МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Новикова Анна Владиславовна

МОРФОЛОГИЯ И ДИНАМИКА ТЕРМОАБРАЗИОННЫХ БЕРЕГОВ КАРСКОГО МОРЯ

1.6.14 Геоморфология и палеогеография
(25.00.25 Геоморфология и эволюционная география)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в научно-исследовательской лаборатории геоэкологии Севера географического факультета МГУ 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 – ***Большиянов Дмитрий Юрьевич***
доктор географических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»

Лейбман Марина Оскаровна
доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник ФГБУН ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН «Институт криосферы Земли»

Дворников Юрий Александрович
кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов»

Защита диссертации состоится «19» мая 2022 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.4 (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 «12» апреля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МГУ.016.4 (МГУ.11.04),
кандидат географических наук  Е. Ю. Матлахова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Около 34% берегов Мирового океана находится в пределах криолитозоны Северного полушария Земли; будучи на значительном протяжении сложенными многолетнемерзлыми породами, они крайне динамичны: в среднем для них характерно отступание со средней скоростью 0,5 м/год [Lantuit et al., 2012]. С начала XXI века на многих участках отмечается ускорение отступания абразионных берегов и даже активизация отступания берегов ранее стабильных и аккумулятивных [Mars & Houseknecht, 2007; Jones et al., 2009; Farquharson et al., 2018; Irrgang et al., 2018 и другие]. Это связывают с глобальным потеплением климата, проявляющемся в Арктическом регионе особенно интенсивно [IPCC, 2019 и другие]. Рост среднегодовых температур воздуха, увеличение продолжительности безледного периода, увеличение длины разгона волн способствуют активизации береговых процессов, опасных для хозяйственной деятельности человека [Павлидис, Леонтьев, 2000; Разумов, 2000; Atkinson, 2005; Григорьев и др., 2006; Огородов, 2011; Meyssignac & Cazenave, 2012; Savo et al., 2016; Barber et al., 2017; Shabanova et al., 2018 и другие].

В Карском море преобладают берега абразионного типа, при этом около 20% протяженности береговой линии занимают термоабразионные берега, отступающие со скоростью 0,5-2,5 м/год [Васильев и др., 2006; Экологический атлас..., 2016]. В последние десятилетия в Печорско-Карском регионе и в других районах Арктики ведется активное строительство нефтегазовой инфраструктуры, неизбежно сопровождающееся негативными воздействиями на окружающую среду. Техногенные воздействия приводят к нарушению хода естественных береговых процессов и усилению темпов термоабразии; в свою очередь, термоабразия может представлять опасность для инженерных объектов [Огородов, 2004; Ogorodov, 2005; Radosavljevic et al., 2016].

Существующие исследования динамики берегов Карского моря имеют в основном локальный характер и приурочены, главным образом, к участкам хозяйственного освоения [Кизяков и др., 2006; Камалов и др., 2006; Васильев и др., 2011; Ogorodov et al., 2016], а проведенные классификации [Каплин и др., 1991; Васильев и др., 2006; Экологический атлас…, 2016] основаны на анализе статичных материалов (карты, снимки за один временной период) или экспертной оценке, что не дает полного представления о

пространственном распределении и реальных скоростях отступания берегов различных типов (включая термоабразионные) на значимо длительном промежутке времени.

Таким образом, актуальность исследования определяется необходимостью развития существующих фундаментально-научных представлений о динамике берегов в криолитозоне на фоне глобальных изменений. Также актуальной задачей является совершенствование методов мониторинга береговой зоны арктических морей для обеспечения безопасного строительства и функционирования инженерной инфраструктуры.

Цель работы – выявить основные морфодинамические характеристики термоабразионных берегов Карского моря на фоне современных (за последние 50 лет) изменений окружающей среды и климата.

Задачи исследования:

1) Анализ литолого-геоморфологических, мерзлотных и гидрометеорологических условий как факторов, определяющих динамику берегов Карского моря, на основе литературных источников и полевых материалов;

2) Сегментация береговой линии материкового побережья Карского моря по морфогенетическому строению и динамике по результатам дешифрирования разновременных данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ), анализа литературных источников и материалов полевых исследований;

3) Характеристика геоморфологического строения и динамики термоабразионных берегов ключевых участков Карского моря и расчет скоростей отступания/выдвижения береговой линии за разные временные периоды, на основе дешифрирования аэрокосмических материалов и данных полевых исследований;

4) Качественная оценка влияния литолого-геоморфологических, мерзлотных и гидрометеорологических условий, а также техногенного воздействия на пространственную и временную изменчивость динамики термоабразионных берегов Карского моря.

Объектом исследования являются берега Карского моря (на участке материкового побережья), сложенные преимущественно мерзлыми

дисперсными грунтами; **предметом** исследования является их морфология и динамика.

В геоморфологии под понятием *берег* понимают полосу суши, на которой имеются формы рельефа и накопления наносов, созданные морем при его среднемноголетнем уровне, и испытывающую воздействие современного волнения [Морская геоморфология..., 1980; Каплин и др., 1991]. Берега, сложенные многолетнемерзлыми дисперсными породами и разрушающиеся в результате волнового и термического воздействия, называют *термоабразионными* [Арэ, 1980; Морская геоморфология..., 1980; Жигарев, 1997]. Несмотря на то, что целью работы было изучение берегов термоабразионного типа, в диссертации проведены дешифрирование и классификация по морфогенетическому и динамическому признакам всей береговой линии материкового побережья Карского моря, с целью выявления закономерностей распространения, геоморфологического строения и динамики термоабразионных берегов и понимания роли термоабразии в формировании береговой линии Карского моря в целом.

Под *морфологией* рельефа понимают его внешний облик, совокупность морфографических (качественных) и морфометрических (количественных) характеристик, описывающих его геоморфологическое строение [Рычагов, 2006]. *Динамикой* береговой зоны называется совокупность локализованных в ней процессов и явлений, обусловливающих ее развитие [Морская геоморфология…, 1980].

Временной диапазон настоящего исследования охватывает последние около 50 лет (начиная с 1960-х по 2010-е гг.). Временные ограничения связаны с особенностями методики исследования, которая основана, в первую очередь, на анализе разновременных космических снимков, первые из которых были получены в 1960-е гг. Однако данный период крайне интересен для исследования динамики арктических берегов, так как как раз охватывает временной интервал, на протяжении которого произошли существенные изменения климата в Арктическом регионе (начиная с примерно 1970-х гг. [Shabanova et al., 2018; IPCC, 2019]), а также активизировалось нефтегазовое освоение на побережье Карского моря (начиная с 2000-х гг.), что не могло не оказать определенного влияния на динамику берегов региона.

Фактический материал, личный вклад автора. Автор принимал участие в экспедициях на Уральский и Ямальский берега Байдарацкой губы, на западное побережье п-ова Таймыр (район Диксона) и на западное побережье Гыданского п-ова (терминал Утренний), где проводил полевые исследования геологического, геоморфологического и мерзлотного строения местности, а также участвовал в проведении геодезических съемок местности при помощи тахеометра, ГНСС-приемников и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Анализ материалов, полученных в данных экспедициях, а также в экспедициях коллег на остальные ключевые участки исследования, проведенный автором, позволил получить данные о рельефе местности на отдельные временные срезы, а также оценить влияние геолого-геоморфологических условий на динамику берегов.

Автором проведены обработка, привязка и анализ разновременных ДДЗЗ как на регион в целом, так и на отдельные ключевые участки: аналоговые и цифровые космические снимки, приобретенные у дистрибьюторов и из открытых источников, фондовые аэрофотоснимки (АФС), изображения, полученные в результате съемки БПЛА, региональные (ArcticDEM) и локальные (созданные самостоятельно по данным съемки с БПЛА) цифровые модели местности (ЦММ). По результатам анализа этих данных автором составлены карты морфологии и динамики ключевых участков и всего материкового побережья Карского моря, получены выводы о влиянии различных факторов природной среды на изменения динамики данных берегов за последние около 50 лет.

Методология. Работа основывается главным образом на дешифрировании различных разновременных ДДЗЗ, которые, при этом контролируются полевыми исследованиями. По снимкам дешифрируется положение береговой линии за разные временные периоды, рассчитываются скорости отступания/выдвижения берега. По снимкам, полевым материалам, фондовым гидрометеорологическим данным и результатам предыдущих исследований описываются природные условия и оценивается их влияние на характер термоабразии и других береговых процессов.

Научная новизна работы:

1) В работе дана детальная характеристика геоморфологического строения и динамики берегов восьми ключевых участков, причем для пяти из них (залив Крузенштерна, западный и восточный берега острова Белый,

терминал Утренний и бухта Лемберова) подобные исследования проведены впервые, для остальных трех (Уральский и Ямальский берега Байдарацкой губы и Харасавэй) данные предыдущих исследований динамики берегов были обобщены и существенно уточнены, ряд наблюдений продлен до современного периода за счет применения новейших ДДЗЗ.

2) Впервые проведен анализ динамики берега за последние около 50 лет на все материковое побережье Карского моря путем сопоставления архивных снимков KH Corona 1960х гг. и мозаик современных снимков с открытых серверов Google Earth, Яндекс карты и ESRI ArcGIS 2010х гг., на основе чего составлена карта морфогенетических типов и динамики берегов на данную территорию, получены примерные количественные величины отступания/выдвижения берегов за данный временной период, оценена их точность.

3) Для части ключевых участков (Ямальский берег Байдарацкой губы и бухта Лемберова) впервые проведены исследования с применением БПЛА, получены сверхвысокодетальные (2-5 см) изображения местности и ЦММ, что позволило существенно уточнить данные по геоморфологическому строению и продлить ряд наблюдений за динамикой берегов до современного периода для данных участков.

4) Для части ключевых участков (Уральский и Ямальский берега Байдарацкой губы, залив Крузенштерна) впервые проведены расчеты отступания/выдвижения берегов в объемных величинах, с применением ArcticDEM и ЦММ, полученных по съемке с БПЛА, что представляет более достоверную и наглядную картину динамики берегов, так как учитывает объем размываемых/накапливаемых отложений.

5) Проведено сопоставление множества различных по своему строению ключевых участков, что позволило изучить все основные типы берегов Карского моря и оценить влияние основных природных и антропогенных факторов на динамику берегов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Анализ разновременных космических снимков за последние 50 лет показал, что 40% протяженности береговой линии материкового побережья Карского моря в настоящее время испытывает отступание, 3% - выдвижение, 57% остается стабильной. При этом, установлено, что современная динамика

берега на значительном протяжении (около 35% береговой линии) не соответствует его морфогенетическому типу.

2) Среди исследованных ключевых участков Карского моря наиболее высокие среднемноголетние скорости отступания получены для термоабразионных берегов, сложенных высокольдистыми отложениями с выходами подземных льдов и подверженных воздействию ветровых волн открытого моря: западное (1,2 м/год) и восточное (1,9 м/год) побережья о. Белый; Уральский берег Байдарацкой губы (1,2 м/год); западное побережье Ямала в районе пос. Харасавэй (1,1 м/год).

3) На побережье Карского моря с начала XXI века установлена тенденция к ускорению отступания термоабразионных и активизации размыва аккумулятивных берегов, что связано с ростом волнового и термического воздействия и, на отдельных участках - с началом активного хозяйственного освоения.

Степень достоверности полученных результатов может быть оценена путем сопоставления с результатами аналогичных работ по исследуемому региону за схожие временные периоды, но полученными другими исследователями с помощью других методов: в целом, полученные карты типов берегов и рассчитанные величины скоростей отступания берегов согласуются с данными других исследователей [Васильев и др., 2006; Камалов и др., 2006; Lantuit et al., 2012; Ogorodov et al., 2016 и другие работы]. Достоверность полученных результатов подтверждается публикацией девяти статей по теме диссертации в рецензируемых научных журналах, рекомендованных аттестационной комиссией МГУ, в том числе восьми статей в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science.

Практическая значимость исследования. Результаты исследования, а именно карты морфологии и динамики берегов, рассчитанные скорости перемещения береговой линии и анализ факторов динамики берегов имеют большую практическую ценность, так как являются основой для прогноза развития берегов, необходимого при инженерных изысканиях под строительство промышленных объектов в береговой зоне. Выявление фактического антропогенного воздействия на берега – основа оценки воздействия на окружающую среду при дальнейшем хозяйственном освоении. Предложенная методика и часть результатов исследования

используются в проектах берегового мониторинга, проводимых нефтегазовыми компаниями «Total» и «Новатэк».

Апробация. Результаты работы докладывались и обсуждались на многочисленных российских и международных конференциях и семинарах: 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (Москва, 2021), Международная научная конференция «Опасные явления» (Ростов-на-Дону, 2019, 2021), конференция «Арктические берега: путь к устойчивости» (Мурманск, 2018), 15th International Circumpolar Remote Sensing Symposium (Potsdam, Germany, 2018), 18th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2018 (Албена, Болгария, 2018), 5th European Conference on Permafrost (Chamonix, France, 2018), Pushchino Permafrost Conference Earth's Cryosphere: Past, Present and Future (Пущино, 2017), XXIV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2017» (Москва, 2017), 8th International Siberian Early Career GeoScientists Conference (Новосибирск, 2016).

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 работа, в том числе 8 - в изданиях, включённых в базы Scopus, Web of Science и RSCI (из них 2 журнала, которые входят в Q1, по версии Scimago Journal & Country Rank), 1 - в журнале из списка ВАК, 12 - в прочих изданиях. Во всех опубликованных работах вклад автора является определяющим. Постановка задач, получение и анализ материалов, формулировка выводов, оформление статьи проводились либо непосредственно соискателем, либо при его активном участии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы (200 наименований) и приложений (7 карт и 4 таблицы). Материал работы изложен на 179 страницах машинописного текста, содержит 14 таблиц, 59 иллюстраций.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю д.г.н., гл.н.с., проф. РАН С.А. Огородову за организацию и всестороннюю помощь в ходе проведения исследований и подготовки диссертации; коллегам к.г.-м.н. А.И. Синицкому, А.П. Вергуну, В.В. Архипову, д.б.н. В.Э. Федосову, М.Г. Бондарю, И. Корниенко А.С. Авиловой, А.С. Короткову, Е.В. Гостеву, Э.З. Хусаенову за помощь при проведении полевых работ; коллегам к.г.н. А.В. Баранской, к.г.н. Н.Г. Беловой, к.г.н. А.А. Маслакову, Н.Н. Шабановой, к.г.-м.н. Д.М. Алексютиной и всему коллективу

НИЛ геоэкологии Севера за проявленный интерес, помощь, поддержку, консультации и плодотворные обсуждения в ходе подготовки диссертации; Ю.В. Станиловской и компании Total S.A. за организацию стажировки по теме исследования; к.г.н. А.И. Кизякову и к.г.н. А.А. Ермолову за тщательное рецензирование диссертации, ценные замечания и предложения. Автор также благодарен кафедре геоморфологии и палеогеографии за организацию обучения в аспирантуре и процесса написания диссертации; своим однокурсникам, особенно С.В. Мазневу, М.Д. Другову, Д.В. Мишуринскому, Д.В. Баранову, Е.А. Агафоновой, а также к.г.-м.н. Е.А. Зеленину за всевозможную помощь и поддержку в ходе написания диссертации. Исследование выполнено в рамках Программы развития 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 и задачи исследования, описаны объект и предмет исследования (обоснованы понятия берега, береговой зоны, морфологии и динамики берега, термоабразии), кратко объяснена методология, изложена научная новизна, показана практическая значимость исследования, сформулированы защищаемые положения.

Глава 1. Состояние изученности термоабразионных берегов Карского моря

В 1 главе кратко описывается история исследований арктических берегов (раздел 1.1) и, в частности, более детально – берегов Карского моря (раздел 1.4); и дается обобщение основных накопленных к настоящему моменту представлений о процессе термоабразии (раздел 1.2) и о факторах динамики берегов криолитозоны (раздел 1.3).

Исследования береговых процессов арктических морей ведутся начиная с середины 20 в. в СССР [Леонтьев, 1961; Зенкович, 1962; Арэ, 1980] и США и Канаде [Reimnitz, Barnes, 1974; Barnes, Reimnitz, 1979; Hopkins,

Hartz, 1978; Barnes et al., 1988]. В начале 2000-х гг. исследования динамики арктических берегов объединяются вокруг международного проекта ACD (Arctic Coastal Dynamics), что способствует обмену опытом и технологиями и развитию новых методик мониторинга динамики берегов. Появляются работы, в которых количественно оцениваются скорости отступания термоабразионных берегов, на основании чего дается прогноз их дальнейшего развития [Васильев и др., 2006; Григорьев, 2008; Огородов, 2008; Разумов, 2000; Atkinson, Solomon, 2003; Jones et al., 2009; Tweedie et al., 2012 и другие].

Детальные исследования строения и динамики берегов проводились на множестве ключевых участков берегов Карского моря, таких как Югорский полуостров в районе урочища Шпиндлер и Амдермы, берега Байдарацкой губы, берега Западного Ямала в районе полярной станции Марре-Сале и поселка Харасавэй (рис. 1). По результатам инструментальных наблюдений, дешифрирования аэрокосмических материалов, полевых геокриологических исследований оцениваются скорости отступания берегов и анализируются факторы, определяющие изменение скоростей отступания. Однако данные исследования, как правило, описывают отдельные ключевые участки, тогда как в настоящей работе проведено обобщение данных по множеству ключевых участков Карского моря, в том числе приводятся сведения по новым ключевым участкам, для которых ранее подобных исследований не проводилось. В большинстве случаев временной диапазон исследований ограничен первыми десятками лет; тогда как настоящее исследование охватывает период в ~50 лет (с 1960-х гг. до 2010-х), в частности, имеющиеся ряды наблюдений продлены до современного периода (до 2016–2020 гг.), по которому практически не имеется опубликованной информации и который, однако, характеризуется существенными изменениями динамики берегов.

Несмотря на хорошую изученность термоабразионных берегов Карского моря, множество вопросов по этой теме остаются открытыми. В первую очередь, они касаются вклада различных факторов (геолого-геоморфологических и климатических) в динамику данных берегов и возможности прогноза их дальнейшего развития в условиях меняющегося климата и возросшей антропогенной нагрузки.

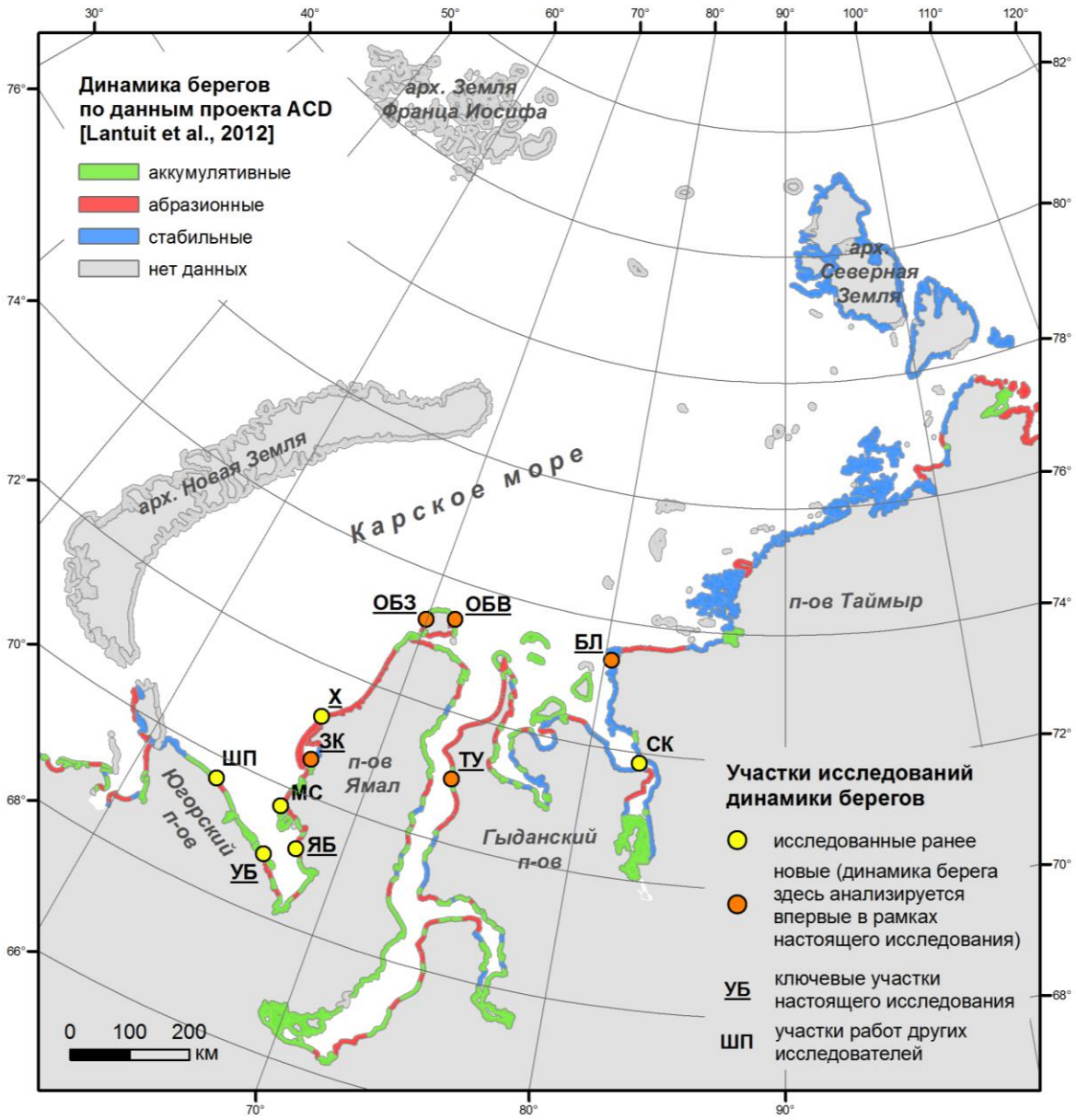


Рис. 1. Участки исследования динамики берегов Карского моря: ШП – урочище Шпиндлер, Югорский полуостров [Лейбман и др., 2000; Кизяков, 2005; Кизяков и др., 2006]; УБ – Уральский берег Байдарацкой губы [Камалов и др., 2006; Ogorodov et al., 2016, Алексютина и др, 2017; Isaev et al., 2019]; ЯБ – Ямальский берег Байдарацкой губы [Камалов и др., 2006; Копа-Овдиенко, Огородов, 2016]; МС – ГМС Марре-Сале, Западный Ямал [Васильев и др., 2011; Крицук и др., 2014]; Х – пос. Харасавэй, Западный Ямал [Совершаев, Камалов, 1992; Белова, Огородов, 2011; Kuznetsov et al., 2016]; СК – м. Сопочная Карга, Западный Таймыр [Стрелецкая и др. 2009]

<u>Ключевые участки настоящего исследования</u>: УБ – Уральский берег Байдарацкой губы [Novikova et al., 2018]; ЯБ – Ямальский берег Байдарацкой губы [Novikova et al., 2018; Novikova et al., 2021]; ЗК – Залив Крузенштерна [Baranskaya et al., 2021]; Х – Харасавэй [Белова и др., 2017; Belova et al., 2020]; ОБЗ – западный берег острова Белый [Baranskaya et al., 2020]; ОБВ – восточный берег острова Белый [Baranskaya et al., 2020]; ТУ – терминал Утренний, западный Гыдан [Ermolov et al., 2021]; БЛ – бухта Лемберова, Западный Таймыр [Novikova et al., 2021].

Глава 2. Физико-географические условия региона

В главе описаны природные условия региона Карского моря, определяющие характер, направленность, скорость термоабразии и других береговых процессов: геолого-геоморфологическое строение (раздел 2.1), гидрометеорологические условия (раздел 2.2), а также коротко приведены виды хозяйственной деятельности человека (раздел 2.3), которая на отдельных участках также оказывает существенное влияние на облик и динамику берега.

Геолого-геоморфологическое строение, а именно преобладание низменных берегов, сложенных рыхлым преимущественно песчаным и/или суглинистым материалом, повсеместное распространение высокольдистых многолетнемерзлых пород, включения пластовых и жильных льдов определяют высокий потенциал развития термоабразии в исследуемом регионе.

Холодный климат региона обуславливает длительный 9–10-месячный период «консервации» береговой зоны от воздействия основных рельефообразующих процессов. Большая часть геоморфологических процессов активизируются в короткий летний период, когда действуют такие агенты рельефообразования, как морское волнение и тепло; однако эти процессы крайне интенсивны. Сильные ветра, направленные к берегу, и вызванные ими высокие волны, а также сгонно-нагонные колебания уровня моря играют значительную роль в разрушении морских берегов. Повторяемость штормов и нагонов, в ходе которых удаляется основное количество материала, разрушенного термическими процессами, - один из основных факторов отступания берегов Карского моря. При этом с увеличением продолжительности безледного периода в последние

десятилетия наиболее интенсивные осенние шторма стали попадать на безледный период, что усилило ветро-волновое воздействие на берега.

Активно развивающееся в регионе в последние десятилетия хозяйственное освоение, подразумевающее масштабную переработку береговых ландшафтов и нарушающее естественный ход береговых процессов, может способствовать усилению неблагоприятных береговых процессов, таких как термоабразия, термоэрозия, термокарст и другие.

Глава 3. Методика исследований

Исследование основано на применении разновременных ДДЗЗ, полевых описаниях геоморфологического, геологического и мерзлотного строения берегов ключевых участков, и съемке БПЛА на отдельных участках (рис. 2). Применение ДДЗЗ для исследования арктических регионов особенно актуально в связи с их значительной удаленностью от основной полосы расселения и труднодоступностью для непосредственного наблюдения, тем более при необходимости многолетних исследований. Описаны предыдущий опыт применения ДДЗЗ для исследования арктических берегов (раздел 3.1); данные ДЗЗ, использованные в исследовании, процесс их обработки и геопривязки, дешифрирование береговой линии (раздел 3.2); методика расчета скоростей отступания/выдвижения береговой линии и погрешностей полученных скоростей (раздел 3.3); полевые работы (раздел 3.4); применение БПЛА (раздел 3.5.); анализ вклада различных факторов в динамику берегов (раздел 3.6) (рис. 3).

При исследовании динамики берегов ключевых участков для периода 1960-х гг. применяются аналоговые архивные космоснимки Corona KH-4, для 1980-х гг. – советские архивные АФС, для периода после 2000-х гг. – цифровые космоснимки QuickBird, WorldView-1,2,3, ALOS PRISM, GeoEye-1. Для последних лет для двух участков получены изображения с БПЛА. Также для получения данных о рельефе, ортотрансформации снимков и расчета объемных скоростей применяется свободно распространяемая ЦМР ArcticDEM [ArcticDEM] с пространственным разрешением до 2 м, построенная по стереопарам снимков дистрибьютора DigitalGlobe. Для мелкомасштабного картографирования морфодинамики берегов Карского моря были сопоставлены снимки Corona KH-4 1960-х гг., приобретенные

(USGS) на большую часть материкового побережья Карского моря, где таковые имелись достаточного разрешения и качества; и снимки с веб-сервисов Google Earth, Яндекс Карты и ESRI ArcGIS 2010-х гг. Для участков, для которых не имеется снимков Corona, оценка динамики была проведена с использованием данных проекта Google Earth Engine Timelapse [Google Earth...], где представлены ежегодные снимки начиная с 1984 по 2020 гг.

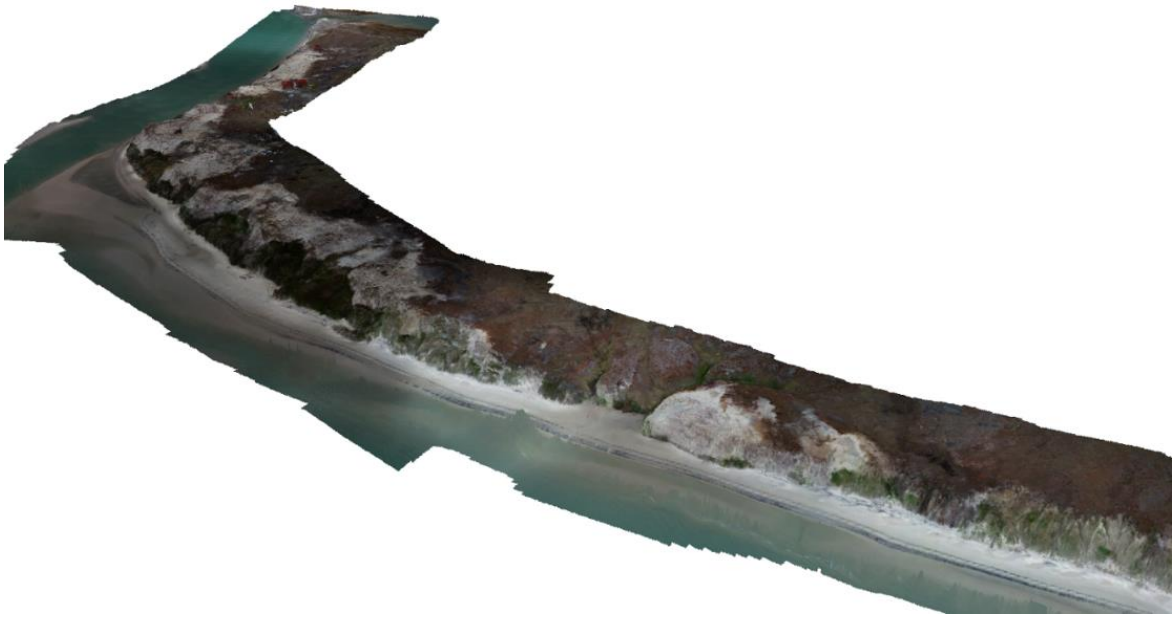


Рис. 2. ЦММ, драпированная ортофотопланом, по стереосъемке с БПЛА 2018 г., термоабразионный участок Ямальского берега Байдарацкой губы, к югу от р. Яраяха



Рис. 3. Изменение линейных и объемных скоростей отступания берега и геоморфологического (высота берегового уступа) и мерзлотного (наличие пластовых льдов) факторов, залив Крузенштерна. По оси x показаны номера профилей, проведенные через каждые 500 м с севера на юг [Baranskaya et al., 2021]

Глава 4. Морфогенетические типы и динамика берегов Карского моря

В главе описывается составленная на основе анализа разновременных ДДЗЗ, собственных полевых материалов и литературных источников, карта морфогенетических типов и динамики берегов материкового побережья Карского моря (масштаб листов от 1 : 1 000 000 до 1 : 6 000 000, рис. 4): обосновывается проведенная классификация берегов (раздел 4.1), анализируются морфогенетическое строение (раздел 4.2) и динамика берегов за последние около 50 лет (раздел 4.3).

Среди выделенных морфогенетических типов берегов Карского моря наиболее распространены термоабразионные (27%) и низменные лайдовые (к которым так же отнесены лагунные и дельтовые, 26%) берега, несколько менее развиты аккумулятивные пляжевые (21%) и абразионно-термоденудационные (20%) берега; наименее развиты абразионные скальные (6%).

За последние около 50 лет большая часть берегов (57%) не проявила сколь либо существенной динамики и отнесена к стабильному динамическому типу. Это, в первую очередь, скальные берега, большая часть (около 62%) аккумулятивных типов (пляжевые и лайдовые), а также существенная часть (~45%) абразионных типов (термоабразионные и абразионно-термоденудационные). Лишь 3% берегов испытывали выдвижение береговой линии: это часть аккумулятивных пляжевых и лайдовых берегов. Около 40% берегов отступали, при этом около 5 % - со скоростями более 2 м/год. Это большая часть (55%) абразионных берегов, но также и существенная часть (32%) аккумулятивных.

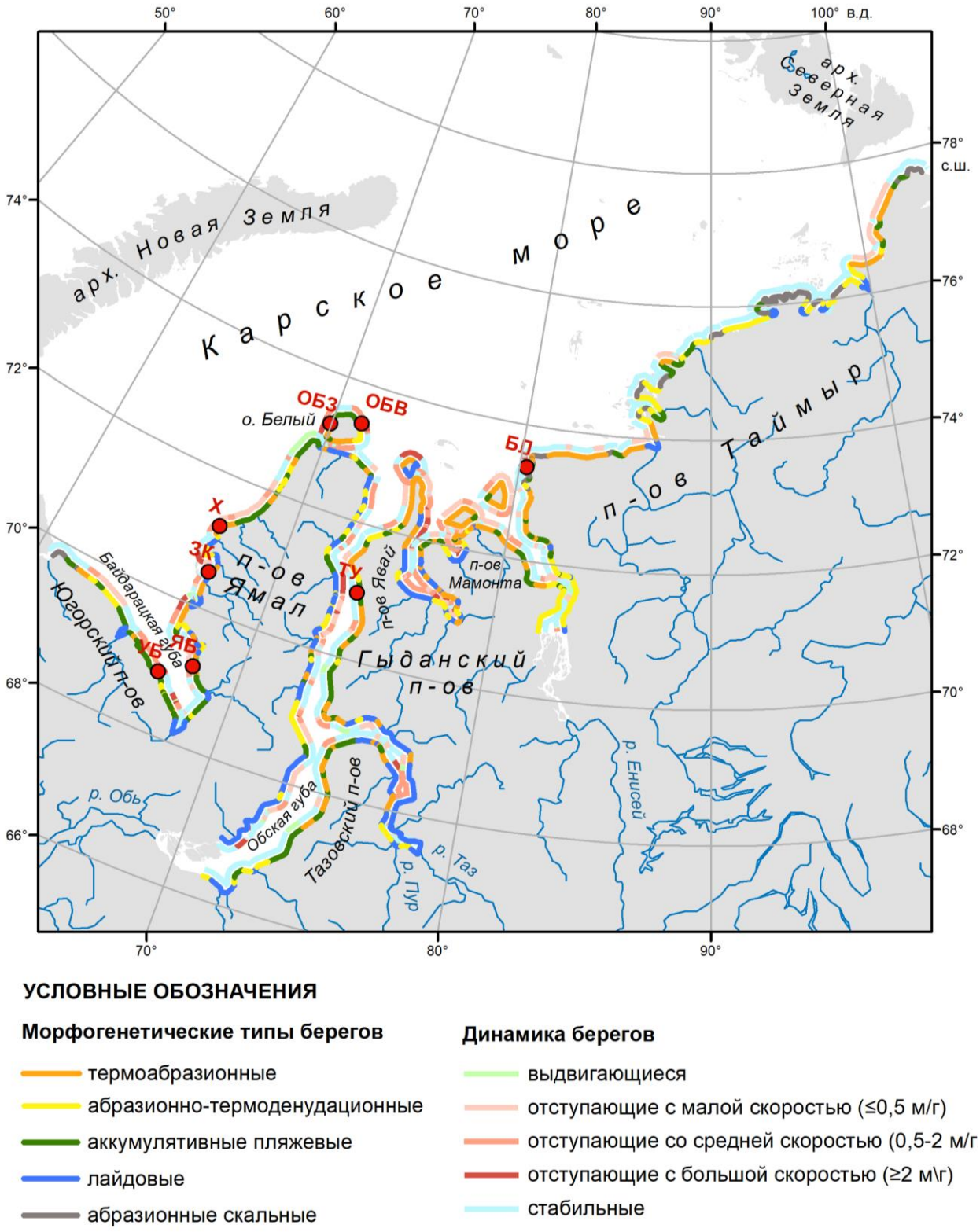
Термоабразионные берега развиты, главным образом, на открытых морских побережьях с интенсивным волновым и термическим воздействием (рис. 4): на западе Ямала, на западе Тазовского полуострова, на западе и севере Гыданского полуострова, на западе и севере Таймыра на участках, сложенных рыхлыми отложениями, на островах приматериковой части Карского моря, сложенных рыхлыми отложениями. Среди термоабразионных берегов около 69% отступали в последние десятилетия, причем 8% - со скоростями более 2 м/год. Наибольшее отступание отмечено на западе Ямала к северу от полярной станции Марре-Сале (около 2 м/год), на западном (около 2,5 м/год) и восточном (около 4 м/год) побережьях о. Белый, на

восточном побережье Ямала к югу от устья р. Вэнуймуёха (более 2 м/год), на севере о. Шокальского (около 2,5 м/год), на восточном побережье п-ова Явай между устьями р. Ямбсаляяха и Нёляко-Варкутаяха (около 2,5 м/год), на восточном побережье Юрацкой губы (около 2,2 м/год).

Глава 5. Морфология и динамика ключевых участков берегов Карского моря

В главе описаны основные результаты исследований геоморфологического строения и динамики берегов за разные временные периоды (начиная с 1960-х гг.) восьми ключевых участков берегов Карского моря: Уральский (раздел 5.1) и Ямальский (раздел 5.2) берега Байдарацкой губы, залив Крузенштерна (раздел 5.3) (рис. 5), Харасавэй, Западный Ямал (раздел 5.4), западный и восточный берега острова Белый (раздел 5.5), терминал Утренний на западном побережье Гыдана (раздел 5.6), бухта Лемберова на западном побережье Таймыра (раздел 5.7).

Большая часть участков (за исключением аккумулятивного берега в районе терминала Утренний и аккумулятивных частей Уральского и Ямальского берегов Байдарацкой губы, залива Крузенштерна и острова Белый) представляет собой термоабразионные берега с той или иной степенью выраженности термоабразионного процесса. Это, как правило, высокие (от 5 м на о. Белый до 35 м в заливе Крузенштерна и на Ямальском участке) береговые уступы позднеплейстоценовых морских террас, сложенные песчаными и/или суглинистыми отложениями, местами с наличием пластовых и/или жильных льдов, с термоденудационными цирками и оврагами, блоками отседания и оползания у подножья уступа. Местами (на Уральском берегу) термоабразия затрагивает низменные (до 1 м) лайдовые берега, сложенные суглинисто-песчаными отложениями с жильными льдами. В наибольшей степени термоабразия развита на низменных льдистых берегах о. Белый (скорости отступания за период 1969-2016 гг. составили до 4,4 м/год), на участках выхода пластовых льдов залива Крузенштерна (1,6 м/год за период 1964-2019 гг.) и Уральского берега (1,2 м/год за период 1964-2016 гг.), и в пределах распространения сильнольдистых суглинков Харасавэйского участка (до 2-3 м/год за период 1964-2016 гг.).



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Морфогенетические типы берегов

- термоабразионные
- абразионно-термоденудационные
- аккумулятивные пляжевые
- лайдовые
- абразионные скальные

Динамика берегов

- выдвигающиеся
- отступающие с малой скоростью (≤0,5 м/г)
- отступающие со средней скоростью (0,5-2 м/г
- отступающие с большой скоростью (≥2 м\г)
- стабильные

Рис. 4. Карта морфогенетических типов и динамики берегов Карского моря (материковое побережье). Красными точками показаны ключевые участки исследования (рис. 1, табл. 1)

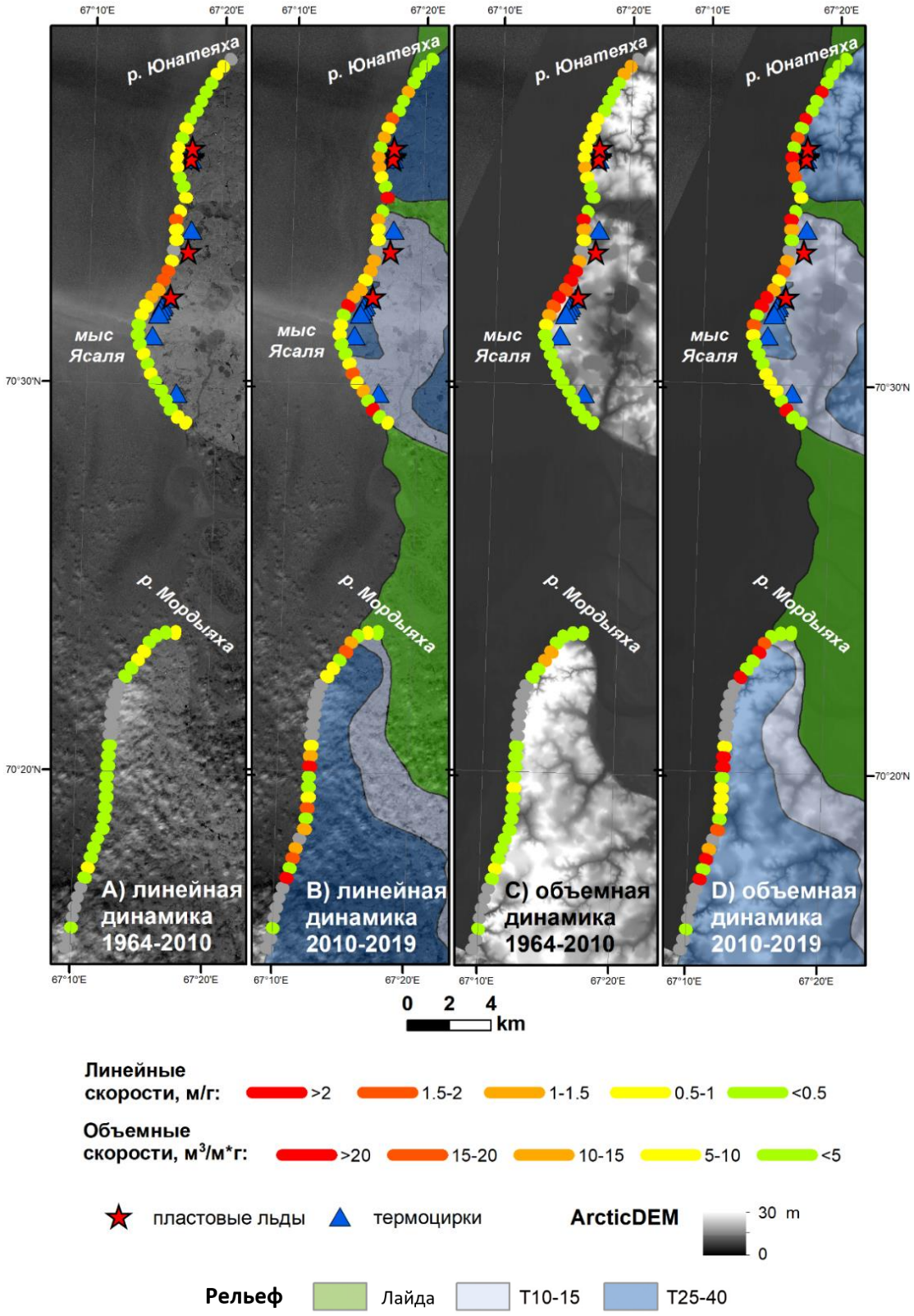


Рис. 5. Скорости отступания берега залива Крузенштерна [Baranskaya et al., 2021]. Подложка: A, B - космический снимок WV-1, 2010 г.; C, D - ArcticDEM

Часть ключевых участков представлена низменными аккумулятивными пляжевыми (терминал Утренний, северная часть Харасавэйского участка, восточная часть Уральского, центральная часть Ямальского, северо-западное побережье о. Белый) или лайдовыми (центральная часть Уральского берега и центральная часть залива Крузенштерна) берегами. Несмотря на аккумулятивный генезис, значительная часть этих берегов в последние десятилетия испытывает размыв. Так, в районе порта Утренний за период 1972-2020 гг. берег отступал со средней скоростью 1,1 м/год. В центральной части Уральского участка лайдовый берег испытывал максимальные скорости отступания на всем участке – 1,7 м/год за весь период исследований, за период 2005-2012 гг. – 7 м/год. Для лайдового берега Ямальского участка так же характерно активное отступание – до 14 м/год в период 2005-2016 гг.

При рассмотрении изменения динамики берегов во времени с 1960-х до 2010-х гг. практически на всех ключевых участках отмечается тенденция к усилению отступания термоабразионных берегов (средние скорости за период 2000-2010х гг. в 2-3 раза превышают средние скорости за период 1960-2000х гг.) (рис. 5), а также активизация размыва аккумулятивных берегов, особенно начиная с 2000-х гг. В целом периоды усиленного отступания совпадают с периодами повышенного гидрометеорологического потенциала (ГМП) термоабразии для данных участков, также на некоторых участках отмечается ускорение отступания берега в период их активного хозяйственного освоения.

Глава 6. Основные факторы динамики берегов Карского моря (качественная оценка)

На основе анализа природных условий и динамки берегов Карского моря по обширным собственным и опубликованным ранее другими авторами материалам (табл. 1) оценивается вклад различных факторов в динамику берегов. Действие этих факторов в большинстве случаев сложно и неоднозначно, однако некоторые закономерности все же удается проследить.

Пространственная изменчивость динамики берегов определяется главным образом геоморфологическим, литологическим и мерзлотным строением берегов. Среди геоморфологических факторов важнейшими являются конфигурация береговой линии и экспозиция берега по отношению

к наиболее интенсивному волнению и морфология береговой зоны (морфометрические характеристики подводной части, осушки, пляжа, берегового уступа и аккумулятивных береговых форм). Берега, выходящие к открытому морю, много более подвержены размыву, чем берега заливов и проливов, из-за большей ветро-волновой нагрузки. В краткосрочной перспективе низменные берега отступают быстрее высоких (в линейном измерении), однако со временем разность в скоростях отступания соседних низких и высоких участков может нивелироваться. Быстрее отступают берега более приглубые, с меньшей шириной и большей крутизной пляжа, чем отмелые с узким и пологим пляжем. Криолитологическое строение определяет устойчивость берега к механическому и термическому воздействию морского волнения, положительных температур воздуха и солнечной радиации. Установлено, что на берегах, сложенных многолетнемерзлыми породами, при прочих равных условиях, суглинистые уступы, как правило, размываются быстрее песчаных и гравийных, что связано с их быстрым выносом из береговой зоны волновым потоком и более высокой льдистостью. Высокая льдистость отложений и наличие в них скоплений подземного льда, в целом, благоприятствуют разрушению берегов за счет развития термоденудационных процессов на береговом уступе, ускоряющих отступание бровки уступа, по крайней мере в локальном масштабе и в краткосрочной перспективе.

Анализ изменения термоабразионного процесса со временем (с 1960-х гг.) показывает его усиление для большинства участков исследования (рис. 5). Отмечено начало размыва берегов ранее стабильных или аккумулятивных (в районе терминала Утренний, аккумулятивные берега Уральского и Ямальского берегов), начиная примерно с 2000-х гг. Начиная примерно с 1970-х гг. наблюдается тенденция роста ГМП в регионе, что, по-видимому, ведет к интенсификации береговых и криогенных процессов. Климатический фактор определяет продолжительность термоабразионного процесса в течение года (продолжительность безледного и безморозного периодов), а также во многом – его интенсивность (через ветро-волновую и термическую нагрузку). В наибольшей степени термоабразия развита на берегах, открытых наиболее повторяющимся наиболее сильным ветрам (остров Белый, Уральский берег, Харасавэй). Рассчитанные для большей части ключевых участков величины ГМП за разные временные периоды, в целом,

согласуются с изменениями средних скоростей отступания берегов за эти периоды, однако не всегда. Несовпадение изменения темпов термоабразии и ГМП могут быть связаны с действием других факторов, например, антропогенным.

Табл. 1. Сопоставление среднемноголетних скоростей отступания берегов разных ключевых участков Карского моря (рис. 1). Серым выделены ключевые участки настоящего исследования

Ключевой участок	**ШП**	**УБ**	**ЯБ**	**МС**	**ЗК**	**Х**	**ОБЗ**	**ОБВ**	**ТУ**	**СК**	**БЛ**
Временной период, гг.	1947-2005	1964-2016	1968-2016	1969-2009	1964-2019	1977-2016	1969-2016	1969-2016	1972-2020	н/д	1965-2019
Средняя скорость отступания, м/год	1,6	1,2	0,3	2,0	0,5	1,1	1,9	1,2	1,1	3,0	0,1
Максимальная скорость отступания, м/год	6,3	2,5	1,0	3,0	1,6	3,2	4,1	4,3	2,5	7,0	0,6

Анализ влияния природных факторов на динамику берегов позволил выявить участки аномального развития береговых процессов, обусловленных, судя по всему, хозяйственной деятельностью человека. На многих участках в отдельные временные периоды отмечается усиление размыва берега, что вызвано активным переформированием береговых ландшафтов данных участков в ходе строительства промышленной инфраструктуры. Наибольшее антропогенное воздействие выявлено в районе терминала Утренний, где большая часть участка в той или иной степени переработана и застроена. Здесь отмечается отступание ранее аккумулятивного берега со скоростью до 28,5 м/год в период 2014-2017 гг. Также наибольшее антропогенное воздействие выявлено на Уральском и Ямальском (рис. 5) берегах, где в период хозяйственного освоения (2005-2016 гг.) отмечается усиление размыва берегов в окрестностях промышленных объектов (до 10-15 м/год), и в районе пос. Харасавэй, где отмечается усиление темпов отступания берега до 3,2 м/год в период наиболее интенсивного строительства в 1977-1988 гг.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы исследования. На основе дешифрирования разновременных ДДЗЗ, результатов полевых исследований и анализа опубликованных и фондовых материалов определены особенности геоморфологического строения и динамики термоабразионных берегов Карского моря и оценено влияние различных природных условий на динамику берегов.

- По результатам анализа разновременных ДДЗЗ для материкового побережья Карского моря по морфогенетическому типу выделены 27% берегов как термоабразионные, 20% - абразионно-термоденудационные, 21% - аккумулятивные пляжевые, 26% - лайдовые, лагунные и дельтовые, 6% - абразионные скальные. По оценке динамики за последние около 50 лет 40% берегов отступали, 3% - выдвигались, 57% - оставались стабильными.
- По результатам детального анализа морфодинамики берегов 8 ключевых участков установлено, что максимальные среднемноголетние скорости отступания берега из исследуемых участков характерны для термоабразионных берегов о. Белый (1,9 м/год на восточном побережье, 1,2 м/год на западном), Уральского берега Байдарацкой губы (1,2 м/год) и Харасавея (1,1 м/год), где наиболее развит собственно процесс термоабразии благодаря наличию пластовых/жильных льдов, высокой льдистости отложений, а также подверженности берегов интенсивному ветро-волновому воздействию открытого моря. Высокие средние скорости отступания берега в районе терминала Утренний (1,1 м/год) связаны главным образом с интенсивным антропогенным воздействием в последнее десятилетие. Для берега залива Крузенштерна характерны средние скорости отступания (0,5 м/год), так как здесь развиты пластовые льды, однако ветро-волновое воздействие относительно слабое (закрытый залив). Наиболее стабильны Ямальский берег Байдарацкой губы (0,3 м/год) и берег бухты Лемберова (0,1 м/год), для которых не играют существенной роли ни ветро-волновой, ни геокриологический фактор.
- При рассмотрении изменения темпов термоабразии во времени с 1960-х до 2010-х гг. отмечается явная тенденция к усилению термоабразионного процесса, особенно начиная с 2000-х гг., практически на всех участках, за исключением Харасавэйского, где скорости отступания берега остаются примерно одинаковыми за исследуемый период (около 1 м/год). В целом периоды повышенных скоростей отступания совпадают с

периодами максимального воздействия гидрометеорологических факторов, однако отмечаются некоторые отклонения, по-видимому, связанные с действием других факторов, в частности антропогенного. Так, на Харасавэйском участке максимальные темпы абразии (1,3 м/год) характерны для периода 1977-1988 гг., когда здесь велось наиболее интенсивное строительство промышленной инфраструктуры. Влияние хозяйственного освоения на динамику берега также явно выражено для участков Байдарацкой губы, где скорости отступания берегов существенно возросли в период строительства газопровода, при этом для Уральского участка отмечено, что после завершения строительства (2013-2016) скорости уменьшились несмотря на то, что ГМП оставался довольно высоким в данный период.

Полученные данные вносят вклад в фундаментальные представления о морфологии, динамике и факторах развития термоабразионных берегов, а также могут служить основой для прогноза развития берегов, необходимого при инженерных изысканиях в береговой зоне арктических морей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. **Novikova A.V.**, Vergun A.P., Zelenin E.A., Baranskaya A.V., Ogorodov S.A. Determining dynamics of the Kara Sea coasts using remote sensing and UAV data: A case study // Russian Journal of Earth Sciences. 2021. V. 21. No 3. ES3004.

2. **Novikova A.**, Belova N., Baranskaya A., Aleksyutina D., Maslakov A., Zelenin E., Shabanova N., Ogorodov S. Dynamics of permafrost coasts of Baydaratskaya Bay (Kara Sea) based on multi-temporal remote sensing data // Remote Sensing. 2018. V. 10. No. 1481.

3. Baranskaya A., **Novikova A.,** Shabanova N., Belova N., Maznev S., Ogorodov S., Jones B. The role of thermal denudation in erosion of ice-rich permafrost coasts in an enclosed bay (Gulf of Kruzenstern, western Yamal, Russia) // Frontiers in Earth Science. 2021. V. 8. Article 566227.

4. Ermolov A.A., **Novikova A.V.**, Belova N.G. Dynamics of low-lying accumulative coasts of western Gydan Peninsula in the area of gas development. Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2021, Moscow.

5. Baranskaya A., **Novikova A.**, Shabanova N., Romanenko F. Ogorodov S. Late Quaternary and modern evolution of permafrost coasts at Beliy Island, Kara Sea // Journal of Coastal Research, 2020. Special Issue No. 95. P. 11–15.

6. Belova N.G., **Novikova A.V.**, Günther F., Shabanova N.N. Spatiotemporal variability of coastal retreat rates at Western Yamal Peninsula, Russia, based on remotely sensed data // Journal of Coastal Research. 2020. No. 95. P. 367–371.

7. Aleksyutina D.M., Shabanova N.N., Kokin O.V. Vergun A.P., **Novikova A.V.**, Ogorodov S.A. Monitoring and modelling issues of the thermoabrasive coastal dynamics / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. No. 193. P. 012003.

8. Белова Н.Г., Шабанова Н.Н., Огородов С.А., Камалов А.М., Кузнецов Д.Е., Баранская А.В., **Новикова А.В.** Динамика термоабразионных берегов Карского моря в районе мыса Харасавэй (Западный Ямал) // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 6. С. 85–96.

В журналах из перечня ВАК:

9. Белова Н.Г., Огородов С.А., Шилова О.С., **Новикова А.В.**, Алексютина Д.М. Мониторинг динамики берегов Западного Ямала в районе перехода газопровода Бованенково-Ухта через Байдарацкую губу Карского моря // Проблемы региональной экологии. 2018. № 6.

Прочие публикации:

10. Belova N., Shabanova N., Ogorodov S., Baranskaya A., **Novikova A.**, Aleksyutina D. Coastal erosion at Kharasavey gas condensate field, Western Yamal Peninsula / SPE Russian Technology Petroleum Conference, SPE-191727-18RPTC-MS. 2018. P. 11.

11. Архипов В.В., Огородов С.А., Алексютина Д.М., Баранская А.В., Белова Н.Г., Вергун А.П., Кокин О.В., **Новикова А.В.**, Шабанова Н.Н., Шилова О.С. Термоабразия берегов и экзарация дна как факторы риска строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений в прибрежно-шельфовой зоне Печорского и Карского морей / Материалы конференции «Арктические берега: путь к устойчивости». 2018. Мурманск. С. 10-14.

12. Aleksyutina D., **Novikova A.**, Baranskaya A., Shilova O., Ogorodov S. Using multi-temporal aerial and space imagery for coastal dynamics investigations at Kara and Pechora Seas, Russian Arctic / Conference Proceedings 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2018. V. 18 Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing. Issue 3.2. P. 265–272.

13. Belova N., Abramova A., **Novikova A.**, Shilova O., Baranskaya A. Erosion of permafrost coasts under local human impact, Western Yamal Peninsula, Kara Sea,

Russia / Conference Proceedings 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2018. V. 18 Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing. Issue 5.2. P. 379-386.

14. **Новикова А.В.**, Вергун А.П. Применение беспилотных летательных аппаратов при исследовании динамики арктических берегов (на примере Ямальского берега Байдарацкой губы Карского моря) / Материалы международной научной конференции «Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов» («Опасные явления»). Ростов-на-Дону. 2019. С. 293.

15. **Novikova A.**, Belova N., Baranskaya A., Maslakov A., Aleksyutina D., Shabanova N., Zelenin E., Ogorodov S. Dynamics of permafrost coasts of Baydaratskaya Bay (Kara Sea) based on multi-temporal remote sensing data / Proceedings of 15th International Circumpolar Remote Sensing Symposium. Potsdam, Germany. 2018. P. 21.

16. Belova N. G., Baranskaya A.V., **Novikova A.V.**, Shabanova N.N., Ogorodov S.A. Temporal variability of coastal retreat at Kharasavey area, Western Yamal Peninsula, the Kara Sea. Proceedings of 15th International Circumpolar Remote Sensing Symposium. Potsdam, Germany. 2018. P.16.

17. **Novikova A.**, Ogorodov S., Belova N., Vergun A. Arctic Coastal Dynamics in the Area of Oil and Gas Development based on Satellite Imagery (a Case of Baydaratskaya Bay, the Kara Sea) / Proceedings of 5th European Conference on Permafrost. Chamonix, France. 2018. P.808.

18. **Novikova A.**, Baranskaya A. Influence of massive ice beds on coastal dynamics of the Gulf of Kruzenshtern, Kara Sea / Proceedings of 5th European Conference on Permafrost. Chamonix, France. 2018. P. 790-791.

19. Belova N.G., Aleksyutina D.M., Baranskaya A.V., **Novikova A.V.**, Ogorodov S.A., Shabanova N.N. Ground ice as a factor of coastal dynamics at south-western part of Kara Sea / Proceedings of 5th European Conference on Permafrost. Chamonix, France. 2018. P. 792-793.

20. Belova N., Baranskaya A., Ogorodov S. Kuznetsov D., **Novikova A.**, Kamalov A., Overduin P., Lantuit H. Permafrost coastal contribution to the carbon flux to Kara Sea, Kharasavey settlement, West Yamal / Proceedings of Pushchino Permafrost Conference Earth's Cryosphere: Past, Present and Future. 2017. P. 87–88.

21. **Новикова А.В.** Динамика берегов Байдарацкой губы Карского моря на участках нефтегазового освоения / Материалы XXIV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2017». Москва. 2017.