

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Мазнев Степан Валерьевич

**Ледово-экзарационный рельеф на дне Аральского и
Каспийского морей**

25.00.25 – Геоморфология и эволюционная география

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в научно-исследовательской лаборатории геоэкологии Севера географического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель – **Огородов Станислав Анатольевич** – доктор географических наук, профессор РАН, главный научный сотрудник НИЛ геоэкологии Севера географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Официальные оппоненты – **Панин Андрей Валерьевич** – доктор географических наук, доцент, заведующий отделом палеогеографии четвертичного периода Института географии РАН

Кузнецов Сергей Юрьевич – доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории шельфа и морских берегов им. В. П. Зенковича Института океанологии РАН

Веремеева Александра Анатольевна – кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории криологии почв, Пушчинский научный центр биологических исследований РАН, институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН

Защита диссертации состоится «18» ноября 2021 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.11.04 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, Географический факультет, 21 этаж, ауд. 2109.

E-mail: dissovet.geogr.msu@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»:

https://istina.msu.ru/dissertation_councils/councils/51267966/

Автореферат разослан « 06 » октября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.11.04,
кандидат географических наук



Е.Ю. Матлахова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Механическое воздействие ледяного покрова на берега и дно – естественный природный процесс, широко распространенный в замерзающих морях и озерах. Он сопровождается формированием специфического рельефа и называется ледовой экзарацией или ледовым выпахиванием. В районах хозяйственного освоения ледяной покров представляет серьезную угрозу для береговой и подводной инфраструктуры, а в случае аварий – и экологической безопасности окружающей среды. Новые возможности изучения ледовой экзарации, возникшие в связи с обнаружением форм ледового выпахивания на обнажившемся дне Аральского моря, дают надежный и доступный источник информации, необходимый для развития фундаментальных знаний и лучшего понимания этих процессов. Безусловно, в разных природных зонах ледовое выпахивание проявляется неодинаково, различен и уровень интереса к нему. Если в экстремальных арктических и субарктических условиях ледово-экзарационный рельеф изучен достаточно хорошо, и вопрос ледовых воздействий учитывается при строительстве гидротехнических сооружений, то подобных исследований в условиях умеренного климата зачастую явно недостаточно для полного понимания этих процессов и обеспечения безопасности инженерных сооружений. Актуальность изучения следов ледового выпахивания на бывшем дне Аральского моря связана с уникальной обстановкой, сформировавшейся в результате падения его уровня. Особую актуальность исследование приобретает в свете изменений климата, оказывающих значительное влияние на ледовые условия водоемов. На Каспийском море изменения ледовых условий учитываются при обеспечении безопасности действующей нефтегазодобывающей и портовой инфраструктуры.

Степень разработанности темы. Обнаруженные на аэро- и космических снимках на бывшем дне Аральского моря линейные формы рельефа (предположительно – борозды ледового выпахивания) до настоящего времени практически не изучались, а их генезис не был достоверно установлен (Огородов, 2014). В то же время, на Каспийском море отдельным вопросам изучения ледово-экзарационного рельефа и защите сооружений от ледовых воздействий посвящен ряд работ (Кошечкин, 1958; Огородов, Архипов, 2010; Parr et al., 2013; Fulgem et al., 2013; Бухарицин и др., 2015 и др.). Существование форм ледового выпахивания на дне Северного Каспия большей частью непродолжительно, что связано с высокой подвижностью донных осадков в открытой части акватории. Этот факт существенно ограничивает возможности их поиска и интерпретации, часто давая ложное представление об интенсивности воздействий при проведении инженерных изысканий.

Цель работы – качественная и количественная морфогенетическая характеристика ледово-экзарационного рельефа и условий его формирования на дне Аральского и Каспийского морей.

Для достижения данной цели в процессе исследования решены следующие **задачи**:

- 1) Определение основных морфологических параметров линейных форм на дне Аральского и Каспийского морей;
- 2) Обоснование ледово-экзарационного генезиса линейных форм рельефа на дне Аральского и Каспийского морей;

- 3) Реконструкция условий и времени формирования ледово-экзарационного рельефа на дне Аральского и Каспийского морей во второй половине XX – начале XXI;
- 4) Оценка интенсивности ледовых воздействий на дно Каспийского моря на фоне колебаний ледовитости и уровня.

Объект и предмет. Объект исследования – ледово-экзарационный рельеф на дне Аральского и Каспийского морей. Предмет исследования – условия формирования и морфология ледово-экзарационного рельефа на дне этих морей.

Научная новизна работы:

- 1) На основании анализа природных условий Аральского моря, мозаик спутниковых снимков и полевых работ на его бывшем дне доказано происхождение линейных форм рельефа в результате ледовых воздействий. Борозды ледового выпахивания зафиксированы на местности впервые.
- 2) Установлены границы распространения и особенности морфологии ледово-экзарационного рельефа в разных частях Аральского моря, особое внимание уделено морфометрии форм.
- 3) На основании анализа положения древних береговых линий Аральского моря восстановлена история формирования ледово-экзарационного рельефа на его дне.
- 4) Детально охарактеризованы морфометрические параметры ледово-экзарационных форм на дне Каспийского моря.
- 5) Выявлены изменения типов и интенсивности ледовых воздействий на дно Каспийского моря в зависимости от изменения температурных условий.

Личный вклад автора. В основу исследования легли результаты анализа и дешифрирования мозаик спутниковых снимков, проведенные автором в 2018-2020 гг., а также материалы полевых исследований 2018-2019 гг. в северо-восточной части Аральского моря и восточной части Каспийского моря. Автором обоснован генезис ранее не изучавшихся форм рельефа на дне Аральского моря, впервые описана их морфология, получены морфометрические характеристики. Данные получены по результатам дешифрирования шести участков дна площадью от 72 до 912 км², выделено 2230 единичных борозд и их систем.

В ходе полевых работ на Аральском море впервые зафиксированы на местности ледово-экзарационные борозды, существование которых было предположено по данным дистанционного зондирования Земли. Была впервые применена методика съемки ледово-экзарационного рельефа при помощи беспилотного летательного аппарата. В результате работ впервые получены глубины ледово-экзарационных борозд на дне Аральского моря. Для понимания условий экзарации дна Аральского моря диссертантом также проанализированы ледовые условия в историческое время и показано, что на Аральском море имелись все условия для интенсивной экзарации дна ледяными образованиями как до начала этапа снижения уровня, так и во время него. Автором проведена реконструкция условий формирования ледово-экзарационного рельефа на дне Аральского моря в период последней регрессии.

В 2019 году автором организованы полевые работы на двух участках акватории Каспийского моря. Проведена подводная видеосъемка и эхолотирование, выполнен отбор проб. Дешифрирование ледово-экзарационных форм выполнено на двух участках. По результатам обработки схем распространения торосов и стамух на акватории Северного Каспия диссертантом

выполнена оценка глубин, на которых они располагаются. Выявлено, что в период высокой степени торосистости наибольшее количество ледяных образований на Северном Каспии приурочено к глубинам моря от 2 до 5 м. Проведена оценка изменения положения зон разной интенсивности ледовых воздействий при колебании температурных условий и уровня моря.

Теоретическая и практическая значимость. Представленные в работе результаты исследований, особенно вновь выявленные детали микрорельефа дна, имеют большую практическую ценность. Установленные глубины борозд выпахивания показывают минимальные глубины деформации дна, которые необходимо учитывать при прокладке линейных сооружений по дну. Показаны основные районы распространения ледовых воздействий. Данные об изменении глубин и интенсивности ледовых воздействий в зависимости от разных факторов могут быть использованы при разработке и эксплуатации месторождений и строительстве сооружений на шельфе Каспийского моря. Данные по морфологии ледово-экзарационного рельефа могут учитываться при разведке и эксплуатации месторождений в южной части бывшего дна Аральского моря. В теоретическом плане изучение параметров ледово-экзарационного рельефа Аральского и Каспийского морей имеет значение для понимания условий, распространения и интенсивности процесса экзарации дна мелководных замерзающих морей и крупных озер, в частности, бессточных акваторий умеренной климатической зоны. Работа представляет собой основу для прогнозирования изменения интенсивности ледовых воздействий при изменениях климата.

Методология. В методическом плане работа представляет собой синтез традиционных и современных методических приемов. Для решения основных задач геоморфологического исследования в работе реализовано три этапа.

1) Сбор и обобщение литературных данных, дешифрирование мозаик космических снимков и статистическая обработка его результатов.

2) Полевые работы, включающие геоморфологические наблюдения, съемки беспилотным летательным аппаратом, геодезические измерения, эхолотные промеры.

3) Аналитический этап, включающий обработку полевых материалов, окончательную статистическую обработку результатов дешифрирования, историко-генетический, сравнительный и другие виды анализов.

Положения, выносимые на защиту:

1) Линейные формы на дне Аральского и Каспийского морей образовались в результате выпахивания (экзарации) морским льдом.

2) Хорошая сохранность следов ледового выпахивания на бывшем дне Аральского моря обусловлена слабой волновой переработкой подводного берегового склона на фоне высоких скоростей падения уровня.

3) Встречаемость ледово-экзарационных форм на бывшем дне Аральского моря соответствует этапам регрессии второй половины XX века, причем наиболее высокая плотность борозд приурочена к центральной части впадины Большого моря.

4) Интенсивность воздействия торосов и стамух на дно Аральского и Каспийского морей определяется суровостью ледовых условий и текущим положением уровня.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов подтверждается данными натурных наблюдений и публикацией шести статей по

теме диссертации в рецензируемых научных журналах, рекомендованных аттестационной комиссией МГУ, в том числе четырех, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science. Опубликовано шесть развернутых (две страницы и более) тезисов докладов конференций.

Апробация результатов. Промежуточные результаты работы, а также основные положения диссертации докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях и семинарах: Международном молодежном научном форуме «Ломоносов-2018» (Москва, 2018), 18-ой Международной междисциплинарной конференции по наукам о Земле SGEM 2018 (Албена, Болгария, 2018), XXXVI пленуме Геоморфологической комиссии РАН (Барнаул, 2018), Международной конференции «Портовая и океанская инженерия в Арктических условиях» РОАС 2019 (Делфт, Нидерланды, 2019), Международной научной конференции «Опасные явления» (Ростов-на-Дону, 2019, 2020), 12-ой международной молодежной школе-конференции «Меридиан» (Курская биосферная станция ИГРАН, 2019), XXIII Международной научной конференции (Школе) по морской геологии (Москва, 2019), Весенней школе молодых ученых (Ростов-на-Дону, 2020), V Всероссийской научной конференции молодых ученых КИМО (Калининград, 2020), VIII Всероссийской конференции «Щукинские чтения: рельеф и природопользование» (Москва, 2020), IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование» (MARESEDU-2020, Москва, 2020), 25 Международном симпозиуме по льду Международной гидроэкологической ассоциации (Тронхейм, Норвегия, 2020).

По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе шесть в изданиях, включенных в базы Scopus, Web of Science и RSCI.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (170 наименований). Материал работы изложен на 143 страницах машинописного текста, содержит 13 таблиц, 65 иллюстраций, а также 2 приложения на 30 страницах.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю, д.г.н., гл.н.с., проф. РАН С.А. Огородову за всестороннюю помощь при проведении исследований и написании работы, А.П. Вергуну за содействие в проведении полевых исследований и обработке материалов, д.г.н. С.Л. Никифорову, к.г.н. Ф.А. Романенко, к.г.н. А.А. Ермолову, к.г.н. О.В. Кокину, к.г.н. П.Е. Каргашину, к.г.н. Е.Н. Бадюковой за конструктивную критику текста диссертации, к.г.н. А.В. Баранской, к.г.н. А.С. Ижицкому, к.г.н. С.В. Харченко, к.г.н. Т.Ю. Репкиной, д.г.н. Е.И. Игнатову, д.г.н. П.И. Бухарицину, В.В. Архипову, А.Д. Аракельянцу, А.А. Магаевой, С. Верняеву, А. Сигитову, Е. Кадранову, М. Жексембиеву за помощь и поддержку в получении и обсуждении промежуточных результатов, Е.А. Мазневой и Л.И. Лазуковой за выполнение гранулометрического анализа. Автор благодарен коллективу НИЛ геоэкологии Севера за поддержку и консультации. Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, задачи исследования и защищаемые положения, изложена научная новизна, обоснована практическая значимость исследования.

Глава 1. Береговая зона мелководных замерзающих морей и озер

В разделе 1.1 речь идет об основных понятиях и терминах береговой геоморфологии. Береговая зона – это прибрежная полоса моря и заливаемой при волнении суши со специфическими формами рельефа, созданными под преимущественным воздействием волн, которые, трансформируясь и разрушаясь в пределах данной полосы вследствие уменьшения глубины, расходуют энергию в основном на переформирование подводного берегового склона и берега, перемещение прибрежно-морских наносов и построение аккумулятивных береговых форм (Морская геоморфология..., 1980). Такое определение береговой зоны подходит не только для морей, но и для крупных озер. Таким образом, под понятие береговой зоны попадает практически все дно Северного Каспия, а также практически все дно Аральского моря, береговая зона которого смещалась вслед за падением уровня.

Раздел 1.2 посвящен истории изучения береговой зоны замерзающих морей и крупных озер. Показан теоретический вклад таких ученых, как О.К. Леонтьев (1961), В.П. Зенкович (1962), Ф.Э. Арэ (1980, 1996), Г.А. Сафьянов (1996), В.А. Совершаев (1981, 1992). Отмечен решающий вклад американских ученых (Barnes et al., 1988), а также исследования морей умеренной зоны, опубликованные П.И. Бухарициным, С.А. Огородовым, С.А. Вершининым, Д.Л. Форбсом и др.

Разделы 1.3, 1.4 и 1.5 рассматривают ледяные торосистые образования в береговой зоне (рисунок 1), принципы районирования береговой зоны замерзающих морей и процессы ледовой экзарации. **Ледовая экзарация** – это механическое воздействие льдов на берега и дно замерзающих морей и озер, связанное с динамикой ледяного покрова, торошением и стамухообразованием, под влиянием гидрометеорологических факторов и рельефа прибрежно-шельфовой зоны. Ледовая экзарация захватывает участки берега от 10-15 м над уровнем моря до глубин 15-35 м, в ряде регионов – до 50-65 м, а по некоторым данным – до 75 м (Reimnitz et al., 1972; Лисицин, 1994).

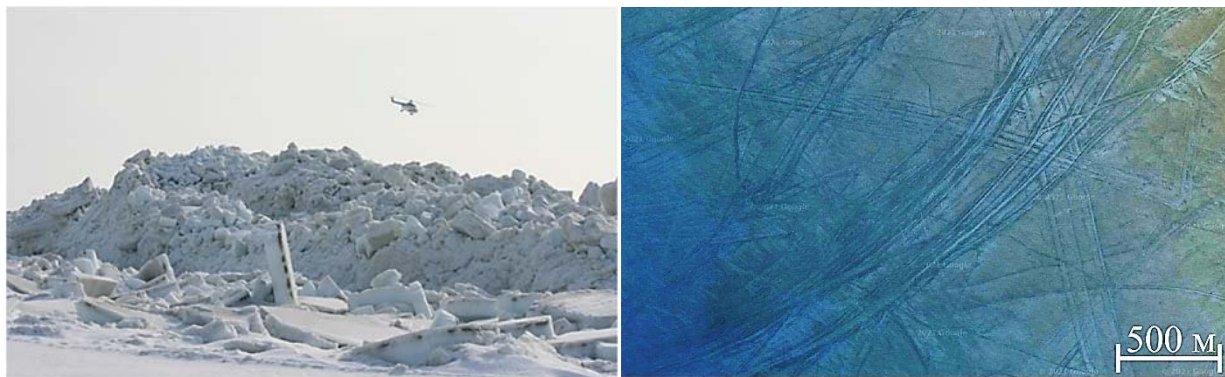


Рисунок 1. Слева – вид стамухи со льда на Каспийском море (фото П.И. Бухарицина), справа – следы ледовых воздействий на дне Аральского моря (<https://www.google.ru/maps>)

В замерзающих морях с неустойчивым ледяным покровом, где припай не образуется или часто взламывается, навалы морских льдов на берег случаются в

течение всего ледового сезона. В результате ледовых надвигов и навалов на берегах с песчаными пляжами формируются мелкие экзарационные формы: борозды, царапины, ямы. Более интенсивное воздействие на дно происходит на мористой кромке припая, где в течение всего холодного периода происходят торшения при контакте с дрейфующими ледяными полями и формируются гряды и барьеры торосов («ледяные плотины»), достигающие дна (Barnes et al., 1988). Борозды ледового выпаживания образуют на кромке припая так называемую гребенку, ориентированную обычно по нормали к линии берега, чему способствует напорное воздействие льдов со стороны открытого моря. Наибольшие глубина и интенсивность экзарации приходятся на область дрейфующих льдов, за кромкой припая, вдоль которой дрейфуют ледяные поля с вмержшими в них ледяными торосистыми образованиями, достигающими дна. Борозды выпаживания в этой зоне ориентированы в основном параллельно линии берега, так как ледяные торосистые образования подвергаются преимущественно вдольбереговому дрейфу. На глубинах, превышающих максимально возможную для данной акватории осадку торосистых образований, экзарация дна прекращается. В разделе также описаны основные особенности ледово-экзарационного рельефа, изученного в различных регионах, особенности его формирования и морфометрические параметры. Обозначены основные направления исследования ледово-экзарационного рельефа.

Глава 2. Природные условия Аральского и Каспийского морей как фактор формирования ледово-экзарационного рельефа

В разделе 2.1 рассматриваются геолого-геоморфологические условия Аральского и Каспийского морей. Аральское море представляет собой внутриконтинентальный водоем, образовавшийся в замкнутом понижении рельефа. В структурном отношении западная окраина моря приурочена к опущенному блоку кристаллического фундамента, вся остальная часть акватории расположена над приподнятым Кызылкумским сегментом фундамента. Образование впадины Арала является следствием общего тектонического опускания региона с второстепенной ролью денудационных и дефляционных процессов (Асеев и др., 1974; Милановский, 1996). В разделе описываются встречающиеся на Аральском море типы берегов, особенности подводных береговых склонов, приводится характеристика донных отложений, полученная, в том числе, в ходе собственных исследований.

Рассматриваемая в работе северная часть Каспийского моря представляет собой окраину Прикаспийской синеклизы, являющейся частью докембрийской Восточно-Европейской платформы. Это самая мелководная часть Каспия со средней глубиной 4,4 м, максимальной – до 20 м. Морфологически ее граница со Средним Каспием выражена Мангышлакским порогом с глубинами около 10-15 м. На большей части Северного Каспия распространены низкие отмельные берега. Особенности рельефа дна обусловлены значительным объемом материала, поступающего с реками, и сменой во времени противоположно действующих рельефообразующих факторов: выравнивания рельефа при трансгрессии за счет аккумуляции морских осадков и формирования эрозионного рельефа во время регрессий. В разделе охарактеризованы донные осадки Северного Каспия, а также кратко описаны Средний и Южный Каспий.

Раздел 2.2 описывает гидрометеорологические условия Каспийского и Аральского морей. Они являются бессточными водоемами, и их положение в аридной зоне определяет особенности гидрологических характеристик и режима. Главная особенность – колебания уровня, чутко реагирующего на изменение параметров водного баланса. Антропогенное вмешательство привело к падению уровня Аральского моря, в результате чего некоторые части Аральского моря обособились, другие – перестали существовать. Описанные в разделе температурные условия приводили к формированию на море ледяного покрова как до начала падения уровня, так и после него. В холодный период северные и северо-восточные ветры со средними скоростями 5-6 м/с, максимальными до 20-25 м/с обеспечивали интенсивное торошение.

Для Каспийского моря за последние 500 лет размах колебаний уровня составлял 7 м, а в XX – начале XXI вв. – чуть более 3 метров (Матишов и др., 2012). При этом сгонно-нагонные явления, характерные для Каспийского моря, приводят к изменению уровня на более чем 1 м (Нестеров и др., 2018). Для северной части моря характерно преобладание восточных и юго-восточных ветров со скоростями до 10 м/с (80-90 % повторяемости).

В разделе 2.3 показаны ледовые условия Аральского моря до 1961 года. Этот период в его истории называют «условно-естественным». Первые сведения о ледовом режиме Аральского моря были ошибочными, и считалось, что «открытое море (центральный бассейн) обыкновенно, вследствие ветров, не покрывается льдом совсем» (Берг, 1908). Довольно полная характеристика элементов ледового режима Аральского моря приведена в «Атласе льдов Аральского моря» (1970).

До начала падения уровня Аральского моря в 1961 году ледообразование в прибрежных районах на севере и северо-востоке моря обычно начиналось 19-23 ноября, припай, как правило, вставал 10 декабря и достигал в максимальную фазу 20-30 км. В открытом море льды, представленные ледяными полями, мелко- и крупнобитым льдом, наблюдались со второй декады декабря, а у западного побережья лед образовывался в среднем в первой декаде января. Наибольшего развития ледяной покров достигал в середине февраля. Мощность ровного льда составляла 65-70 см на севере и 35-45 см на юге. При сильных ветрах и в период ледостава наблюдался неоднократный взлом припая с последующим выносом дрейфующего льда от берега в открытое море. Благодаря доминировавшим в холодный период сильным северо-восточным ветрам, ледяной покров был сильно наложен и восторошен (Косарев, 1975). Под влиянием северных и восточных ветров было возможно скопление льда в южной части моря.

Раздел 2.4 рассматривает ледовые условия Каспийского моря. Его северная мелководная часть, характеризующаяся малым теплозапасом, замерзает ежегодно, в средней части лед появляется вдоль побережий лишь в суровые зимы, в южной части льда не бывает. Полное замерзание и образование припая обычно происходит севернее линии о. Чечень – о. Кулалы. В холодные и экстремально холодные зимы припайный лед может устанавливаться до изобаты 20 м. Замерзание Северного Каспия, как правило, начинается с северо-восточного побережья в районе 15-25 ноября, постепенно продвигаясь на юг. Ледостав в архипелаге Тюленьи острова происходит во второй половине декабря. Максимальная толщина ровного льда на Северном Каспии даже в очень суровые зимы не превышает 60–70 см, припая – 90–120 см, однако значительную часть акватории может занимать так называемый наложенный лед толщиной до 3 м

(Бухарицин, 1984). Наиболее характерно для Северного Каспия ветровое торошение, которому способствуют подледные течения и сгонно-нагонные колебания уровня. Наибольшее число торосов и стамух формируется в умеренные (средние по ледовитости) зимы.

В разделе 2.5 рассмотрено влияние колебаний уровня Аральского и Каспийского морей на ледовые условия. При падении уровня Аральское море стало быстрее и на несколько дней раньше замерзать, а таяние льда начиналось позже и проходило за более длительный период. В конце 2000-х воды Восточного Арала стали гиперсолеными, что повлекло ледообразование при температурах ниже минус 5 °С (Zavialov, 2005), оно стало фрагментарным, сократились площадь ледяного покрова и продолжительность ледового сезона.

На Каспийском море текущее положение его уровня является важным фактором, определяющим интенсивность ледово-экзарационных процессов. В 1973-1980 гг. уровень моря был на 1 м ниже, чем в 2013-2019 гг. При сравнении положений стамух в эти периоды выявлено, что они сдвигаются вслед за береговой линией, на большие или меньшие глубины соответственно. Также в разделе показано влияние сгонно-нагонных явлений на формирование торосов и стамух.

В разделе 2.6 проведен сравнительный анализ двух изучаемых морей с точки зрения благоприятствования процессам ледовой экзарации. Аральское море и Северный Каспий характеризуются сходными суммами градусо-дней мороза, что обуславливает примерно одинаковую толщину льда и продолжительность ледового сезона. Моря характеризуются преобладанием ветрового торошения, для обеих акваторий характерен наслоенный лед. По сравнению с Аральским морем, Каспийское имеет меньшую среднюю и максимальную глубины, ряд банок и менее изрезанную береговую линию. Преобладающими донными осадками являются пески, в то время как на Аральском море – алевролиты. При этом моря имеют много общих черт, что позволяет их сравнивать, а также рассматривать в качестве дополнения друг к другу. Изучение борозд ледового выпаживания на осушенном дне Аральского моря, где сейчас они не формируются, дополняется исследованиями на Каспийском море, где ледовые воздействия наблюдаются в настоящее время, но увидеть следы которых гораздо сложнее.

Глава 3. Методика изучения ледово-экзарационного рельефа

Для решения основных задач геоморфологического исследования в работе реализовано три этапа. В разделе 3.1 описана методика дешифрирования ледово-экзарационных форм. Для дешифрирования ледово-экзарационного рельефа территории бывшего дна Аральского моря использовались мозаики космических снимков сверхвысокого разрешения (по классификации Книжникова и др., 2004) в видимом диапазоне, опубликованные на открытых ресурсах Яндекс.Карты, *Google Maps*, *Bing Maps*, *ESRI World Imagery*. Они составлены из снимков *WorldView*, *QuickBird*, *IKONOS* и *GeoEye* компании *Maxar Technologies*. Разрешение мозаик позволяет детально рассмотреть морфологию и исследовать морфометрические параметры форм с погрешностью, равной разрешению снимков (около 1 м). В работе выполнялось визуальное дешифрирование.

На первом этапе дешифрирования были выявлены границы распространения ледово-экзарационных форм по дну Аральского моря и выполнено районирование дна по их концентрации. На втором этапе дешифрирование производилось следующим образом. Для единичных борозд вручную определялась ширина, а для

гребенок и систем борозд – ширина гребенок или систем, ширина единичных борозд в гребенке (системе), количество борозд в гребенке (системе). При помощи программного кода автоматически определялись длина и направление линий. После заполнения основных морфометрических характеристик атрибутивная таблица выгружалась в документ формата MS Excel для дальнейшей статистической обработки. В результате были получены основные описательные статистические параметры борозд.

В разделе 3.2 описаны полевые методы обследования ледово-экзарационных форм. Полевые работы проводились на бывшем дне Аральского моря в октябре 2018 г. и на Каспийском море в сентябре 2019 г.

На ключевых участках дна северо-восточной части Аральского моря, часть из которых была изучена в ходе дешифрирования, проведены съемка беспилотным летательным аппаратом *DJI Phantom 4 Professional*, геоморфологические описания на местности, нивелирное профилирование, описание верхней части разреза рыхлых отложений и отбор образцов.

Полевые работы на Каспийском море проведены в районе Тюленьих островов и в заливе Кендырли. Проведены подводная съемка видео(экшн-)камерой, съемка эхолотом *Lowrance Mark-5x*, выполнен отбор проб донных грунтов.

На завершающем этапе исследования проведена обработка полевых материалов, корректировка результатов дешифрирования, гранулометрический анализ грунтов и другие анализы. В программном продукте *Agisoft Metashape* созданы цифровые модели рельефа. В дальнейшем для оценки возраста борозд, сравнения условий экзарационных воздействий, оценки факторов, влияющих на размещение зон и степень интенсивности экзарации, в работе применены аналитические методы, такие как историко-генетический, сравнительный и другие. Восстановление истории формирования ледово-экзарационного рельефа основано на анализе древних береговых линий и предположении о положении зоны наиболее интенсивной экзарации на глубинах 2-5 м, характерном для Каспийского моря.

Таким образом, были решены основные задачи геоморфологического исследования: морфографическая и морфометрическая характеристика, определение слагающих (вмещающих) отложений, распространения, динамики и истории развития ледово-экзарационного рельефа в конце XX – начале XXI в.

Глава 4. Ледово-экзарационный рельеф на дне Аральского моря

В разделе 4.1. обоснован генезис исследуемых форм рельефа на дне Аральского моря. Для этого исследование описанных выше природных условий было дополнено первичной характеристикой морфологии борозд. Определено, что они имеют понижение по центральной оси глубиной в 10-40 см, обрамленное валиками аналогичной высоты, среднюю длину около 1500 м, среднюю ширину единичных форм 7 м и систем форм около 100 м. Боковые валики всюду сопровождают понижение, а также расположены на их концах. Формы имеют как резкие, так и плавные изгибы в своем простирании, наблюдаются многочисленные пересечения линий разных направлений. Генезис таких борозд гипотетически может определяться как тектонический, прибрежно-морской, флювиальный, эоловый, экзарационный и антропогенный. По местоположению форм в пространстве и иерархии форм рельефа, слагающим отложениям и парагенетическим рядам с использованием сравнительно-географического метода последовательно доказано их происхождение в результате ледовых процессов.

Показано, что описанные в главе 2 условия способствуют ледовым воздействиям на дно и формированию ледово-экзарационного рельефа. Показано, что исследуемые борозды морфологически весьма сходны с аналогичными в Арктике (рисунок 2).

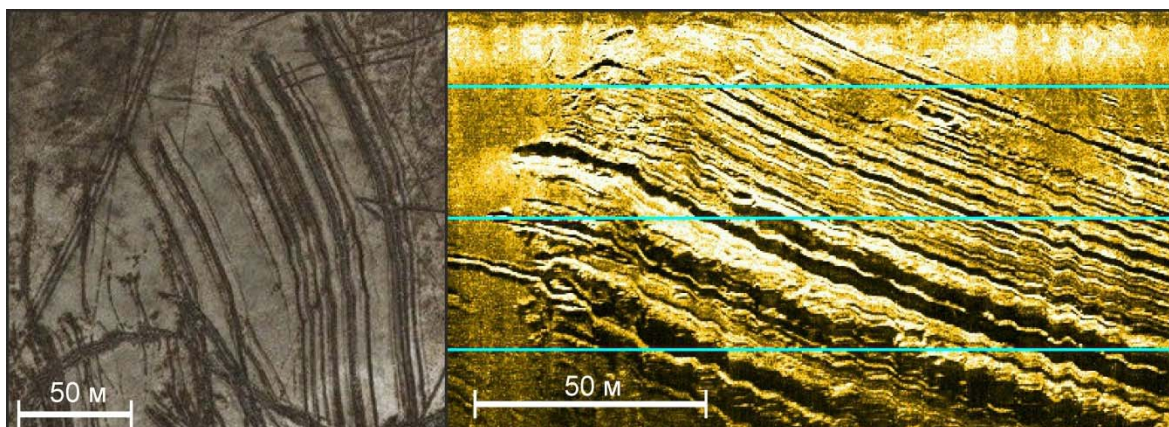


Рисунок 2. «Гребенки» ледово-экзарационных борозд на дне Аральского моря (спутниковый снимок WorldView-3, слева) и Байдарацкой губы Карского моря (съемка ГБО, справа) (Maznev et al., 2019).

В разделе 4.2 обсуждается распространение ледово-экзарационного рельефа в котловине Аральского моря. Было выявлено, что практически вся поверхность бывшего дна Восточного Аральского моря покрыта следами ледовой экзарации (рисунок 3). Построена схема распространения ледово-экзарационного рельефа и плотности борозд выпахивания на дне Аральского моря (рисунок 4).



Рисунок 3. Общий вид гребенок ледово-экзарационных борозд в северо-восточной части Аральского моря на разных стадиях зарастания. Октябрь 2018 г.

В разделе 4.3 описаны морфометрические параметры ледово-экзарационных форм рельефа. В подразделе 4.3.1 приводятся полевые данные. Плоская поверхность дна осложнена ледово-экзарационными формами микрорельефа. Например, на участке к югу от пролива Берга максимальная глубина ледово-экзарационных борозд составила до 0,4 м, боковые валики имели высоту около 0,1 м, общая амплитуда составила до 0,5 м. Средняя ширина борозд по днищу составляет около 2-3 м, по бровкам – до 10 м. Боковые валики имеют ширину по гребню около 1 м, валик между двумя бороздами в гребенке – до 2 м. Склоны борозд по краям имеют крутизну около 20° , на межбороздовом валике – $7-10^\circ$. По результатам проходки шурфов вкрест простирания борозд было выявлено, что грунт в днище борозд является более плотным, а на боковых валиках – более рыхлым. Как в пределах валиков, так и в днищах борозд, встречаются

осложняющие микроформы – напорные валики и формы вытаивания грунта из льда высотой до 20-30 см и размером до 0,5-0,7 м в поперечнике. На участках представлены борозды с корытообразной, U-образной и V-образной формами поперечного профиля. Все они имеют неправильную форму с переломами в профиле, преобладают борозды с плоским дном.

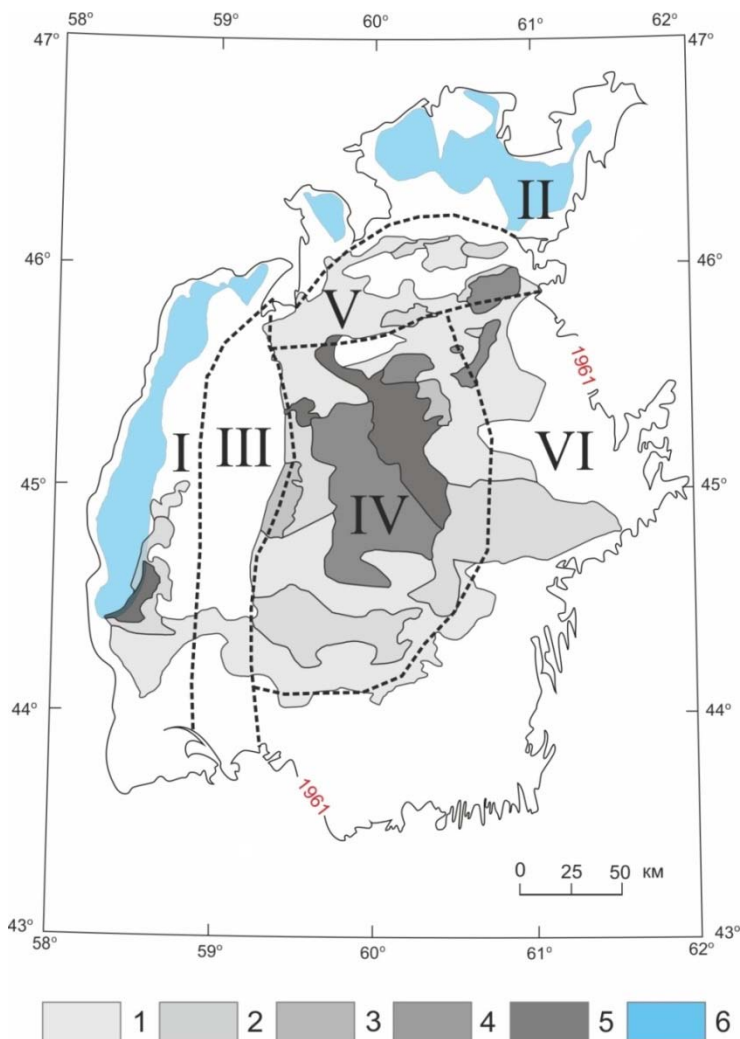


Рисунок 4. Схема покрытия дна Аральского моря следами ледовых воздействий.

Условные обозначения: 1) <10 % покрытия, 2) 10–20 %, 3) 20–30 %, 4) 30–50 %, 5) > 50 %, 6) современная акватория Аральского моря. Римскими цифрами обозначены зоны (по Розенблатс, 1976), пунктирными линиями – границы зон:

I – относительно глубоководная впадина (желоб);

II – впадины котловин северного Арала;

III – приподнятая равнина в области срединных поднятий;

IV – центральная впадина Большого моря;

V – равнина северной части моря;

VI – прибрежная наклонная равнина

В подразделе 4.3.2 представлены результаты дешифрирования данных ДЗЗ. Сначала рассмотрены особенности морфологии по каждому из шести ключевых участков, а затем подведен итог для моря в целом. По результатам дешифрирования удалось собрать статистически значимую выборку длины и ширины единичных борозд, ширины гребенок и единичных борозд в них, длины гребенок, а также направлений распространения борозд. Всего на шести участках было выделено 2230 борозд и гребенок.

Большинство величин имеет близкое к логнормальному распределению. При расчетах параметров используются не только средние, но и медианные значения. Последние лучше описывают выборку, так как при логнормальном распределении экстремально высокие значения заметно увеличивают средние, уводя их от экстремума в распределении.

Для Аральского моря в целом характерны морфометрические характеристики, приведенные в табл. 1. Также было выявлено, что 69 % борозд относится к коротким, к средним – 23 %, к длинным – 6 %, к очень длинным – 2 %. Вариации ширины борозд в целом по морю небольшие и колеблются в основном от

1 до 8 м (75 % борозд), борозды шириной 9-16 м составляют еще 20 %, больше 16 м – 5 % (Рисунок 4.24). Узкие борозды составляют 76 %, средние – 21 %, широкие – 3 %, очень широких – менее 1 %. Ширина единичных борозд, как правило, выше ширины борозд, входящих в гребенку или систему борозд: 9 м в среднем против 6 м. Соотношение гребенок и единичных борозд для моря в целом составляет 56% против 44 %.

Таблица 1. Морфометрические показатели ледово-экскариционных борозд для Аральского моря в целом

	Ширина борозд, м	Длина борозд, м	Ширина единичных борозд, м	Длина единичных борозд, м	Ширина гребенок, м	Длина гребенок, м	Ширина единичных борозд в гребенке, м	Количество борозд в гребенке, шт
Число определений	2230	2230	985	985	1245	1245	1245	1245
Минимальное значение	1	37	1	58	4	37	1	2
Максимальное значение	89	25857	89	16435	5560	25857	42	135
Среднее значение	7	1430	9	1430	108	1430	6	6
Медиана	6	853	7	841	44	861	5	4
Мода	5	608	5	733	20	408	5	2

При анализе направлений ледово-экскариционных борозд было выявлено, что на участках в северной части моря (1 и 2) они четко подчиняются основным направлениями ветров в холодный период – ярко выражен СЗ (ССЗ) – ЮВ (ЮЮВ) румб. Вторичный пик направлений соответствует направлению вдольберегового дрейфа. В направлениях на участке 3 в центральной части моря этот румб также выражен, но не преобладает. Это связано с тем, что ветра «разворачиваются» у о. Барсакельмес, где значительную роль приобретает субмеридиональное направление воздушных потоков. Положение участка за островом обеспечивает изменение направлений относительно метеостанции, расположенной в наветренной части острова. На другом участке (4) в центральной части моря направление борозд с В на З уже преобладает. В целом борозды соответствуют направлениям ветров. При формировании борозд наблюдалось напорное воздействие ледяных образований на подводный береговой склон в районе о. Возрождения. Для участка 6 в южной части моря характерно преобладание борозд ВСВ (СВ) – ЗЮЗ (ЮЗ) направлений, что в целом соответствует ветрам северо-восточной четверти, характерных для района ГМС Муйнак. Направления борозд на участке 5 в наименьшей степени соотносятся с направлениями ветров. При общем региональном субмеридиональном ветровом режиме это можно

объяснить морфологическими особенностями рельефа дна. Узкая часть желоба, в южной части которой расположен участок, не представляет возможности для разгона ледяных образований и экзарации ими дна в направлении ветров В–З направлений, дующих поперек желоба. В данном случае дрейфующие вместе с льдами ледяные торосистые образования разворачивались под прямым углом к линии берега, обеспечивая возможность экзарационного процесса при сохранении общего направления дрейфа.

Для северной части моря характерна наихудшая сохранность ледово-экзарационного рельефа, относительно большая ширина борозд, слабая морфологическая выраженность и четкая ориентация по ветру. Для центральной части, напротив, характерна хорошая сохранность и выраженность ледово-экзарационных борозд. Это связано с тем, что участки в этом районе освободились от моря позже других, и ледово-экзарационный рельеф был сформирован позднее. Наименьшая ширина борозд среди всех районов указывает на то, что они образовались в результате воздействия небольшими ледяными образованиями, характерными для более позднего этапа эволюции Аральского моря. Для южной части моря характерны средняя ширина единичных борозд и крупные и длинные системы борозд, редко встречающиеся в других районах. Также для этого района типичен сложный характер строения гребенок борозд, указывающий на перестроение ледяных торосистых образований в процессе экзарации.

В разделе 4.4 описывается история формирования ледово-экзарационного рельефа на дне Аральского моря (рисунок 5). Предполагается, что зона наиболее интенсивных воздействий находилась на глубине от 2 до 5 метров. На меньших глубинах находилась зона стабильного припая, торошения в которой незначительны. Мористее располагались зоны с меньшей концентрацией ледяных образований, достигавших дна с разной частотой и обеспечивавших воздействия большей или меньшей интенсивности. На современном срезе мы видим, что большая часть борозд приурочена к глубинам 15-25 м относительно уровня 1960 г. С наибольшей вероятностью, они сформировались в то время, когда в этих районах глубина моря составляла 2-5 м, т.е. с начала 1980-х до начала 2000-х годов. Во время снижения уровня зоны наиболее интенсивных ледовых воздействий смещались вместе с береговой линией.

До начала 1970-х годов падение уровня моря было не настолько быстрым, чтобы изменить ход ледовых процессов. По-видимому, в это время борозды не сохранялись в течение нескольких лет, перемывались и заносились наносами, поэтому они практически не сохранились в современном рельефе. С начала 1970-х годов скорость падения уровня начала увеличиваться, вновь сформированные борозды не успевали заполняться наносами, в то время как при этом оголялось сразу несколько километров бывшего дна. В результате формировались участки с относительно большой концентрацией борозд выпахивания. С середины 1980-х сокращение акватории и уменьшение теплозапаса начало приводить к ужесточению ледовых условий. В это время начала формироваться основная масса ледово-экзарационных борозд, обнаруженных на мозаиках космических снимков. К периоду 1980-х – 1990-х годов относятся участки с ледово-экзарационным рельефом, со всех сторон обрамляющие центральную часть Восточного Арала. К концу 1980-х – середине 1990-х годов зона наиболее интенсивной экзарации, смещающаяся как с восточного, так и с западного берега Восточного Арала, начала достигать центральной части акватории. В этот момент создались лучшие условия

для формирования и сохранения ледово-экзарационного рельефа на дне моря. Микрорельеф борозд выпаживания формировался на обширных участках плоского дна центральной котловины Аральского моря с глубинами до 10 м (в начале периода). Ледовые условия в этот период еще оставались относительно суровыми, при этом слабая гидродинамическая активность в мелководной акватории приводила к тому, что микрорельеф дна мог сохраняться в течение более продолжительного времени. С середины 1990-х до середины 2000-х годов интенсивность ледовых воздействий начала снижаться. В конце 2000-х воды Восточного Арала стали гиперсолеными, и ледообразование стало фрагментарным, а площадь водоема сократилась настолько, что образывавшиеся в редких случаях льды не получали необходимого для торошения разгона, и экзарация дна практически прекратилась.

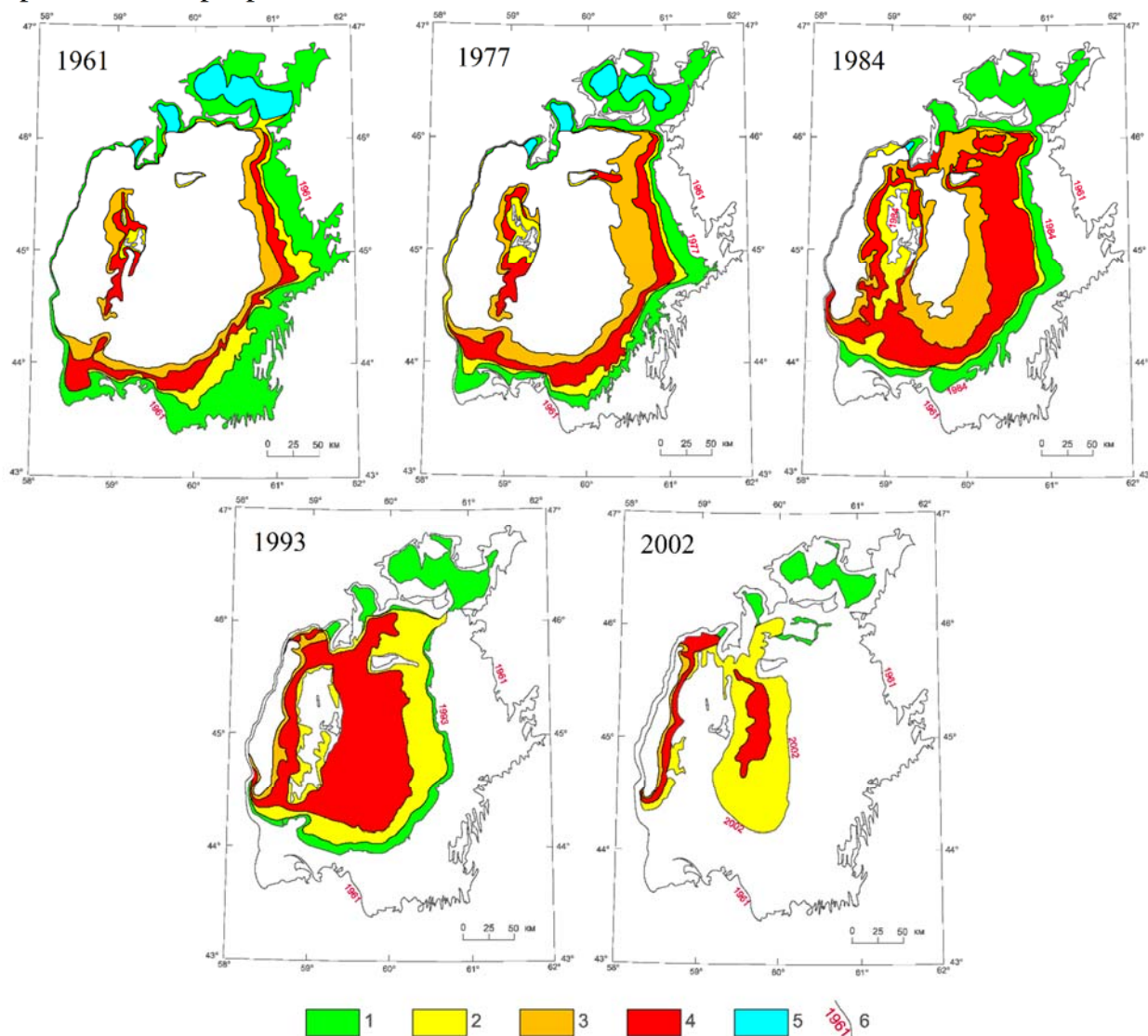


Рисунок 5. Схемы расположения зон с различной интенсивностью ледовых воздействий на Аральском море в различные годы. Условные обозначения: 1) зона устойчивого припая, интенсивность ледовых воздействий низкая; 2) зона взаимодействия припайных и дрейфующих льдов – интенсивные ледовые воздействия; 3) зона дрейфующих льдов на больших глубинах – воздействия средней интенсивности; 4) зона дрейфующих льдов на мелководье – наиболее интенсивные ледовые воздействия; 5) зона устойчивого припая в закрытых глубоководных акваториях – ледовые воздействия отсутствуют; 6) береговые линии за отдельные годы.

Глава 5. Ледово-экзарационный рельеф на дне Каспийского моря

В разделе 5.1 рассмотрено распространение ледово-экзарационного рельефа на дне Каспийского моря. В первую очередь оно зависит от момента проведения исследования. Сохранность микрорельефа на морском дне зависит от интенсивности литодинамических процессов, и в целом, довольно плохая. Известно, что продолжительное время борозды выпаживания могут сохраняться лишь в районах закрытых бухт и архипелагов, защищенных от волн большинства румбов. Таким образом, различаются районы, где ледово-экзарационный рельеф сохраняется постоянно (или хотя бы в течение продолжительного времени) и районы периодического распространения следов ледовых воздействий. Известно, что районами постоянного распространения ледово-экзарационного рельефа на Каспийском море являются Тюленьи острова и залив Кендырли. К районам формирования ледово-экзарационного рельефа относится вся северная часть Каспия от высот в первые метры до глубин 12-16 м (Огородов, Архипов, 2010; Андреев и др., 1971).

В разделе 5.2 описываются морфометрические параметры ледово-экзарационных форм рельефа Каспийского моря. Результаты эхолотных промеров показали, что борозды в районе съемки имеют ширину от 50 до 150 м (в среднем – около 100 м), пологие борта, глубину 20-60 см (в среднем – 30 см). Высота валиков составляет не более 0,2 м, ширина – порядка 10 м (рисунок 6). Борозды имеют сложную форму, чаще всего W-образную, с несколькими локальными повышениями (грядками) в центральной части. По сути такие борозды – слившиеся гребенки с остаточными валиками в центральной части. Также хорошо выражены напорные валики, представленные смесью водорослей и илистыми грунтами, слагающими верхнюю часть разреза.

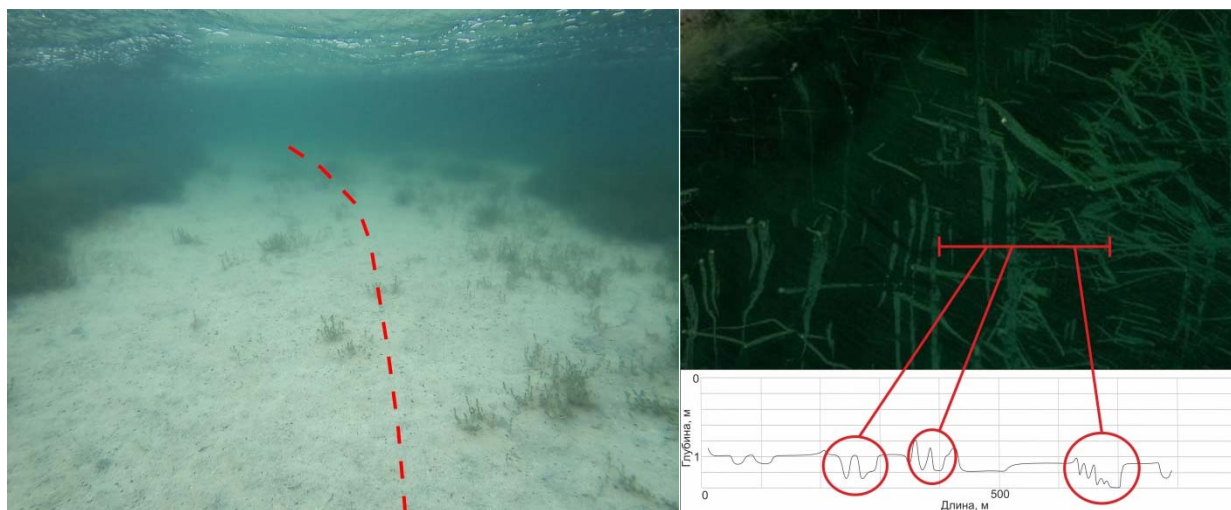


Рисунок 6. Вид ледово-экзарационных борозд на дне Каспийского моря в районе Тюленьих островов: подводная съемка (слева) и результаты эхолотных промеров в районе о. Морской (справа, основа – фрагментов мозаик спутниковых снимков WorldView-3, весна 2016 г.)

По результатам обобщения данных дешифрирования двух участков в районе Тюленьих островов получены основные морфометрические характеристики ледово-экзарационного рельефа (табл. 2).

Таблица 2. Морфометрические показатели ледово-экзарационных борозд в районе Тюленьих островов Каспийского моря

	Ширина борозд, м	Длина борозд, м	Ширина единичных борозд, м	Длина единичных борозд, м	Ширина гребенок, м	Длина гребенок, м	Ширина единичных борозд в гребенке, м	Количество борозд в гребенке, шт
Число определений	359	359	219	219	140	140	140	140
Минимальное значение	5	64	6	165	16	64	5	2
Максимальное значение	325	8846	325	8846	2208	4950	95	17
Среднее значение	31	1024	35	1075	221	945	25	4
Медиана	27	767	31	812	127	711	23	3
Мода	32	--	32	--	62	--	25	2

Раздел 5.3 рассматривает интенсивность ледовых воздействий на берега и дно Каспийского моря и ее изменение под действием различных факторов. Основное внимание уделено термическому фактору. Показано, что зоны с различной интенсивностью меняют свое положение в зависимости от суровости зим, характеризующихся разной ледовитостью, положением кромки припая и ледяных образований, а также их количеством. Показано, что при прочих равных ледовых условиях уровень моря влияет на интенсивность экзарации дна ледяными образованиями. В то же время, при одном уровне моря интенсивность определяется ледовыми условиями.

Раздел 5.4 посвящен сравнению параметров ледово-экзарационных борозд различных акваторий. Борозды выпахивания на Аральском и Каспийском морях имеют самые небольшие длину, ширину и глубину среди большинства изученных акваторий. Глубины, на которых имеют место ледовые воздействия на Аральском и Каспийском морях значительно ниже таковых, например, в Байдарацкой губе и озере Эри. По сравнению с бороздами, формирующимися и сохраняющимися в этих водоемах глубже зоны волновой активности, в Аральском и Каспийском морях так или иначе происходила и происходит их волновая переработка и заполнение. В целом, несмотря на то, что по своим морфометрическим параметрам ледово-экзарационные борозды на дне Аральского и Каспийского морей меньше борозд в других замерзающих водоемах, в целом они имеют тот же порядок значений, а экстремально крупные борозды имеют сравнимые значения.

Заключение

В работе выполнен анализ основных морфологических показателей ледово-экзарационного рельефа Аральского и Каспийского морей, установлены история его формирования, интенсивность процессов ледовых воздействий, их изменение под действием термических и урвенных условий этих водоемов.

В результате исследований были получены следующие выводы:

- Специфический микрорельеф на бывшем дне Аральского моря, обнаруженный на мозаиках спутниковых снимков и верифицированный в ходе полевых исследований, является результатом воздействия ледяных торосистых образований на морское дно. В работе показано существование природных условий для таких воздействий на Аральском море как до начала падения его уровня, так и во время него.

- В результате дешифрирования шести участков дна в северной, центральной и южной частях Аральского моря получены морфометрические характеристики ледово-экзарационных форм рельефа. Их средняя длина составила 1430 м, медианная – 853 м; средняя ширина – 7 м, медианная – 6 м; средняя глубина – около 0,2 м.

- По результатам дешифрирования двух участков дна Каспийского моря в районе Тюленьих островов получены морфометрические характеристики борозд выпаживания. Их средняя длина составила 1024 м, медианная – 767 м; средняя ширина 31 м, медианная – 27 м; средняя глубина около 0,3 м.

- Ледово-экзарационные формы рельефа на дне Аральского и Каспийского морей морфологически сходны с аналогичными формами, известными в других регионах, а также имеют сравнимые морфометрические показатели.

- Ледово-экзарационный рельеф распространен в основном в центральной котловине Аральского моря, также большое количество следов отмечено на равнине северной части моря. Ледовая экзарация затронула южную периферию глубоководной впадины, а также южную и восточную части срединных поднятий. Небольшое количество следов отмечено на прибрежной наклонной равнине. В котловинах северного Арала ледово-экзарационные формы рельефа обнаружены не были.

- Зоны наибольшей концентрации форм ледового воздействия на дно (затронуто более 50 % дна) отмечены в северной части центральной котловины моря, тяготеющей к ней части северной равнины, а также на южной периферии современной акватории Западного Арала. Несколько меньшее покрытие бывшего дна формами ледовой экзарации (30-50 %) отмечается в центральной части центральной котловины, западной части северной равнины и северной части наклонной равнины. Зоны со средней концентрацией форм (20-30 %) тяготеют к о. Возрождения или примыкают к зонам высокой концентрации с запада, к ЮВ от о. Барсакельмес. Зоны пониженной концентрации (10-20 %) обрамляют зоны высокой концентрации в центральной котловине с юга, запада и востока, а также зону высокой концентрации на Западном Арале с юга. Южная часть котловины Западного Арала, тяготеющие к центральной котловине части наклонной равнины и северная часть северной равнины (у о. Кокарал) покрыты следами ледовых воздействий в наименьшей степени (менее 10 %).

- Для северной части моря характерна наихудшая сохранность ледово-экзарационного рельефа, относительно большая ширина борозд и четкая

ориентация их по ветру. Для центральной части, напротив, характерна хорошая выраженность ледово-эскарационных борозд – следствие их хорошей сохранности, – и наименьшая ширина борозд среди всех районов. Для южной части моря характерны средняя ширина единичных борозд и крупные и длинные системы борозд, редко встречающиеся в других районах. Также для этого района типичен сложный характер строения гребенок борозд, указывающий на перестроение ледяных торосистых образований в процессе эскарации.

- До 1960 года формирование ледово-эскарационного рельефа происходило преимущественно на глубинах до 5 м в прибрежных зонах акватории. До начала 1970-х годов падение уровня моря не изменяло ход ледовых процессов. С начала 1970-х годов скорость падения уровня увеличилась, что при сохраняющихся ледовых условиях и интенсивности эскарации, способствовало лучшей сохранности микрорельефа и формированию участков дна с относительно большой концентрацией борозд выпахивания. С середины 1980-х сокращение акватории и уменьшение теплозапаса начало приводить к ужесточению ледовых условий. В это время формировалась основная масса ледово-эскарационных борозд, лучшей сохранности которых способствовало практическое отсутствие волновой переработки на восточном побережье и доминирование северо-восточных ветров. К концу 1980-х – середине 1990-х годов зона наиболее интенсивной эскарации, достигла центральной части акватории. В этот момент создались лучшие условия для формирования и сохранения ледово-эскарационного рельефа на дне моря. С середины 1990-х до середины 2000-х годов в центральной части котловины Восточного Арала и на юго-восточном побережье Западного Арала сохранялись условия для формирования ледово-эскарационного рельефа, однако интенсивность его формирования снизилась из-за увеличения солености и сокращения зеркала воды. В конце 2000-х эскарация дна практически прекратилась.

- По результатам анализа авиаразведочных работ, проводившихся в советское время, и современных спутниковых данных установлено положение зон разной интенсивности ледовой эскарации дна Каспийского моря. В суровые зимы площадь ледовых воздействий минимальна. В мягкие зимы площадь зоны интенсивной эскарации расширяется, однако в целом интенсивность эскарационных процессов заметно снижается. В то же время в мягкие зимы припайные льды более мягкие и ломкие, что способствует лучшему торошению в зоне припая. Это говорит о том, что интенсивность ледово-эскарационных процессов в зоне припая в последние годы возрастает, что обеспечивает большую интенсивность эскарации дна в этой зоне по сравнению с умеренными и суровыми зимами. Несмотря на смягчение климатических показателей, интенсивность эскарации дна на Северном Каспии не снижается. Наибольшая интенсивность наблюдается в умеренные зимы, но в мягкие зимы интенсивность также высока.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, включенных в базы Scopus, WoS и RSCI:

1. **Maznev S.V.**, Ogorodov S.A. Ice scours on the exposed bottom of the Aral Sea // Conference Proceedings 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. — Vol. 18 of 1.1. — Albena, Bulgaria Sophia, 2018. — P. 181–187. doi: 10.5593/sgem2018/1.1
2. Огородов С.А., **Мазнев С.В.**, Бухарицин П.И. Ледово-эскарационный рельеф на дне Каспийского и Аральского морей // Известия Русского географического общества. — 2019. — Т. 151, № 2. — С. 35–50. doi: 10.31857/S0869-6071151235-50 (IF = 0,822)
3. **Maznev S.V.**, Ogorodov S.A., Baranskaya A.V., Selyuzhenok V.V. Aral Sea ice conditions in the second part of the 20th century and their effect on the bottom topography // Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC. — 2019. — P. 1-10.
4. **Maznev S.V.**, Ogorodov S.A., Baranskaya A.V., Vergun A.P., Arkhipov V.V., Bukharitsin P.I. Ice-gouging topography of the exposed Aral Sea bed // Remote Sensing. — 2019. — Vol. 11, no. 2. — P. 1–25. doi:10.3390/rs11020113 (IF = 4,509)
5. Ogorodov S.A., Magaeva A.A., **Maznev S.V.**, Yaitskaya N.A., Vernyayev S., Sigitov A., Kadranov Y. Ice Features Of The Northern Caspian Under Sea Level Fluctuations And Ice Coverage Variations // GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY. — 2020. — 13 (3). — 129-138. doi: 10.24057/2071-9388-2020-77 (IF = 0,286)
6. **Мазнев С.В.**, Огородов С.А. Воздействие ледяных образований на берега и дно мелководных морей и крупных озер умеренных и субарктических широт // Лед и снег. 2020. — Т. 60. — № 4. — С. 578-591. doi: 10.31857/S2076673420040062 (IF = 1,292)

Иные публикации:

7. **Мазнев С.В.** Ледово-эскарационный рельеф на осушенном дне Аральского моря // ЛОМОНОСОВ-2018. Сборник тезисов XXV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — География. — Москва, 2018.
8. **Мазнев С.В.**, Огородов С. А. Ледово-эскарационный рельеф на дне Аральского моря // Материалы XXXVI Пленума геоморфологической комиссии Российской Академии Наук. — Издательство Алтайского государственного университета Барнаул, 2018. — С. 232–243.
9. **Мазнев С.В.** Воздействия льдов на берега и дно акваторий в умеренной климатической зоне северного полушария // Сборник материалов 12-ой международной школы-конференции Меридиан / Ред. Медведев А.А., Кладовщикова М.Е.— ИГ РАН Москва, 2019. — С. 96.

10. **Мазнев С.В.**, Мазнева Е.А., Огородов С.А. Донные отложения Аральского моря как фактор формирования ледово-экзарационного рельефа // ГЕОЛОГИЯ МОРЕЙ И ОКЕАНОВ Материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии Москва, 18–22 ноября. — Т. 5. — Москва, 2019. — С. 188–191.
11. **Мазнев С.В.**, Огородов С.А., Бухарицин П.И. Воздействия морских льдов на берега и дно Каспийского и Аральского морей // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов («Опасные явления»): материалы Международной научной конференции (г. Ростов-на-Дону, 13-23 июня 2019 г.) – Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2019, с. 172-175.
12. Магаева А.А., Огородов С.А., **Мазнев С.В.**, Яицкая Н.А., Верняев С., Сигитов А., Кадранов Е. Ледяные торосистые образования Северного Каспия в условиях колебания уровня и ледовитости // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов (Опасные явления – II): материалы II Международной научной конференции. — ЮНЦ РАН Ростов-на-Дону, 2020. — С. 177–181.
13. **Мазнев С.В.**, Вергун А.П., Огородов С.А. Морские льды как фактор формирования рельефа дна Каспийского моря // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы V Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Калининград, 18–22 мая 2020 г. [Электронный ресурс]. — Калининград: АО ИО РАН, 2020. — С. 332-333.
14. **Maznev S.**, Magaeva A., Ogorodov S., Yaitskaya N. Ice gouging conditions of the Northern Caspian depending on the severity of winters // Proceedings of the 25th International Symposium on Ice. International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR). Trondheim, Norway, 23rd – 25th November 2020— 2020. — P. 935-943.
15. **Мазнев С.В.**, Огородов С.А. К вопросу о генезисе линейных форм на бывшем дне Аральского моря // VIII Щукинские чтения: рельеф и природопользование. Материалы Всероссийской конференции с международным участием, г. Москва, 28 сентября-1 октября 2020 г. Москва: Географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, 2020. — С. 694–698.
16. **Мазнев С.В.**, Огородов С.А. Особенности ледовых воздействий в Арктике и умеренных широтах // Труды IX Международной научно-практической конференции Морские исследования и образование (MARESEDU-2020) — Т. 3. — Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2020. — С. 170–172.