

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Замотина Злата Сергеевна

**ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И
ПРОИСХОЖДЕНИЯ ПАЛЕОДОЛИН И
ПАЛЕОДЕПРЕССИЙ ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ
КАРСКОГО МОРЯ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ
И ДАННЫМ МНОГОЛУЧЕВОГО
ЭХОЛОТИРОВАНИЯ**

1.6.9. Геофизика (геолого-минералогические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена на кафедре сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: *Старовойтов Анатолий Васильевич*, кандидат геолого-минералогических наук, доцент

Официальные оппоненты: *Соколов Сергей Юрьевич*, доктор геолого-минералогических наук, ФГБУН Геологический институт РАН, лаборатория геоморфологии и тектоники океанов, заведующий, главный научный сотрудник

Сорокин Валентин Михайлович, доктор геолого-минералогических наук, доцент, ФГБОУ ВО МГУ имени М.В. Ломоносова, лаборатория морской геологии, кафедра нефтегазовой седиментологии и морской геологии, профессор

Баранов Борис Викторович, кандидат геолого-минералогических наук, ФГБУН Институт океанологии им. П.П. Ширинова РАН, лаборатория опасных геологических процессов, руководитель лаборатории, ведущий научный сотрудник

Защита диссертации состоится «4» октября 2024 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.6 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, Главное здание МГУ, сектор «А», аудитория 415.

E-mail: dsmsu0403@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3091>

Автореферат разослан «__» сентября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.016.6
кандидат технических наук

К.М. Кузнецов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Проблема изучения палеодолин и палеодепрессий в условиях арктического шельфа представляет особый интерес для современных исследователей по двум основным причинам. Первая из них обусловлена высокими темпами освоения континентальных шельфов арктического региона в связи с его богатым нефтегазоносным потенциалом (до 30% объёма мировой добычи углеводородов сосредоточено в его пределах) и необходимостью получения достоверных сведений об инженерно-геологических условиях в верхней части разреза (до 1000 м от дна). К таким сведениям относятся данные о геологических опасностях, в частности, о слабых грунтах, выполняющих палеодолины и палеодепрессии (Колубакин и др., 2017; Миرونюк и др., 2015; Росляков и др., 2018).

Вторая причина обусловлена стремлением к решению фундаментальной научной проблемы морской геологии, а именно – изучению современных процессов на дне океана и строения осадочного слоя, слагающего его, а также седиментационных комплексов, залегающих под ним, восстановлению последовательности и условий их формирования. Все аспекты этой проблемы затрагивают важные вопросы палеогеографии морских регионов, к наименее изученным из которых относится юго-западная часть шельфа Карского моря.

Наибольший интерес для исследования представляет слабо изученный и относительно молодой в геологическом масштабе времени плиоцен-четвертичный период. Сведений об условиях формирования отложений в этот временной интервал геологического времени крайне мало, что обусловлено, в первую очередь, малым объёмом данных прямых методов исследований, в частности результатов бурения. Бурение обеспечивает информацию как о вещественном составе осадков, так и об их возрасте, что имеет первостепенное значение для понимания палеогеографии изучаемого региона. Кроме того, на сегодняшний день большая часть региональных исследований, посвященных проблеме изучения палеодолин и палеодепрессий, заполненных плиоцен-четвертичными отложениями, в юго-западной части Карского шельфа, основана на гидрографических материалах, в частности морских навигационных картах, не являющихся аналогом топографических. Также рассмотрены редкие профили непрерывного сейсмоакустического профилирования. Перечисленных данных недостаточно для формирования полноценных выводов.

В основе данной работы заложен комплексный анализ мультиспектральных сейсмических и гидроакустических данных, а также всех доступных данных о геологии района работ, включая материалы инженерно-геологического бурения. Такой набор методов позволяет существенно уточнить строение верхней части разреза и идентифицировать отрицательные формы рельефа с разной детальностью, что крайне важно для понимания истории развития и становления современного рельефа и строения верхней части геологического разреза в юго-западной части Карского шельфа.

Степень разработанности темы исследования

Вопросом изучения палеодолин и палеодепрессий юго-западной части Карского моря занимались Ф. Нансен (Nansen, 1920), Н.Н. Куликов, В.Т. Мартынов (Куликов, Мартынов, 1961), А.Н. Ласточкин (Ласточкин, 1977; Ласточкин, 1984), Б.Г. Федоров (Ласточкин, Федоров, 1978), В.Ю. Бирюков, В.А. Совершаев (Бирюков, Совершаев, 1985; Бирюков и др., 2008), Е.Е. Мусатов (Мусатов, 1987; Мусатов, 1998), Н.Н. Дунаев (Дунаев и др., 1995), В.П. Мельников, В.И. Спесивцев (Инженерно-геологические..., 1995), Д.А. Костин (Костин, 1998), Л. Поляк (Polyak et al., 2000), R. Stein (Stein et al., 2002; Stein et al., 2004); В.Г. Гайнанов (Гайнанов и др., 2005); М.Л. Верба (Верба, 2007); С.И. Рокос (Рокос, 2009). К наиболее современным публикациям по данной теме относятся работы (Миронюк, Иванова, 2018; Portnov et al., 2018; Montelli et. al., 2019; Мороз и др., 2019; Ворошилов и др., 2021; Еременко и др., 2021; Рыбалко и др., 2020; Кохан и др., 2023; Токарев и др., 2023; Varanov et. al., 2023), но они касаются небольших участков по площади и не имеют регионального характера.

В рамках диссертации выполнен комплексный анализ большого набора геолого-геофизических данных, который ранее не проводился на территории юго-западной части Карского моря с целью детального исследования особенностей строения и происхождения палеодолин и палеодепрессий. Региональными исследованиями подобного масштаба занимались А.Н. Ласточкин (Ласточкин, 1977), Е.Е. Мусатов (Мусатов, 1987), М.Л. Верба (Верба и др., 2007), А.Ю. Мирошников с соавторами (Мирошников и др., 2021), однако их исследования базировались в основном на результатах гидрографических работ и редких профилях непрерывного сейсмоакустического профилирования, что является недостаточным для формирования представлений о строении верхней части разреза юго-западного шельфа Карского моря, а также истории развития и становления его современного рельефа.

Цель работы — обнаружение палеодепрессий и палеодолин, выявление их пространственного положения и особенностей внутреннего строения, уточнение предполагаемого генезиса по сейсмическим данным и данным многолучевого эхолотирования в юго-западной части Карского моря.

Основные задачи:

- Анализ региональной геологической информации района работ.
- Изучение морфологических особенностей рельефа морского дна.
- Сейсмостратиграфический анализ результатов сейсмоакустических наблюдений.
- Выделение палеодепрессий и палеодолин по характерным сейсмическим признакам, прослеживание их пространственного положения.
- Изучение внутреннего строения палеодепрессий и палеодолин, включая анализ формы поперечного сечения и тальвега, морфометрических параметров, структуры и мощности выполняющих осадков. Определение предполагаемого генезиса.
- Уточнение палеогеографических обстановок района исследований.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования настоящей работы являются палеодолины и палеодепрессии юго-западной части Карского моря. Предметом исследования – особенности их внутреннего строения, пространственного положения и происхождения.

Научная новизна работы

Впервые применен комплекс мультимастотных сейсмических и гидроакустических исследований, включающих 2D/3D сейсморазведку стандартного разрешения (СР), высокого разрешения (СВР) и сверхвысокого разрешения (ССВР), акустического профилирования (АПр) и многолучевого эхолотирования (МЛЭ) для идентификации палеодолин и палеодепрессий, выявления их пространственного положения, особенностей внутреннего строения и уточнения предполагаемого генезиса. На основе проведенного исследования впервые обосновано выделение трёх разновозрастных генераций палеодолин, дано их морфологическое описание (форма поперечного и продольного профилей), выявлены особенности их осадочного выполнения, установлены морфометрические параметры (ширина, протяженность, мощность осадков) и процессы, влияющие на их

формирование. Получены новые сведения о морфологии, генезисе, времени формирования палеодепрессий в юго-западной части Карского моря.

Теоретическая и практическая значимость работы

Полученные сведения об особенностях строения и происхождения палеодолин и палеодепрессий являются частью решения фундаментальной проблемы морской геологии, связанной с уточнением строения комплекса плиоцен-четвертичных отложений, слагающих верхнюю часть разреза морского бассейна юго-западной части Карского моря, а также палеогеографических обстановок его формирования.

Результаты идентификации пространственного и глубинного положения палеодолин и палеодепрессий в ВЧР, а также анализа особенностей их осадочного выполнения представляют ценные сведения для компаний, занимающихся строительством инженерных и нефтяных сооружений в условиях арктического шельфа. Полученные результаты могут быть использованы для учета возможных геологических рисков при проектировании сооружений нефтегазового комплекса и безопасного проведения буровых работ в юго-западной части шельфа Карского моря.

Важным практическим аспектом проведенного исследования является разработка методики эффективной идентификации палеодолин и палеодепрессий, а также получения их характеристик, включая морфометрические параметры и особенности внутреннего строения. Предложенный подход может быть использован для решения задач по определению геологических опасностей, представленных слабыми грунтами, выполняющими палеодолины и палеодепрессии, при освоении континентального шельфа в других регионах Арктики.

Методология и методы исследования

Комплекс методов, использованных в данной работе, включал в себя 2D/3D сейсморазведку стандартного разрешения метода отраженных волн в модификации общей глубинной точки (МОВ-ОГТ), проведенную в разные годы, начиная с 1990 г. Площадь покрытия данными стандартной сейсморазведки в пределах полигона исследований составила 300 000 км².

Сейсмоакустические исследования были представлены 2D сейсморазведкой высокого разрешения и сверхвысокого разрешения и доступны на двенадцати детальных площадках инженерно-геологических изысканий (ИГИ). Кроме того, на этих площадках были доступны материалы акустического профилирования, многолучевого

эхологирования и инженерно-геологического бурения. Суммарная площадь покрытия данными детальными исследованиями методами СВР, ССВР, АПр и МЛЭ составила 2000 км². Дополнительно были рассмотрены данные НСП 2002-2004 гг., полученные в рамках государственного геологического картирования (Васильев и др., 2013).

Весь имеющийся набор данных был подробно проанализирован в несколько этапов. Первый этап работы заключался в анализе особенностей донного рельефа на основе батиметрии GEBCO (Jakobsson et al., 2020) и цифровых моделей рельефа дна по данным МЛЭ. На втором этапе был проведен сеймостратиграфический анализ данных 2D/3D СВР, который включал в себя выделение сейсмических комплексов (СК) по результатам анализа волновой картины - наличию несогласных отражающих поверхностей в их кровле и подошве.

На третьем этапе были проанализированы материалы сейсмоакустических и гидроакустических исследований (2D СВР, 2D ССВР, АПр) с целью детального изучения верхней части разреза: до нескольких сотен метров от дна. В результате в ВЧР были выделены сейсмические подкомплексы. Стратиграфическая привязка СК выполнена с учетом имеющихся фондовых данных о геологии и сеймостратиграфии района (Государственная..., 2004; Зархидзе, 2022; Шипилов, Шкарубо, 2010, Шишкин и др., 2012). В рамках комплексного анализа привлекались данные инженерно-геологического бурения, в частности, литологическое описание образцов керна.

Следующий этап работы заключался в выделении палеодолин и палеодепрессий по всем имеющимся данным на основе следующих сейсмических признаков: характерной формы поперечного сечения, наличия углового несогласия в их бортовых частях и днище, линейной или изометричной формы в плане. Все выявленные отрицательные формы рельефа были охарактеризованы с точки зрения особенностей их осадочного выполнения, строения поперечного профиля, тальвега (для палеодолин) и морфометрических параметров. Дополнительно для характеристики осадочного выполнения палеодолин выполнялись расчет и анализ сейсмических атрибутов, а также скоростей продольных волн. Полученная характеристика отрицательных форм палеорельефа в совокупности с имеющимися сведениями о геологии региона Карского моря являлись основой для определения их предполагаемого генезиса.

Методы 2D СВР, 2D ССВР, АПр, МЛЭ также использовались для детального изучения приповерхностного интервала разреза, поверхности морского дна и идентификации эрозионных форм с малой

(несколько десятков метров, иногда не более первых метров) мощностью осадочного выполнения.

Сейсмостратиграфическая интерпретация и динамический анализ сейсмических данных выполнены в специализированном программном обеспечении ПО «IHS Kingdom». Особенности рельефа морского дна анализировались в ПО «Global Mapper». Скоростной анализ по данным до суммирования 2D CP и 2D CBP MOB-ОГТ проводился в ПО «SeisPro».

Защищаемые положения

1. Палеодолины трёх генераций, впервые выделенных и обоснованных в юго-западной части Карского моря, формировались при участии флювиальных, флювиогляциальных и экзарационных процессов. Образование палеодолин происходило до- и в начале ермаковского времени (первая генерация), со второй половины ермаковского времени до середины каргинского межледниковья (вторая генерация) и в период сартанского времени (третья генерация). Термокарстовые палеодепрессии, впервые обнаруженные в районе Ямало-Гыданской отмели и Западно-Карской ступени, сформировались в последний послеледниковый этап позднего неоплейстоцена-голоцена.
2. Форма поперечного профиля, впервые определенная для трёх генераций палеодолин, делится на U-образную (70% - для первой генерации, 60% - для второй генерации, 80% - для третьей генерации), V-образную (25% - для первой генерации, 40% - для второй генерации, 20% - для третьей генерации), террасированную (5% - для первой генерации) в юго-западной части Карского моря.
3. Впервые обнаруженная перестройка палеосети периода каргинского межледниковья выражается в изменении направления, в котором вытянуты палеодолины: с северо-западного и северо-северо-западного (для первой генерации) на юго-западное (для второй и третьей генераций) в юго-западной части шельфа Карского моря.
4. В районе Западно-Карской ступени и Ямало-Гыданской отмели распространены палеодолины, для которых впервые идентифицированы характерные для многолетнемерзлых грунтов сейсмические признаки.

Степень достоверности полученных результатов

Совместный анализ представительного набора данных, включающий в себя материалы 2D/3D сейсморазведки стандартного

разрешения, высокого разрешения, сверхвысокого разрешения, акустического профилирования, многолучевого эхолотирования, а также инженерно-геологического бурения и доступных сведений о геологии района работ, обеспечивает высокую достоверность полученных результатов.

Публикации и апробация работы

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались на международных конференциях и в ходе научно-практических семинаров: XI Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование» («MARESEDU – 2022») (Москва, 2022), 9-ой ежегодной международной конференции «Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России» (Санкт-Петербург, 2022), 65-ой Всероссийской научной конференции МФТИ (Москва, 2023), 4-ой научно-практической конференции «Морские технологии 2023» (Санкт-Петербург, 2023), XXV Международной научной конференции (Школе) по морской геологии «Геология морей и океанов» (Москва, 2023), 10-ой ежегодной международной конференции по результатам экспедиционных исследований (Санкт-Петербург, 2023), VII Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия – 2024. Геологоразведочные технологии – наука и бизнес» (Москва, 2024), в Цикле семинаров «Современные проблемы геофизики и рудной геологии» - часть 47 (Москва, 2024).

По теме диссертации опубликовано 6 работ, включая 3 статьи в изданиях, рекомендованных для защиты в МГУ, а также тезисы докладов в сборниках трудов, индексируемых в РИНЦ. В работах, опубликованных в соавторстве, основополагающий вклад принадлежит соискателю.

Личный вклад автора

Автор лично занимался анализом всего имеющегося фактического материала, выполнял сейсмостратиграфическую интерпретацию, выделял палеодолины и палеодепрессии, анализировал их морфологические и морфометрические параметры, структуру и мощность выполняющих осадков, а также их динамические и скоростные характеристики. На основании проведенной работы при участии автора уточнен предполагаемый генезис палеодолин и палеодепрессий и сделаны выводы о палеогеографии района исследований.

Объём и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав и заключения. Общий объём работы составляет 167 страниц, в том числе 74 рисунка и 6 таблиц. Список литературных источников содержит 135 наименований.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю Анатолию Васильевичу Старовойтову за всестороннюю поддержку, помощь и советы на всех этапах диссертационного исследования. Автор глубоко признателен Михаилу Юрьевичу Токареву за предоставление возможности работы с большим количеством уникального материала, который лег в основу данного исследования. Автор благодарен А.Е. Рыбалко, А.Г. Рослякову, Т.Ю. Репкиной, В.Е. Тумскому, С.Г. Миронюку, Я.Е. Терёхиной, О.А. Хлебниковой, М.А. Соловьевой, А.О. Аксёнову, А.С. Пироговой, Е.В. Щербаковой за помощь и советы на разных этапах диссертационного исследования. Автор благодарен А.И. Понимаскину, А.М. Хачатрян, А.Д. Яковенко за обработку данных и помощь при выполнении детального скоростного анализа. Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры сейсмометрии и геоакустики за знания и навыки, приобретенные за годы обучения в университете. Автор благодарит своих близких за заботу и поддержку на пути постижения науки.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** изложены актуальность, степень разработанности, цели и задачи исследования, указаны объект и предмет исследований, теоретическая и практическая значимость, научная новизна, методология и методы исследования, степень достоверности, личный вклад, информация о научных публикациях, а также сформулированы основные защищаемые положения.

Глава 1. Современное состояние вопроса

Глава 1 разделена на два подраздела, в **первом** из которых (**1.1**) рассматриваются основные взгляды на проблему формирования палеодолин и палеодепрессий в юго-западной части Карского моря. Во **втором разделе** (**1.2**) изложены основные концепции эволюции Баренцево-Карского шельфа. В конце раздела **1.2** описана роль четвертичных оледенений в формировании палеодолин и палеодепрессий.

Глава 2. Общие сведения о районе работ

В разделе 2.1 приведены физико-географические условия района работ, включая рельеф морского дна с описанием основных орографических элементов: Восточно-Новоземельского желоба, Западно-Карской ступени, Ямало-Гыданской отмели и др. (Рис. 1) (подраздел 2.1.1).

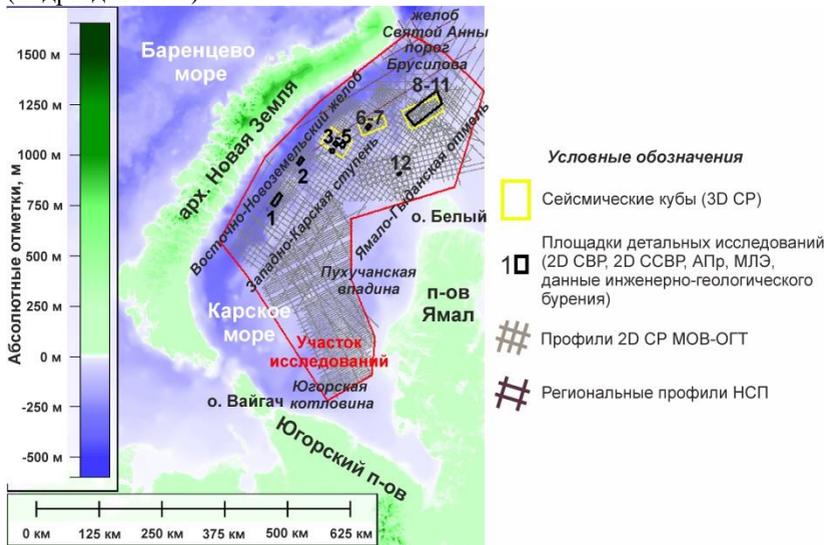


Рис. 1 Схема расположения участка исследований и фактического материала

В подразделах 2.1.2 – 2.1.4 описаны климатические и геокриологические условия района работ, а также течения и современные реки, впадающие в юго-западную часть Карского моря.

В разделе 2.2 приведены сведения о геологическом строении района исследований, который является акваториальным продолжением Западно-Сибирской плиты. Осадочный чехол плиты сложен преимущественно мезозойскими осадочными комплексами. В его основании залегает разновозрастный дислоцированный и частично метаморфизованный палеозойский фундамент (Ступакова и др., 2017).

Подразделы 2.2.1 - 2.2.2 содержат литолого-стратиграфическую характеристику от нижнемелового до четвертичного интервалов разреза, а также информацию о тектоническом строении и истории геологического развития района исследований.

Глава 3. Использованные данные. Методика полевых работ

В главе 3 приведено описание данных, использованных в ходе диссертационного исследования. Кратко описана методика их получения, параметры наблюдений, а также особенности обработки. Ниже приведены основные характеристики данных (Таблица 1).

Таблица 1 – Основные характеристики сейсмических и гидроакустических данных, использованных в работе

Метод	Диапазон рабочих частот // Диапазон доминантных частот	Вертикальная разрешающая способность // Глубинность
Стандартная сейморазведка (2D/3D СР)	5 – 70 Гц // 20 – 30 Гц	15 – 50 м // более 1000 м
Сейморазведка высокого разрешения (2D СВР)	10 – 140 Гц // 30 – 60 Гц	5 – 15 м // до 1000 м
Сейморазведка сверхвысокого разрешения (2D ССВР)	100 – 700 Гц // 220 – 350 Гц	1 – 3 м // до 300 м
Акустическое профилирование (АПр)	1500 – 8000 Гц	0.5 – 1 м // до 10 м
Многолучевое эхолотирование (МЛЭ)	200 – 400 кГц	–

Глава 4. Морфологические особенности рельефа морского дна

Глава 4 содержит два раздела, в первом из которых (4.1) описана методика изучения особенностей рельефа морского дна по данным МЛЭ, АПр, 2D ССВР. Составление характеристики обнаруженных форм рельефа проводилось с запада на восток: от Восточно-Новоземельского желоба к Ямало-Гыданской отмели.

В разделе 4.2 представлены результаты анализа рельефа морского дна на детальных площадках исследований. В районе Восточно-Новоземельского желоба выделены комплексы форм рельефа, характерные для ледниковых равнин, в том числе мегамасштабная ледниковая штриховка и морены Де Гира (Рис. 2, А,

Б). В восточном направлении от желоба, в области Западно-Карской ступени, идентифицированы формы рельефа, обусловленные криогенными и гравитационными процессами, например, пингообразные структуры и оползни (Рис. 2, В). В районе Ямало-Гыданской отмели выявлены формы рельефа, характерные для субаральных условий осадконакопления (пингообразные структуры и отрицательные формы рельефа разного генезиса) (Рис. 2, Г).

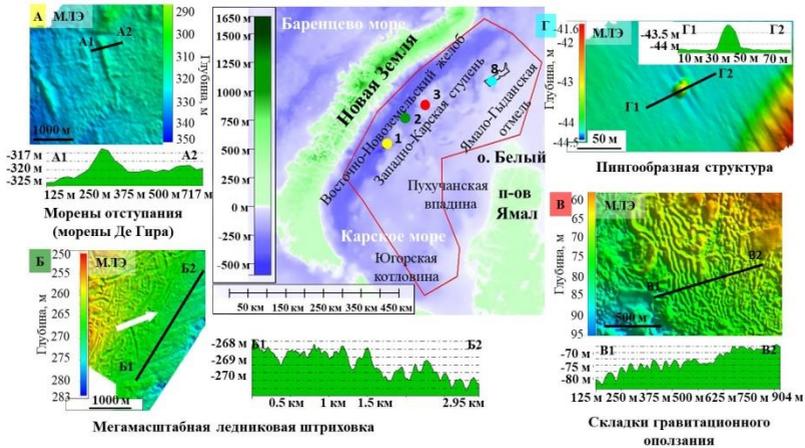


Рис. 2 Примеры форм рельефа, выделенных по данным МЛЭ в пределах участков №1, 2, №3 и №8. Чёрные линии соответствуют положениям профилей рельефа (А1А2, Б1Б2, В1В2, Г1Г2)

Глава 5. Строение верхней части разреза

В разделе 5.1 описана методика сейсмостратиграфического анализа данных 2D СР, 2D СВР, 2D ССВР, АПр для изучения верхней части разреза. В разделе 5.2 показаны результаты анализа дочетвертичного (5.2.1) и плиоцен-четвертичного (5.2.2) интервалов разреза.

По данным 2D СР и 2D СВР установлена закономерность в строении дочетвертичного разреза: в районе Восточно-Новоземельского желоба отсутствуют палеогеновые отложения, которые перекрывают верхнемеловые комплексы в области Западно-Карской ступени и Ямало-Гыданской отмели.

Более высокоразрешающие сейсмические данные позволили детально проанализировать плиоцен-четвертичный интервал разреза, в частности обнаружить картировочные признаки залегания ледниковых отложений в пределах Восточно-Новоземельского желоба и в сопоставлении с данными инженерно-геологического бурения

предположить их ледниковый генезис. Также проведена стратификация морских позднеоценовых отложений в районе Ямало-Гыданской отмели с мощностью осадков не более 20 м. При совместном рассмотрении высокоразрешающих данных и материалов 2D СР выделены сейсмокомплексы, представленные гравитационными (оползневыми) отложениями. В районе Западно-Карской ступени идентифицирован сейсмокомплекс с проградационным строением, который предположительно сформировался в субаквальных условиях на продолжении рек и временных потоков, распространявшихся с палеосуши.

В заключение пятой главы важно отметить, что изучение особенностей строения плиоцен-четвертичного интервала разреза в совокупности с выявлением комплексов форм рельефа различного генезиса позволило выделить три области: перигляциальную (распространения субаэрального рельефа), переходную (распространения приледниковых эрозионных форм и аккумулятивных тел и флювиальных конусов выноса), гляциальную (преобладания денудационных, в том числе экзарационных и эрозионных, процессов), а также уточнить границу максимального распространения сартанского оледенения (МИС-2) в юго-западной части Карского шельфа. Результаты палеорекострукции были включены в одну из статей автора диссертации¹. Определение положения границы МИС-2 играет важную роль в уточнении генезиса палеодолин и палеодепрессий и палеогеографии региона в позднем неоплейстоцене.

Глава 6. Палеодолины и палеодепрессии

Глава 6 содержит три раздела: 6.1, 6.2, 6.3. В разделе 6.1 приведены определения терминов «палеодолина» и «палеодепрессия», а также описаны их классификации на основе опубликованных данных (Щукин, 1960; Andersen, 2012; Recant et. al., 2015).

В разделе 6.2 приведена методика изучения палеодолин и палеодепрессий, описан подход к анализу их морфологических особенностей (формы поперечного сечения и формы продольного

¹ **Замотина З.С.**, Хлебникова О.А., Терёхина Я.Е., Росляков А.Г., Репкина Т.Ю., Рыбалко А.Е., Колюбакин А.А. Определение границы максимального распространения последнего оледенения по данным сейсмоакустики и многолучевого эхолотирования (юго-западная часть Карского моря) // Геофизика. 2023. №2. С. 29-39. 0.69 п.л., авторский вклад 60%. DOI: 10.34926/geo.2023.82.15.004. ИФ РИНЦ 0,4.

профиля) и морфометрических параметров (ширины, длины, протяженности, углов наклона бортов) (6.2.1), а также методика расчета атрибутов волнового поля (6.2.2) и определения скоростей продольных волн (6.2.3).

Подраздел 6.2.4 содержит описание принципа деления палеодолин на генерации, который основан на выделении совокупности древних долин, сформировавшихся одновременно, в один и тот же этап развития рельефа (Назаров и др., 2015). На рисунке, приведенном ниже (Рис. 3), показан пример выделения палеодолин двух генераций. Осадочное выполнение крупной палеодолины нарушено залеганием более мелких эрозионных форм, сформировавшихся на более позднем этапе. Такие формы были прослежены в пространстве и отнесены к палеодолинам второй генерации. Как видно из примера, помимо эрозионных форм внутри палеодолины первой генерации, наблюдаются отдельные врезы вне её. Видно, что они имеют примерно такую же глубину врезания, как и палеодолины второй генерации. Таким образом, учитывая, что их борта выходят на единую для всего региона поверхность верхнего регионального углового несогласия (ОГ URU или ОГ D_2), которая в данном случае совпадает с поверхностью морского дна, можно заключить, что они были сформированы в одно время с палеодолинами второй генерации. Такой принцип выделения генераций палеодолин использовался для всего района исследований. Всего в пределах участка исследований было выделено три генерации палеодолин, маркирующих три регрессивных этапа четвертичного времени.

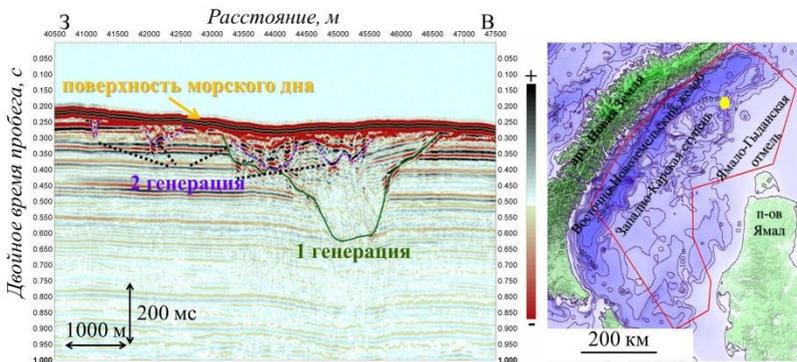


Рис. 3 Пример выделения палеодолин двух генераций. На врезке жёлтой точкой показано положение сейсмического профиля

В разделе 6.3 описаны основные результаты изучения палеодолин и палеодепрессий. Подраздел 6.3.1 посвящен рассмотрению палеодолин первой генерации, к которым были отнесены наиболее крупные (с наибольшей глубиной врезания) и хорошо прослеживаемые по данным 2D СР МОВ-ОГТ отрицательные формы рельефа. Большая часть палеодолин первой генерации обладает сложным строением осадочного выполнения, представленного двумя сейсмодопкомплексами: СК1.2 и СК1.1. На рисунке ниже (Рис. 4) показан пример выделения погребенной долины по данным 2D СР в районе Восточно-Новоземельского желоба.

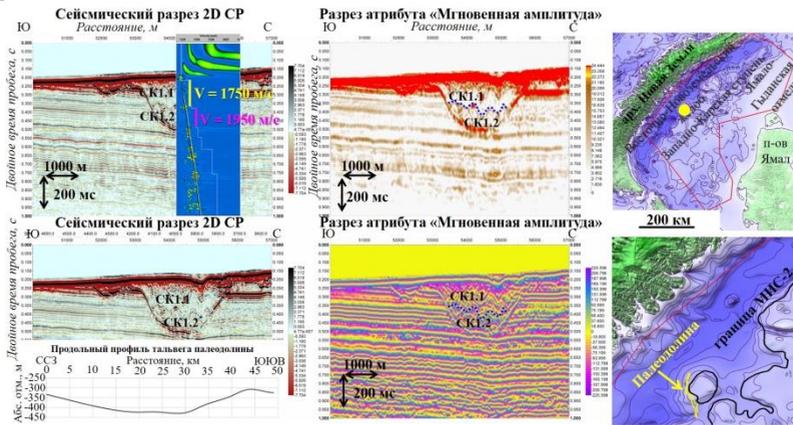


Рис. 4 Пример ледниковой палеодолины, выделенной по данным 2D СР в районе Восточно-Новоземельского желоба. На врезке жёлтой точкой показано положение сейсмического профиля

СК 1.2 характеризуется хаотической волновой картиной, повышенными значениями атрибута «Мгновенная амплитуда», неровной кровлей и скоростью продольных волн (V_p), равной 1950 ± 50 м/с. СК 1.1 обладает низкоамплитудным и параллельно-слоистым типом сейсмической записи, с пониженными значениями атрибута «Мгновенная амплитуда». Скорость продольных волн (V_p) в этом интервале составляет 1750 ± 50 м/с. На разрезе атрибута «Мгновенная фаза» отчетливо отделяется СК 1.1 от СК 1.2 вдоль поверхности неровной конфигурации. Ширина палеодолины составляет от 1.5 до 2 км, её протяженность – 50 км. Средняя мощность её осадочного выполнения составляет 210 м (при скорости V_p – 1800 м/с). Форма поперечного сечения этой структуры является U-образной, углы наклона на одном из бортов достигают 35° . Тальвег палеодолины неровный, причем максимальные абсолютные отметки глубин (до -

430 м) наблюдаются в его центральной части. Все указанные признаки, а также приуроченность палеодолины к поднятию в рельефе поверхности верхнего регионального углового несогласия (URU), свидетельствуют о том, что генезис этой формы не связан с флювиальными процессами. По своим морфологическим и морфометрическим параметрам выделенная палеодолина имеет характерные признаки туннельных (подледниковых) долин. Это косвенно подтверждается оценками скоростей продольных волн в СК 1.2 и в СК 1.1, которые совпадают с результатами скоростного анализа, полученными зарубежными исследователями в туннельных палеодолинах на суше в Дании (Halvorsen, 2012). Согласно интерпретации датских исследователей, скорости Р-волн, равные $1750 \text{ м/с} \pm 100 \text{ м/с}$, соответствуют интервалу осадочного выполнения палеодолин, сложенному тальми песками, гравием и ледниково-морскими отложениями. Значения скоростей продольных волн, равные $2150 \pm 100 \text{ м/с}$, характерны для ледниковых отложений, представленных валунной глиной.

Кроме того, форма продольного профиля выделенной палеодолины имеет сходство со строением тальвегов туннельных палеодолин, обнаруженных в центральной части Баренцева моря (Esteves et. al., 2017, p. 139). В целом, положение палеодолины в условиях гляциальной зоны, предполагаемой в этом районе в разные периоды четвертичного времени рядом исследователей (Замотина и др., 2023б; Nazarov et. al., 2022; Svendsen et. al., 2004), а также северо-западное направление, в котором она вытянута, в совокупности со всеми перечисленными признаками, указывает на её формирование под воздействием ледниковых процессов.

На севере Восточно-Новоземельского желоба выделены палеодолины с V- и U-образными формами поперечного сечения. Генезис выявленных отрицательных форм, с учетом их морфологии и особенностей залегания в разрезе, определен как ледниковый (флювиогляциальный). Одним из важных критериев является наличие резких перепадов в строении продольных профилей, которые имеют общие черты с поведением тальвегов туннельных палеодолин, известных на шельфе Северного моря (Stewart et. al., 2013).

В районе Западно-Карской ступени и Ямало-Гыданской отмели обнаружены палеодолины, для которых характерны: акустически прозрачная и хаотическая сейсмическая запись в интервале их осадочного выполнения, обратная полярность относительно донного отражения в их подошве, «положительный» скоростной эффект, а также интервальные скорости продольных волн, равные $2000\text{-}2100 \text{ м/с}$

(Рис. 5). Совокупность перечисленных признаков, а также расположение палеодолин в перигляциальных условиях сартанской эпохи (Замотина и др., 2023б), указывает на наличие мёрзлых грунтов в отложениях, выполняющих палеодолины. Косвенно это подтверждается полученными результатами скоростного анализа, которые совпадают с оценками скоростей продольных волн в интервале мерзлых отложений внутри палеодолин в море Лаптевых (Колубакин и др., 2017).

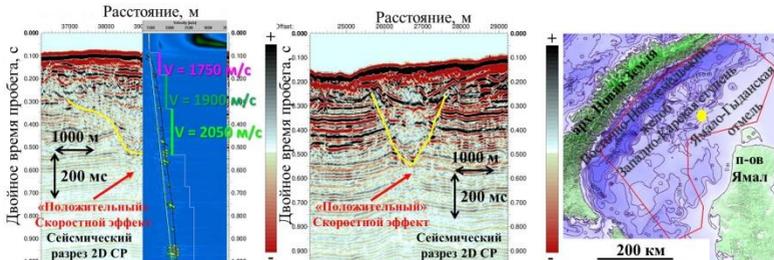


Рис. 5 Пример палеодолины с признаками ММГ, выделенной по данным 2D СР в районе Ямало-Гыданской отмели

В результате картирования палеодолин первой генерации было установлено, что из 49 палеодолин 35 обладают U-образной формой поперечного сечения, что составляет 70% от общего числа. 2 палеодолины имеют террасированную форму поперечного профиля, что соответствует 5%. Количество V-образных палеодолин первой генерации на территории исследования составляет 25%. Мощность осадков изменяется от 110 до 430 м. Максимальная протяженность составляет 100 км.

На основе сопоставления результатов детального изучения палеодолин первой генерации с литолого-стратиграфической схемой (Nazarov et al., 2022) была определена верхняя временная граница их формирования – начало ермаковского (нижнезырянского) горизонта позднего неоплейстоцена.

В подразделе 6.3.2 изложены сведения о палеодолинах второй генерации. К ним были отнесены отрицательные формы рельефа, характеризующиеся в среднем меньшей глубиной врезания (до 150 м) и меньшей протяженностью (в среднем 20-30 км) по сравнению с палеодолинами первой генерации (Рис. 6). Для большинства из них

генезис был определен как флювиогляциальный². Об этом свидетельствуют неровные тальвеги, особенности залегания выполняющих их отложений, а также преобладание U-образных форм (60%). Также встречены палеодолины с постепенно погружающимися тальвегами в юго-западном направлении, что, с одной стороны, позволило связать их формирование с флювиальными процессами, и с другой стороны, выявить перестройку палеосети. Анализ литолого-стратиграфической схемы (Nazarov et. al., 2022) в совокупности с результатами изучения палеодолин второй генерации позволил установить время их образования со второй половины ермаковского (нижнезырянского) времени до середины каргинского межледниковья.

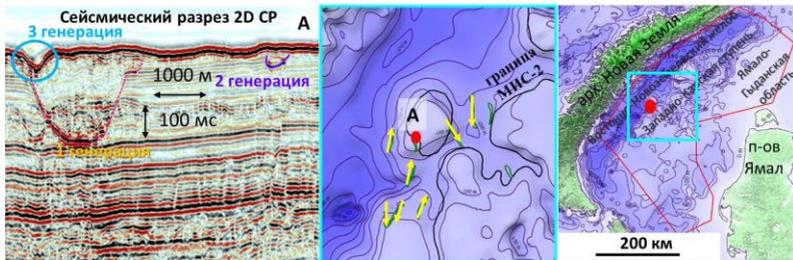


Рис. 6 Пример палеодолин 1, 2, 3 генераций в районе Восточно-Новоземельского желоба. Тёмно-зеленые контуры на центральном рисунке ограничивают палеодолины второй генерации. Желтые стрелки показывают наклоны тальвегов

В подразделе 6.3.3 показаны примеры выделения палеодолин третьей генерации, к которым были отнесены самые молодые палеодолины, сформированные на этапе максимальной регрессии сартанского (позднезырянского) времени, о чем свидетельствует хорошая сохранность этих форм в рельефе, а также образование на окончании этих форм относительно молодых аккумулятивных образований. Такая интерпретация не противоречит существующим палеогеографическим схемам (Nazarov et. al., 2022; Svendsen et. al., 2004; Hughes et. al., 2016). Большая часть палеодолин третьей генерации обладает U-образной формой поперечного сечения, а также мощностью осадочного выполнения не более 50 м.

² **Замогина З.С.**, Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., Терёхина Я.Е., Колюбакин А.А., Гончарова А.М. Палеодолины и палеодепрессии Восточно-Приновоземельского района Карского моря // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2023. №2. С. 117-127. 0.69 п.л., авторский вклад 60%. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-2-117-127. ИФ РИНЦ 0,38.

Согласно полученным оценкам, в пределах полигона исследований выявлено 80% U-образных и 20% V-образных палеодолин, Протяженность выявленных форм не превышает 50 км.

Подраздел 6.3.4 посвящен результатам анализа сейсмоакустических и гидроакустических данных на детальных площадках исследований (№3-5, №8-11) (Рис. 1), в пределах которых выявлены нелинейные, изометричные, погребенные и выраженные в рельефе дна формы рельефа при современных глубинах воды менее 100 м (Рис. 7). Морфологические особенности, присутствие пингообразных структур в их пределах, а также географическое расположение в условиях перигляциальной зоны сартанской эпохи (Замотина и др., 2023б) позволило установить их формирование в результате термокарста.

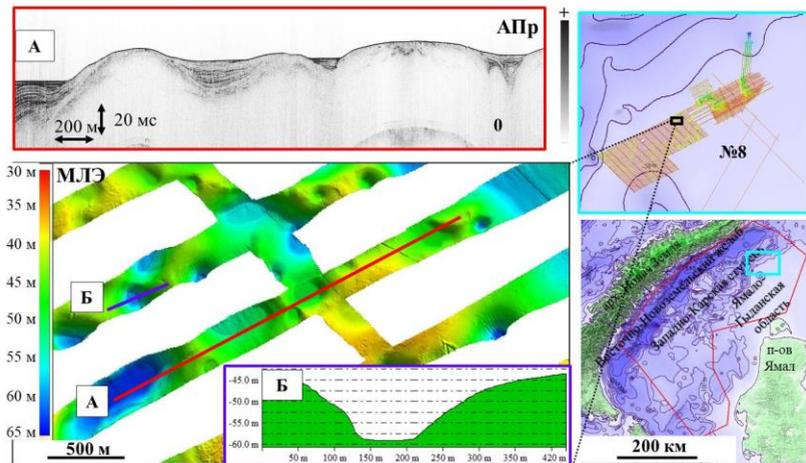


Рис. 7 Термокарстовые палеодепрессии, выделенные по данным АПр и МЛТ в районе Ямало-Гыданской отмели

В подразделе 6.3.5 представлены схемы сопоставления результатов картирования палеодолин и палеодепрессий с палеогеоморфологической схемой А.Н. Ласточкина (Ласточкин, 1984) (Рис. 8), а также с границами распространения покровных оледенений позднего неоплейстоцена (Рис. 9).

Предлагаемая схема расположения палеодолин трёх генераций и палеодепрессий в отличие от ранее изданной схемы А.Н. Ласточкина отражает их пространственное положение, свидетельствует о трёх

регрессивных этапах позднего неоплейстоцена и характеризуется более высокой детальностью³.

Подробное изучение морфологических особенностей и морфометрических параметров палеодолин и палеодепрессий в сопоставлении с границами максимального распространения оледенений позднего неоплейстоцена по данным разных исследователей (Hughes et al., 2016; Nazarov et al., 2022) позволило выявить существенное влияние флювиогляциальных, экзарационных и посткриогенных процессов на строение выявленных форм в районе исследований, о котором ранее не было известно.

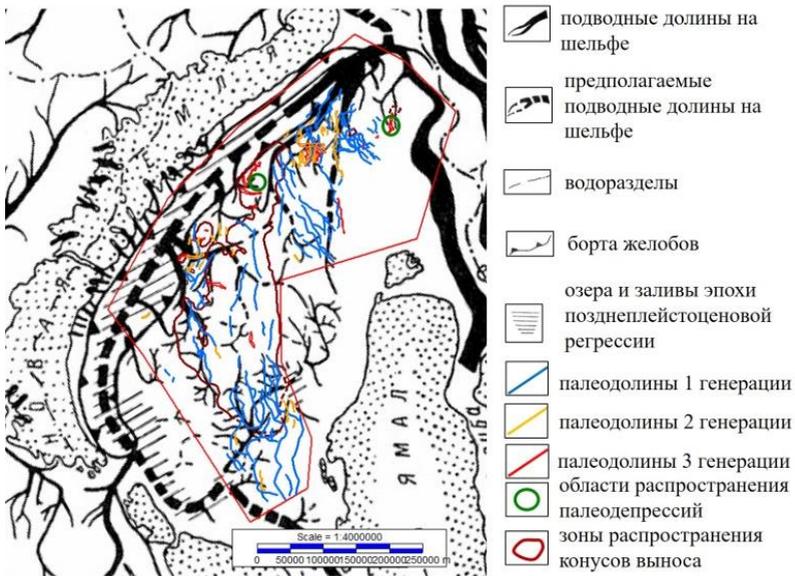


Рис. 8 Схема сопоставления результатов картирования палеодолин и палеодепрессий с палеогеоморфологической схемой А.Н. Ласточкина (Ласточкин, 1984)

³ **Замотина З.С.**, Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., Терёхина Я.Е., Колубакин А.А. Анализ систем палеодолин в юго-западной части Карского моря по сейсмическим данным // Геофизика. 2024. №2. С. 16-23. 0.5 п.л., авторский вклад 70%. DOI: 10.34926/geo.2024.73.68.003. ИФ РИНЦ 0,4.



Рис. 9 Схема расположения палеодолин и палеодепрессий с нанесенными границами максимального распространения покровных оледенений позднего неоплейстоцена по материалам публикаций (Замотина и др., 2023; Hughes et al., 2016; Nazarov et al., 2022)

Заключение

В результате применения комплекса мультисоставных сейсмических и гидроакустических исследований, включающих 2D/3D сейсморазведку стандартного, высокого и сверхвысокого разрешения, акустического профилирования и мультисоставного эхолотирования, были обнаружены палеодолины и палеодепрессии в верхней части геологического разреза в юго-западной части шельфа Карского моря. Было выявлено их пространственное положение, уточнен предполагаемый генезис. К основным итогам диссертационного исследования относятся следующие положения:

1. Были выявлены три генерации палеодолин, для которых определены и обоснованы предполагаемые генезис и возраст, что отражено в **защищаемом положении №1**.

2. Для каждой из трёх генераций палеодолин определены морфологические (форма поперечного сечения и форма продольного профиля) и морфометрические параметры (мощность осадочного выполнения, ширина, протяженность), которые обосновывают **защищаемое положение №2**.

3. Выявлена перестройка палеосети в районе исследований и определен её предполагаемый возраст по результатам анализа пространственного расположения всех выявленных эрозионных форм. Это позволило аргументировать **защищаемое положение №3**.

4. Получены скоростные характеристики и параметры волнового поля на основе атрибутного анализа в интервале осадочного выполнения палеодолин, что в совокупности с детальным анализом их морфологических особенностей и морфометрических параметров определило возможность идентификации залегания мёрзлых грунтов и их пространственной локализации на участке исследований (**защищаемое положение №4**).

5. Обнаружены палеодепрессии, обладающие всеми характерными признаками погребенных термокарстовых впадин, в районе Ямало-Гыданской отмели и Западно-Карской ступени. Сохранность в современном рельефе дна выявленных форм в совокупности с определенным набором морфологических и морфометрических особенностей позволило обосновать вторую часть **защищаемого положения №1**.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы:

Совместный анализ большого набора геофизических данных, полученных в различных частотных диапазонах, позволил не только сделать важные выводы о палеогеографии района работ, но и получить сведения об особенностях осадочного выполнения палеодолин, а также их пространственной локализации, что представляет особую ценность при проектировании геологоразведочных работ в условиях арктического шельфа. Предложенный подход может быть использован в других регионах континентального шельфа Арктики и Субарктики, что повысит эффективность их освоения, а также позволит получить выводы более глобального характера о строении и истории развития региона в плиоцен-четвертичный период геологического времени.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра Российского индекса научного цитирования eLibrary Science index:

1. **Замотина З.С., Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., Терёхина Я.Е., Колюбакин А.А., Гончарова А.М.** Палеодолины и палеодепрессии Восточно-Приновоземельского района Карского моря // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2023. №2. С. 117-127. 0.69 п.л., авторский вклад

- 60%. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-2-117-127. ИФ РИНЦ 0,38.
2. **Замотина З.С.**, Хлебникова О.А., Терёхина Я.Е., Росляков А.Г., Репкина Т.Ю., Рыбалко А.Е., Коллюбакин А.А. Определение границы максимального распространения последнего оледенения по данным сейсмоакустики и многолучевого эхолотирования (юго-западная часть Карского моря) // Геофизика. 2023. №2. С. 29-39. 0.69 п.л., авторский вклад 60%. DOI: 10.34926/geo.2023.82.15.004. ИФ РИНЦ 0,4.
 3. **Замотина З.С.**, Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., Терёхина Я.Е., Коллюбакин А.А. Анализ систем палеодолин в юго-западной части Карского моря по сейсмическим данным // Геофизика. 2024. №2. С. 16-23. 0.5 п.л., авторский вклад 70%. DOI: 10.34926/geo.2024.73.68.003. ИФ РИНЦ 0,4.

Иные публикации:

4. **Замотина З.С.**, Терёхина Я.Е., Рыбалко А.Е., Репкина Т.Ю., Коллюбакин А.А. Особенности распространения эрозивно-аккумулятивных форм рельефа в северной части Восточно-Приновоземельского района Карского моря // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Выпуск 9. – Спб.: ААНИИ, 2022. – С. 91-95. – РИНЦ (0.31 п.л., авторский вклад 60%) – DOI: 10.24412/2687-1092-2022-9-91-95.
5. **Замотина З.С.**, Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., Терёхина Я.Е., Коллюбакин А.А. Палеодолины и палеодепрессии юго-западной части Карского моря по сейсмическим данным // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Материалы ежегодной конференции по результатам экспедиционных исследований. Выпуск 10. – Спб.: ВНИИОкеангеология, 2023. – С. 85-92. – РИНЦ (0.5 п.л., авторский вклад 60%) – DOI: 10.24412/2687-1092-2023-10-85-92.
6. **Замотина З.С.**, Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., Терёхина Я.Е., Коллюбакин А.А. Морфология и генезис палеодолин и палеодепрессий юго-западной части Карского моря по данным сейсмоакустических исследований // Материалы XXV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. 3 – М.: ИО РАН, 2023. – С. 156-160. – (0.31 п.л., авторский вклад 60%) – DOI: 10.29006/978-5-6051054-2-8-2023.