высокие (при сравнении с данными по поверхностному слою Баренцева моря) значения показателя, даже несмотря на возможное низкое (первые проценты) содержание тонкодисперсной фракции, что подтверждает **четвертое защищаемое положение.**

В районах ледовой экзарации на экспериментальных дифрактограммах тонкодисперсного материала образцов, лежащих ниже границы резкого повышения ПНС в колонках из экзарационных борозд, выявлено наличие нетермостойкого хлорита. Комковатые выделения хлорита отмечены в петрографических шлифах для данных образцов (см. рис. 7в, е). Для сравнения исследовались образцы, отобранные выше и ниже экзарационного контакта, иногда в непосредственной близости друг от друга, как в колонке 5122 (рис. 9).

Нетермостойкость хлорита проявляется только для образцов ниже выявленной границы стрессового давления, обусловленного айсберговой экзарацией, что дополняет **третье защищаемое положение** и, при подтверждении на более значительных объемах материала, может стать маркером ледово-экзарационного воздействия в донных осадках.

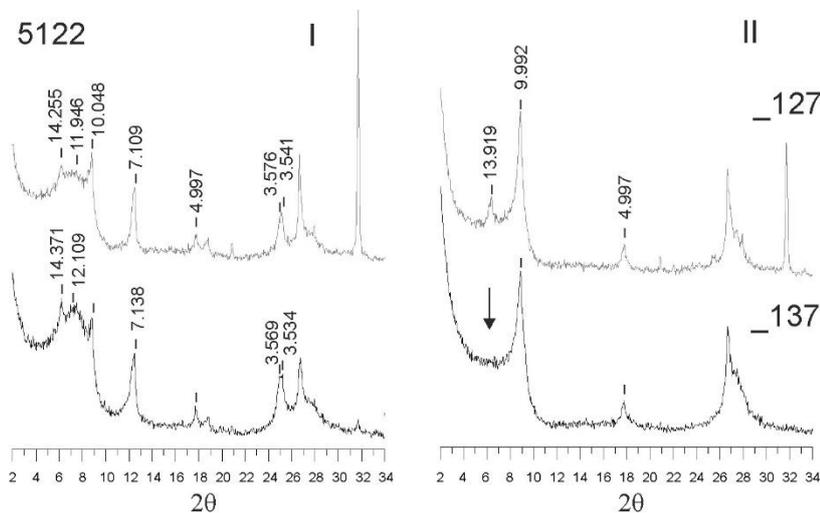


Рисунок 9 – Данные рентгеновской съемки тонкодисперсных препаратов в двух состояниях: I – воздушно-сухом (природном), II – прокаленном при $T = 550^{\circ}\text{C}$. Образец получен: 5122_127 – выше экзарационного контакта; 5122_137 – ниже экзарационного контакта. Отсутствие рефлекса хлорита при прокаливании в доэксарационных отложениях отмечено стрелкой.

В **заключении** изложены итоги выполненной работы, рекомендации по их применению и перспективы дальнейшей разработки темы.

Приложение включает карту образцов и таблицы с результатами СЭМ, где представлены химический состав и рассчитанные формульные единицы для исследованных групп минералов, а также графики соответствия экспериментальных и модельных дифракционных картин для группы осадочных колонок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выполненной работе представлены новые данные, характеризующие состав и строение донных осадков юго-западной части Карского моря, полученные при помощи спектра методов. По результатам работы установлено следующее:

1. Действие рельефообразующих процессов, проявляющихся в характерных волновых картинах в акустическом строении осадочного разреза, а также в формах мезорельефа, накладывающееся на осадконакопление в морской среде, можно проследить и в малоразмерных фрагментах керна в элементах микростроения осадка.
2. Микроморфологические особенности осадков показали присутствие в образцах некоторых из Приновоземельских АПК сочетания деформаций, характерных для субгляциальных условий (турбаты, линейки, мостики). Часть отложений АПК была классифицирована как ледниково-морские осадки гляциально-стоковых зон, а также шельфовых морен. Выявлены микроморфологические особенности, соответствующие перигляциальной обстановке, связанные с поступлением в осадки талых вод и вытаивающего обломочного материала.
3. Микроморфологические маркеры показали себя как чувствительные индикаторы процесса ледовой экзарации, выделяя до- и постэксарационные отложения, действие ледовой экзарации на отложения различного гранулометрического состава и в различных частях морфоскульптуры (осевая или бортовая зона ледово-эксарационной борозды).
4. Флуктуации уровня моря в ходе наступления позднелепистоцен-голоценовой

трансгрессии в исследуемой части акватории сопровождались изменениями береговой линии и карты течений, а, следовательно, размывом других участков дна в ходе транспортировки осадочного материала. Чувствительными индикаторами чередования относительно глубоко- и мелководных обстановок осадконакопления являются изменения гранулометрического и минерального состава, а также текстурных особенностей.

5. Неравномерное распределения ОВ по разрезу оказывает влияние на цветовые характеристики (флюидалные текстуры восточного типа, границы-хардграунды) и структурно-текстурные особенности (эффект псевдослоистости, флюидалные текстуры западного типа) осадочных отложений.

6. По результатам моделирования экспериментальных дифракционных картин во всех рассмотренных и регионально сгруппированных фазовых составах глин важную роль играет смешанослойная фаза, представляющая собой иллит-смектит с различными сочетаниями смектитовых и иллитовых слоев и обладающая высокой сорбционной способностью.

По всем исследованным параметрам прослеживается четкое разделение состава и строения осадочных отложений не только по ЛСК, но и на восточную и западную часть района исследований. В верхнем слое донных осадков Приновоземельской зоны выделена смена ледниковых, ледниково-морских и перигляциальных обстановок осадконакопления. Для Приямальской зоны наблюдаются изменения гранулометрического и минерального состава, вызванные изменениями уровня моря в ходе наступления позднеплейстоцен-голоценовой трансгрессии.

Микростроение осадка и его постседиментационные деформации в слабоконсолидированном верхнем слое на стадиях седиментогенеза и диагенеза являются чутким индикатором изменений среды различного генезиса, в том числе и под действием опасных природных процессов, обуславливающих неустойчивость грунтов. Диагностика смены генетических типов осадочных отложений с использованием микроморфологических признаков деформаций показала свою высокую информативность при реконструкции палеобстановок осадконакопления и действия рельефообразующих факторов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

Статьи в журналах, индексируемых в Web of Science и/или Scopus:

1. Сухих Е.А., Кокин О.В., Росляков А.Г., Ананьев Р.А., Архипов В.В. Литолого-минералогическая характеристика донных отложений в районах проявления ледовой экзарации в юго-западной части Карского моря // Литология и полезные ископаемые. 2024. – №2. – С. 143–162.

2. Никифоров С.Л., Сорохтин Н.О., Ананьев Р.А., Фриденберг А.И., Колубакин А.А., Мороз Е.А., Сухих Е.А., Маринова Ю.Г. Инженерно-геологические условия и новые данные о строении морского дна западной части Карского моря // Нефтяное хозяйство. – 2024. – № 11. – С. 14–18.

3. Кохан А.В., Мороз Е.А., Еременко Е.А., Денисова А.П., Ананьев Р.А., **Сухих Е.А.**, Никифоров С.Л., Соколов С.Ю., Разумовский А.А. Флюидогенный рельеф районов распространения многолетней мерзлоты на шельфе Печорского и Карского морей // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2023. – Т. 78. – № 3. – С. 104–124.

4. Соколов С.Ю., Мороз Е.А., Зарайская Ю.А., Абрамова А.С., Ананьев Р.А., **Сухих Е.А.** Картирование опасных геологических объектов и процессов северной и центральной частей шельфа Баренцева моря по данным гидроакустического комплекса НИС "Академик Николай Страхов" // Арктика: экология и экономика. – 2023. – Т. 13. – № 2. – С. 164–179.

5. Nikiforov S.L., Ananiev R.A., Jakobsson M., Moroz E.A., Sokolov S.Yu., Sorokhtin N.O., Dmitrevsky N.N., **Sukhikh E.A.**, Chickiryov I., Zarayskaya Yu., Razumovskiy A.A., Semiletov I.P. The Extent of Glaciation in the Pechora Sea, Eurasian Arctic Based on Submarine Glacial Landforms // Geosciences. – 2023. – V.13. – №53. doi: 10.3390/geosciences13020053

6. Никифоров С.Л., Сорохтин Н.О., Ананьев Р.А., Фриденберг А.И., Колубакин А.А., Мороз Е.А., **Сухих Е.А.**, Росляков А.Г. Рельеф дна и строение верхней осадочной толщи западной части шельфа Карского моря в районе формирования нефтегазовых месторождений // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 8. – С. 46–50.

7. Соколов С.Ю., Мороз Е.А., Агранов Г.Д., **Сухих Е.А.**, Ананьев Р.А., Разумовский А.А., Левченко О.В. Проявления дегазации в верхней части осадочного разреза Печорского моря и ее связь с тектоникой // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – Т. 499. – № 2. – С. 91–96.

8. Соколов С.Ю., Мороз Е.А., **Сухих Е.А.**, Разумовский А.А., Левченко О.В. Проявления глубинной дегазации в водной толще и верхней части разреза Печорского моря // Георесурсы. – 2019. – Т. 21. – № 4. – С. 68–76.

Статьи в других журналах, рекомендованных ВАК:

9. **Сухих Е.А.**, Чикирев И.В., Ананьев Р.А., Мороз Е.А., Мутовкин А.Д., Сорохтин Н.О., Соколов С.Ю. Структурно-текстурные особенности верхнего слоя донных осадков юго-западной части Карского моря // Мониторинг. Наука и технологии. – 2024. – № 1 (59). – С. 35–46.

10. **Сухих Е.А.**, Мороз Е.А., Абрамова А.С. Связь величин радиогенной теплогенерации в верхнем слое донных осадков с проявлениями дегазации в водной толще и осадочном чехле в южной части Баренцево-Карского региона // Мониторинг. Наука и технологии. – 2020. – № 3 (45). – С. 35–41

Другие публикации:

11. **Сухих Е.А.**, Денисова А.П., Ананьев Р.А., Росляков А.Г. Микроморфология осадков акустически прозрачных комплексов в Приновозмельском районе Баренцево-Карского шельфа / В сб.: Труды XIII Международной научно-практической «Морские исследования и образование (MARESEDU-2024)» Том IV (IV). – Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2025. – С. 58–62.

12. **Сухих Е.А.**, Ананьев Р.А., Мороз Е.А. Литологические особенности донных отложений юго-западной части Карского моря / В сб.: Труды XII Международной научно-практической

конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2023)» Том IV (IV). – Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2024. – С. 47–54.

13. **Сухих Е.А.**, Кокин О.В., Мороз Е.А. Микротекстуры донных осадков окраинных зон оледенения на примере восточного борта Восточно-Новоземельского желоба / В сб.: Материалы научно-практического форума, посвященного 270-летию МГУ имени М.В. Ломоносова «Современные вопросы литологии и морской геологии - 2024. Наука. Обучение. Практика». – М.: МАКС Пресс, 2024. – С. 222–225.

14. **Сухих Е.А.**, Кокин О.В., Росляков А.Г. Литолого-минералогические индикаторы гляциодинамического воздействия в донных отложениях районов проявления ледовой экзарации в юго-западной части Карского моря / В сб.: Геология морей и океанов. Материалы XXV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. – 2023. – С. 193–197.

15. Kokin O., Maznev S., Arkhipov V., Moroz E., **Sukhikh E.**, Ananiev R., Nikiforov S., Sorokhtin N., Vernyaev S. The distribution of maximum ice scour sizes by sea depth at the seabed of the Barents and Kara Seas / In: Proceedings of the 27th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, РОАС, 2023. – P. 1–10.

16. **Сухих Е.А.** Роль углеводородов в формировании литологической границы типа «хардгранд» в верхнем слое донных осадков в западной части Карского моря / В сб.: Пустоваловские чтения 2022. Материалы традиционной конференции, посвященной 120-летию Леонида Васильевича Пустовалова. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, 2022. – С. 142–144.

17. Денисова А.П., Мороз Е.А., **Сухих Е.А.**, Соколов С.Ю., Ермаков А.В., Ананьев Р.А. Признаки глубинной дегазации в верхней части осадочного чехла шельфа и водной толще Карского моря / В сб.: Геология морей и океанов. Материалы XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. – 2022. – С. 235–239.

18. Мороз Е.А., Еременко Е.А., Ворошилов Е.В., **Сухих Е.А.**, Зарайская Ю.А., Мутовкин А.Д. Ледниковый и водно-ледниковый рельеф шельфа Карского моря / В сб. Геология морей и океанов. Материалы XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. – 2022. – С. 290–294.

19. **Сухих Е.А.** Литолого-геохимические и структурные особенности верхней части осадочного чехла в южной части Баренцево-Карского региона / В сб.: Комплексные исследования Мирового океана. Материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых. – 2021. – С. 406–407.

20. **Сухих Е.А.** Радиогенная теплогенерация в верхнем слое донных осадков в южной части Баренцево-Карского региона / В сб.: Комплексные исследования Мирового океана. Материалы V Всероссийской научной конференции молодых ученых. – 2020. – С. 352–353.