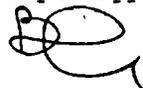


На правах рукописи



Васильев Александр Алексеевич

**ДИНАМИКА МОРСКИХ БЕРЕГОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ
ЗАПАДНОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ
(НА ПРИМЕРЕ КАРСКОГО МОРЯ)**

25.00.36 - геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Тюмень - 2004

Работа выполнена в Институте криосферы Земли Сибирского отделения Российской Академии наук.

Официальные оппоненты:

Доктор геолого - минералогических наук, профессор **Н.Н. Романовский** (Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет).

Доктор географических наук **М.М. Корейша** (Производственный и научно-исследовательский институт инженерных изысканий в строительстве (ПНИИИС))

Доктор геолого - минералогических наук **С.А. Лаухин** (Институт проблем освоения Севера СО РАН).

Ведущая организация: Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана (ВНИИОкеангеология), г. С.-Петербург.

Защита состоится 5 октября 2004г. в 9⁰⁰ на заседании диссертационного совета ДМ 003.042.01 при Институте криосферы Земли СО РАН по адресу: г. Тюмень, ул. Малыгина, 86.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института криосферы Земли СО РАН по адресу: г. Тюмень, ул. Малыгина, 86.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять ученому секретарю Совета по адресу: 625000, Тюмень, а/я1230, ИКЗСОРАН

Автореферат разослан 17 августа 2004г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
ДМ 003.042.01, к.г.-м.н.



Е.А.Слагода

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и постановка проблемы. Исследование закономерностей динамики морских берегов Российской Арктики представляет собой актуальную научную и практическую проблему в связи с тем, что прибрежная зона арктических морей является высокодинамичной природной системой, особенности которой определяются взаимодействием океана и суши в условиях криолитозоны. К настоящему времени сравнительно хорошо изучены условия формирования и эволюции континентальной криолитозоны, а также закономерности процессов на арктическом, шельфе. Прибрежная же зона остается недостаточно изученной как с точки зрения особенностей взаимодействия суши и моря, так и с позиций геокриологии и геоэкологии. В силу особенностей прибрежно-морской зоны арктических морей как сложной системы, ее динамика определяется климатическими, гидродинамическими и геокриологическими факторами. Таким образом, исследование прибрежно-морской зоны и динамики морских берегов должно носить мультидисциплинарный характер.

Динамика морских берегов и взаимодействие моря и суши в криолитозоне непосредственно определяют особенности и закономерности формирования геоэкологических условий прибрежно-морской зоны и в значительной степени влияют на геоэкологию открытого шельфа. Морские берега, наряду с крупными реками, являются важнейшим источником поступления твердого материала, растворимых солей, органического углерода и заземленных газов в прибрежно-морскую зону и шельф и оказывают значительное влияние на условия развития морской биоты.

Одной из важнейших проблем взаимодействия океана и суши в Арктике является выявление тенденций развития как континентальной, так и морской составляющих прибрежно-морской зоны в условиях меняющегося климата.

К настоящему времени сравнительно хорошо изучены только отдельные вопросы этой междисциплинарной проблемы. Но до сих пор отсутствуют комплексные исследования, объединяющие различные аспекты проблемы в единую систему научных взглядов.

Цель и задачи исследования. Цель работы заключается в исследовании динамики морских берегов и прибрежно-морской области в условиях изменения климата и выявлении закономерностей формирования ее геоэкологических условий на примере Карского моря.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Изучить геологическое и геокриологическое строение и особенности реакции криолитозоны прибрежно-морской области на изменения климата
2. Определить и изучить факторы природной среды, влияющие на динамику морских берегов.



3. Изучить многолетнюю динамику морских берегов на ключевых участках морского побережья.
4. Изучить основные факторы формирования геоэкологических условий в прибрежно-морской области.
5. Изучить структуру морских берегов по геокриологическим и геоморфологическим признакам и особенностям их динамики.
6. Рассчитать баланс и структуру материала, поступающего в прибрежно-морскую зону при разрушении берегов.

Исходные материалы. Работа выполнена в Институте криосферы Земли СО РАН в рамках плана фундаментальных исследований СО РАН, программы РАН «Мировой океан», интеграционного проекта «Динамика морских берегов Российской Арктики», других программ РАН. В основу диссертации положены результаты собственных исследований автора, направленных на изучение строения и состава многолетнемерзлых пород, закономерностей геокриологического строения мерзлых толщ, эволюции криогенных толщ морских побережий в условиях меняющегося климата, динамики морских берегов Западного сектора Российской Арктики, факторов и условий формирования геоэкологических условий в прибрежно-морской области. Наиболее детальные исследования динамики морских берегов были выполнены в районе Марре-Сале (Западный Ямал). Кроме того, комплексное изучение динамики морских берегов проводилось в районе м. Шпиндлер (Югорский п-ов) - совместно с М.О. Лейбман, м. Болванский (устье р. Печора) - совместно с Г.В. Малковой и М.З. Каневским, районе м. Бурунный - Харасовой (Западный Ямал), Марресальские кошки (Западный Ямал), районе Бованенковского газоконденсатного месторождения, устья р. Танама (западное побережье Енисейского залива) и в районе Ямбурга (западное побережье Тазовского п-ова) - совместно с В.А. Совершаевым.

Научные положения и выводы диссертации базируются на:

- фактических данных 25-летних наблюдений за динамикой морских берегов на четырех стационарах в Западном секторе Российской Арктики;
- сплошном дешифрировании космических снимков морского побережья;
- непосредственном полевом обследовании более чем 100 км. морских берегов;
- детальном изучении и опробовании около 1400 п.м. керна буровых скважин и более 50 береговых разрезов и обнажений;
- результатах многолетних наблюдений за динамикой сезонного оттаивания и температуры многолетнемерзлых пород на 20 стационарных площадках;
- интерпретации более чем 400 специальных лабораторных анализов прибрежно-морских отложений;
- анализе ежесуточных данных о гидродинамических параметрах моря за последние 15 лет;
- результатах моделирования и сравнения расчетных и натурных

показателей.

При написании работы проанализированы и обобщены литературные, фондовые и метеорологические материалы, посвященные геокриологическим условиям морского побережья Западного сектора Российской Арктики, динамике морских берегов и закономерностям формирования геоэкологических условий прибрежно-морской области.

Научная новизна настоящего исследования заключается в следующем:

1. Криогенная толща морского побережья охарактеризована как динамичная система, чутко реагирующая на изменения климата. Установлено, что реакция мерзлотных ландшафтов, независимо от их расположения в той или иной природно-климатической зоне, определяется индивидуальными свойствами ландшафтов и количеством поступившего тепла. Выявлены количественные пределы реакции криогенных толщ в типичных (доминантных) ландшафтах прибрежно-морской области на климатические изменения.

Выполнена типизация криогенных толщ по особенностям геокриологического строения. Установлено, что в прибрежно-морских разрезах одновременно могут присутствовать пластовые льды разных генераций.

2. Показано, что межгодовые изменения циркуляционного режима атмосферы, температуры воздуха и продолжительности безледного периода в Западном секторе Российской Арктики протекают синхронно.

Собраны и проанализированы с позиций динамики морских берегов данные о температуре и солености морской воды, параметрах морских волн и продолжительности безледного периода.

Впервые количественно определено влияние состава и льдистости мерзлых дисперсных пород на скорость разрушения морских берегов

3. Собраны и проанализированы все фактические данные о разрушении берегов Карского моря.

Установлено существенное различие морфологии подводных склонов в зависимости как от геокриологического строения, так и от особенностей динамики их разрушения.

Впервые выявлена тесная связь динамики морских берегов с характером атмосферной циркуляции, температурой воздуха, продолжительностью безледного периода и суммарной энергией морских волн. Установлено, что вклад штормов в разрушение берегов изменяется от 5 до 25%, но в многолетнем аспекте роль штормов в разрушении морских берегов сравнительно невелика.

Установлена ритмичность и синхронность изменения скорости отступления морских берегов во времени.

Доказано, что в пределах термоабразионных берегов прилегающая часть суши и мелководная прибрежная часть моря представляет собой единую сбалансированную систему. Поэтому изменения в скорости разрушения подводного склона и основания берегового обрыва неизбежно отражаются в динамике (скорости) отступления берегового клифа.

Выявлено, что при всем многообразии деструктивных криогенных процессов ведущая роль в разрушении морских берегов, сложенных песчано-глинистыми отложениями, в Западном секторе Российской Арктики принадлежит комбинациям термоабразионного и обвально-осыпного, а также обвально-осыпного и оползневых механизмов.

Разработай стохастический метод моделирования разрушения морских берегов. На основе разработанной модели выполнен прогноз динамики берегов при возможных изменениях климата, при повышении уровня Мирового океана и при техногенных воздействиях на 20-летнюю перспективу.

4. Выявлены закономерности формирования геоэкологических условий мелководной прибрежной части моря. Выделено два типа областей, отличающихся по условиям и источникам поступления в море твердых осадков, растворимых солей и органического углерода. В областях первого типа геоэкологические условия формируются, главным образом, под влиянием процессов взаимодействия суши и Арктического океана. В областях второго типа формирование геоэкологических условий происходит преимущественно под влиянием выноса крупных рек.

5. Выполнена типизация побережья Карского моря по геокриологическому и геоморфологическому строению. Составлена карта типов морских берегов, отличающихся по геокриологическому строению и морфологии прибрежной части суши.

На основе типизации впервые выявлена доля участия каждого из выделенных типов в структуре побережья как основа для оценки поступления материала в море при разрушении берегов. Составлена карта динамических типов морских берегов.

6. Оценено содержание растворимых солей и органического углерода в отложениях, слагающих разные типы морских берегов.

Составлен общий баланс твердых осадков, растворимых солей и органического углерода, ежегодно поступающих в Карское море при разрушении берегов.

Защищаемые положения.

1. Прибрежно-морская область криолитозоны - высокодинамичная геосистема, характеризующаяся различной реакцией ландшафтов на климатические изменения. При этом реакция мерзлотных ландшафтов в ранге урочищ не зависит от их расположения в той или другой природно-климатической зоне и определяется только индивидуальными свойствами ландшафтов и количеством поступившего тепла.

2. На берегах, сложенных дисперсными отложениями, геокриологическое строение и льдистость являются важным природным фактором, определяющим не только динамику берегов, но, главным образом, механизм их разрушения и морфологию береговой зоны.

3. Динамика морских берегов в Западном секторе Российской Арктики находится в тесной связи с климатическими изменениями. Эта связь реализуется через изменение продолжительности безледного периода и изменения барического и циркуляционного режима атмосферы, в свою очередь вызывающих изменения параметров ветрового волнения на море. Скорость разрушения берегов хорошо коррелируется с обобщенным показателем барикоциркуляционного режима атмосферы - индексом Арктической осцилляции (АО).

4. Изменения в динамике разрушения морских берегов происходят ритмично и синхронно во всем Западном секторе Российской Арктики. Предстоящий 20-летний период будет характеризоваться сравнительно умеренными скоростями разрушения берегов.

5. Разрушающиеся морские берега и вынос крупных рек являются равноценными источниками поступления твердых осадков в бассейн Карского моря. Поступление органического углерода и растворимых солей, включая и питательные вещества, за счет разрушения берегов существенно меньше по сравнению с выносом крупных рек.

Научное и практическое значение работы. Научное значение работы определяется выявлением закономерностей динамики морских берегов и формирования геоэкологических условий прибрежно-морских областей западного сектора Российской Арктики. Установленные закономерности имеют как научное, так и практическое значение. С научной точки зрения решена крупная научная проблема - комплексно исследованы и охарактеризованы закономерности и особенности взаимодействия моря и суши для обширного региона Российской Арктики в условиях меняющегося климата. В практическом отношении:

- Выявленные закономерности динамики морских берегов Западного сектора Российской Арктики, отраженные на мелкомасштабных картах динамических типов морских берегов, служат основой для планирования мероприятий по устойчивому сбалансированному развитию прибрежных территорий
- Конкретные данные о динамике морских берегов в условиях меняющегося климата, крупномасштабные карты и прогнозные оценки используются при проектировании разработки нефтяных и газовых месторождений в прибрежной зоне и на шельфе и систем транспорта продукта.
- Оценку реакции криогенных толщ на глобальные изменения климата следует использовать для расчетов устойчивости инженерных сооружений и разработки природоохранных мероприятий.
- Новый фактический материал по динамике морских берегов, по оценке чувствительности криогенных толщ к изменению климата и криогенному строению прибрежно-морских отложений используется при чтении лекций студентам геологического и географического факультетов МГУ.

Апробация работы- Результаты исследований докладывались на Международных, Всесоюзных и Всероссийских конференциях, семинарах, съездах и т.н.:

- 8-ой Международной конференции по мерзлотоведению, Цюрих, 2003.
- Первой Европейской конференции по мерзлотоведению, Рим, 2001.
- Международных конференциях по проблеме ACD (Arctic Coastal Dynamics) в Потсдаме (2001), Осло (2002), С.-Петербурге (2003),
- Международных конференциях по криосфере Земли в Пушино, 1995-2003.
- Международной конференции «Экология северных территорий России: проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения», Архангельск, 2002.
- Международных конференциях «Cold Regions Engineering», Эдмонтон, Канада, 1995 и Анкоридж, США, 2001 и 2002.
- Международных совещаниях по динамике морских берегов (Вудс-Холл, США, 1999) и динамике криолитозоны (Фербенкс, США, 2000).
- Первом и втором съездах геокриологов России, Москва, 1996, 2001.
- Всес. научно-техн. конференции «Геоэкология: Проблемы и решения», Москва, 1990.

а так же других конференциях, семинарах, совещаниях.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в виде разделов в четырех коллективных монографиях, 25' статьях в российских научных изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования результатов докторских диссертаций, и зарубежных рецензируемых журналах. Кроме того, отдельные научные положения диссертации опубликованы более чем в 20 тезисах и докладах различных конференций и семинаров.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов и списка литературы. Работа содержит 290 страниц текста, включающих 16 таблиц, 78 рисунков и список литературы из 299 наименований.

Автор глубоко признателен д.г.-м.н. Е.С. Мельникову, д.г.н. А.В. Павлову, и д.г.н. Ф.Э. Арэ за помощь и постоянную поддержку исследований. Написание работы оказалось возможным благодаря совместной работе, помощи и ценным советам д.г.-м.н. Ю.Л. Шура (Университет Аляски, США), д.г.н. Н.Г. Москаленко, к.г.-м.н. В.С. Дроздова, Г.В. Малковой, М.О. Лейбман, н.с. Ю.В. Коростелева, н.с. А.И. Кизякова (ИКЗ СО РАН), к.г.н. М.Н. Григорьева (ИМ СО РАН), к.г.-м.н. Б.А. Ванштейна, к.г.-м.н. Ю.Г. Фирсова, к.г.-м.н. Г.А. Черкашева (ВНИИокеангеология). Особую признательность автор хотел бы выразить свои коллегам из Геологической службы Канады Д. Эткинсоlгу и С. Соломону за постоянный интерес, обсуждение идей и консультации по теме исследований. Автор особенно благодарен д.г.-м.н. В.Т. Трофимову (геологический ф-т МГУ), д.г.н. Н.А. Айбулатову (ИО РАН) и д.г.-м.н. С.М. Фотиеву (НСКЗ) за сделанные замечания и пожелания по сути работы, которые безусловно способствовали улучшению диссертации. Автор признателен сотрудникам ИКЗ СО РАН, МГУ и

ВСЕГИНГЕО за помощь при проведении полевых наблюдений. Автор хотел бы поблагодарить к.г.-м.н. И.Д. Стрелецкую (МГУ) и М.З. Каневского (ИКЗ СО РАН), при доброжелательной помощи которых работа увидела свет.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИКИ МОРСКИХ БЕРЕГОВ

Исследования морских берегов и льдов в Арктике всегда привлекали внимание полярных путешественников и исследователей. Начиная с первой половины 18 века, при проведении плаваний и путешествий, так или иначе, отмечались характер и сложение берегов, присутствие мерзлых пород, льдов и т.п., давались первые характеристики прибрежных условий.

Научные исследования собственно динамики морских берегов начались с 1920-х. Этот период характеризуется как время формирования общегеографических и общегеологических описательных научных подходов к проблеме и как этап накопления первых инструментальных данных о динамике береговой зоны Арктических морей. В это время проведены исследования динамики морских берегов Х.У. Свердрупом, М.М. Ермолаевым и П.К. Хмызниковым в Восточно-Сибирском море и море Лаптевых. В юго-восточной части Карского моря выполнены работы В.П. Кальянова и сделаны выводы о широком распространении мерзлых пород на морском дне.

Позднее, в 1960-1980гг в результате исследований Ф.Э. Арэ, П.И. Башмакова, Б.А. Вильнера, О.Н. Виноградова, Я.Л. Гаккеля, Н.Ф. Григорьева, В.П. Зеиковича, В.И. Кайялайнена, В.С. Кулакова, С.Л. Троицкого и многих других были получены обширные: материалы, характеризующие скорость разрушения морских берегов в различных районах Арктики. Обобщение многочисленных данных о разрушении морских берегов в криолитозоне было выполнено Ф.Э. Арэ в его широко известной монографии 1980г.

К началу 60-х годов В.П. Зеиковичем разработано учение о развитии морских берегов, в котором предложена классификация морских берегов, изложены основные положения их динамики, рассмотрены действующие факторы и условия. Без преувеличения, монография В.П. Зеиковича заложила основы системных исследований морских побережий и их динамики. Сформировались крупные научные школы исследователей морских берегов в Институте океанологии РАН и Московском Университете (Н.А. Айбулатов, П.А. Каплин, О.К. Леонтьев, Ю.А. Павлидис, Б.А. Попов, Г.А. Сафьянов и др.).

Это же время в значительной мере совпадает со становлением геокриологии (мерзловедения) как науки, разработки методологии, теории и научных подходов, которые на долгие годы определили основные черты исследований динамики береговой зоны, геокриологии (криолитологии) морских берегов и океанической геокриологии (И.Д. Данилов, Л.А. Жигарев, Э.Д. Ершов,

В.Н. Конищев, М.М. Корейша, В.А. Кудрявцев, А.И. Попов, Н.Н. Романовский, А.Н. Хименков, А.В. Брушков и др.)

В 1970-х - 90-х годах были проведены исследования динамики морских берегов в Арктике, которые позволили количественно охарактеризовать динамические процессы в прибрежной зоне и выявить основные действующие факторы (Ф.Э. Арэ, Н.Ф. Григорьев, М.Н.Григорьев, Е.Н. Молочушкин, Б.А.Попов, В.А. Совершаев, А.И. Фартышев и др.).

Изучены различные палеогеографические аспекты развития морских берегов в Арктике (А.А. Аксенов, М.Н.Алексеев, В.И. Астахов, М.Г. Гроссвальд, И.Д. Данилов, Г.А. Лазуков, А.В. Ложкин, Ю.А. Павлидис, Г.Э. Розенбаум, Н.А.Шполянская, В.Т. Трофимов, W. Manley, S.L. Forman и др.).

Интенсификация изучения прибрежной зоны Арктических морей связана с открытием крупных месторождений нефти, газа и газового конденсата в Арктике, в т.ч. и на арктическом шельфе. Результаты исследований для Западного сектора Российской Арктики обобщены в широко известных монографиях В.П. Мельникова и В.И. Спесивцева (1995) и коллективной монографии под редакцией Г.И. Дубикова (Природные условия..., 1997). Закономерности формирования многолетнемерзлых пород и их свойства установлены в результате исследований В.В. Баулина, А.В. Брушкова, С.Е. Гречишева, Н.Ф. Григорьева, А.В. Гамалеи, Г.И. Дубикова, Н.В. Ивановой, О.В. Лахтиной, Е.С. Мельникова, И.Д. Стрелецкой, В.Т. Трофимова, Н.Г. Украинцевой, А.Н. Хименкова, Ю.Б. Шешина и др.).

К середине 90 -х. годов как научная проблема сформировалась задача оценки баланса органического углерода в Арктическом бассейне. В общем виде имеющиеся данные по арктическому бассейну представлены в монографии Е.А. Романкевича и А.А. Ветрова (2001). Обстоятельные исследования содержания органического углерода в основных типах прибрежных отложений Северо - Востока России выполнены в ИФХБПП РАН (Д.А. Гиличинский, С.В. Губин, А.Л. Холодов).

По мере накопления факгических данных и развития теоретических представлений о взаимодействии океана и суши, в частности в криолитозоне, происходило формирование важнейшего направления в науке о морских берегах, которое может быть определено как геоэкология морских побережий и шельфа. (Н.А. Айбулатов, Ю.А. Павлидис, В.И. Соломатин и другие). Для понимания закономерностей формирования геоэкологических условий арктических побережий исключительно важное значение имеет теория маргинальных фильтров в Арктике, разработанная акад. А.П. Лисицыным.

За рубежом исследования динамики морских берегов в криолитозоне выполняются преимущественно на побережье Чукотского моря и моря Бофорта. Здесь сделаны одни из первых оценок скорости разрушения берегов на основе сравнения аэрофотоснимков, а позднее космоснимков высокого разрешения,

разных лет (J. Brown, S. Dallimore, T Jorgenson, J.R. Mackay, S. Solomon, S. Wolfe и др.).

Новый этап в исследовании динамики морских берегов в криолитозоне начался с середины 1990-х годов. В это время резко активизировались комплексные исследования, направленные на оценку роли взаимодействия арктического океана и суши и на выявление условий формирования баланса твердых осадков, органического углерода и питательных веществ, поступающих в арктический бассейн при разрушении морских берегов. К наиболее актуальным современным проблемам исследования морских берегов в Арктике относятся:

- комплексное исследование факторов, включая изменяющийся климат, и оценка их влияния на динамику морских берегов в Арктике;
- разработка новых подходов к классификации и типизации берегов и развитие методов картографирования, основанных на применении ГИС-технологий;
- оценка баланса твердых осадков, органического углерода, растворимых солей и питательных веществ (нитраты, фосфаты, аммоний и т.п.), определяющих формирование геоэкологических условий в прибрежной зоне и условия питания морской биоты.

2. ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И ИСТОРИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ В ПЛЕЙСТОЦЕНЕ - ГОЛОЦЕНЕ

Краткий очерк геологического строения

В геологическом строении побережья Карского моря принимают участие несколько крупных разновозрастных геологических структур первого порядка (с запада на восток): Урало - Новоземельская горная система, эпигерцинская Западно-Сибирская плита, горная система Таймыра, включающая Таймырско - Североземельскую складчатую область (Инженерная геология..., 1976, 1977, 1978).

Острова Новой Земли сложены метаморфизованными терригенными отложениями. Четвертичные отложения представлены здесь фрагментами морских террас, преимущественно глинистого состава. На северной оконечности Новой Земли узкой полосой распространены специфические современные морские образования, называемые каменистыми лайдами. На северном острове Новой Земли непосредственно на морское побережье выходят несколько выводящих ледников.

Остров Вайгач и северо-западная часть Югорского п-ова также сложены в основном терригенными породами. При этом поверхность о. Вайгач террасирована, и вдоль побережья узкой полосой протягиваются четвертичные морские отложения, залегающие на коренном цоколе.

К востоку от п. Дмдерма на побережье Югорского п-ова залегают четвертичные преимущественно морские песчано-глинистые отложения. По некоторым данным они несут следы воздействия последнего оледенения.

Побережье Западной Сибири сложено исключительно четвертичными дисперсными песчано-глинистыми отложениями. По современным представлениям эти отложения не испытывали влияния ледников (Forman et al., 1999, Lambeck, 1995).

На морском побережье западного и северо-западного Таймыра наиболее широко распространены цокольные морские террасы. Здесь четвертичные дисперсные песчано-глинистые отложения подстилаются коренными породами. К востоку от устья р. Пясины берега преимущественно представлены коренными породами, перекрытыми маломощным чехлом грубообломочных элювиальных и делювиальных отложений. В самой северной части Таймыра на побережье выходят грубообломочные четвертичные моренные отложения.

Побережье островов Северной Земли сложено грубообломочными четвертичными морскими отложениями, залегающими на коренном основании. Большую роль здесь играют также выходы на морское побережье покровных ледников.

Влияние неотектонических движений на формирование морских берегов Карского моря

Для понимания тенденций развития и динамики морского побережья Карского моря очень важно принимать во внимание современные вертикальные движения земной поверхности, имеющие неотектоническую природу. На рис. 1. приведено сопоставление современных вертикальных движений (по Никонову, 1977, 1978) и типов МОРСКИХ берегов Капского МОРЯ.

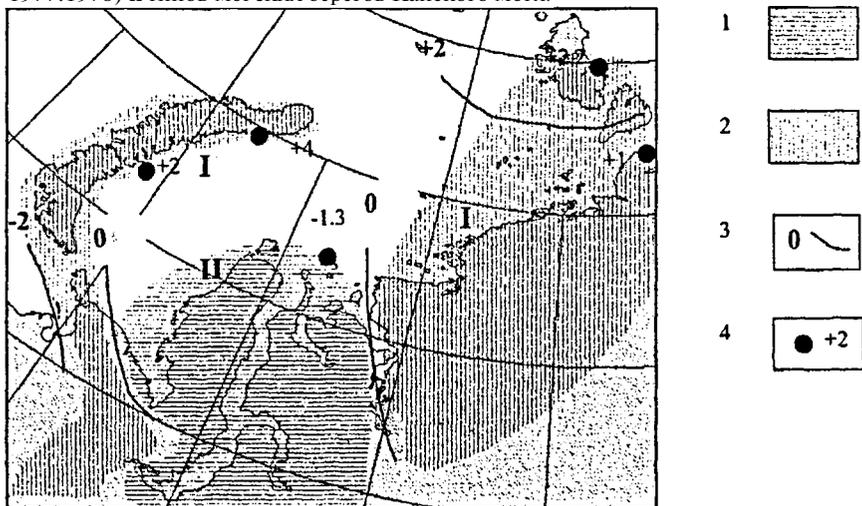


Рис. 1. Соотношение современных вертикальных движений земной коры на побережье Карского моря (по Никонову, 1977, 1978) и типов морских берегов. I- стабильные и аккумулятивные берега, II- термоаэрозийные стабильные и аккумулятивные берега. 1- области устойчивого прогибания; 2- области поднятий; 3- изолинии скоростей вертикальных движений, мм/год; 4- равномерные точки и величины вертикальных движений, мм/год.

И

Как видно из рисунка, областям устойчивого прогибания в точности соответствуют участки морского побережья, сложенным исключительно четвертичными дисперсными отложениями. Именно в этих областях широко распространены термоабразионные и аккумулятивные типы морских берегов. Напротив, в областях поднятий берега представлены или цокольными террасами, или коренными породами. По динамическим характеристикам морские берега в этих регионах относятся к стабильным или абразионным (в областях распространения коренных пород).

Таким образом, можно говорить об однозначном соответствии направленности неотектонических движений и тенденций развития морских берегов.

Основные черты истории геологического развития побережья Карского моря в среднем плейстоцене — голоцене

Существуют два принципиально различающихся взгляда на четвертичную историю геологического развития побережья Карского моря.

Первый из них основывается на представлениях о преимущественно ледниковой и постледниковой истории формирования морского побережья. Считается, что позднечетвертичные прибрежные отложения сформировались главным образом как гляциальные и постгляциальные образования (Astakhov, 1997, 2001, Astakhov et al., 1996, Grosswald, 1980, 1993, 1998 и др). С гляциолистских позиций интерпретируются опорные разрезы Харасовея (Гатауллин, 1986, 1988), Марре-Сале (Каплянская, Тарноградский, 1976), Югорского полуострова (Manley et al., 2001). В деталях представления этих исследователей различаются иногда весьма существенно. Однако, даже собственные детальные исследования приверженцев преимущественно гляциальной истории развития побережья Карского моря показывают, что последнее оледенение в бассейне Карского моря носило весьма ограниченный характер (Forman et al., 1999, Polyak et al., 2002, Stein et al., 2002).

Более логичным и стройным, по нашему мнению, является подход, в соответствии с которым основные особенности побережья Карского моря формировались преимущественно под влиянием морской истории развития. Эта точка зрения развивается в работах И.Д. Данилова (1978, 1979, 1989, 1998), Г.И. Дубикова (1984, 2002), Г.И. Лазукова (1972, 1989), Ю.А. Павлидиса (1992, 1998), В.Т. Трофимова (1975, 1980), Н.А. Шполянской (1981, 1998, 2002) и др. При этом, как правило, авторы не отрицают синхронность развития трансгрессий на севере Западной Сибири и оледенений в периферийных частях бассейна Карского моря. Хотя, следует отметить, что И.Д. Данилов в своих последних исследованиях обращал внимание, что правило синхронности трансгрессий и оледенений соблюдалось далеко не всегда (Данилов, 1998).

Итак, несмотря на принципиальные отличия в интерпретации истории геологического развития, большинство исследователей сходятся во мнении, что

последнее оледенение не затрагивало область побережья Карского моря от м. Шпиндлер на Югорском п-ове до устья р. Пясины на Таймыре.

3. ОСОБЕННОСТИ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПОБЕРЕЖЬЯ КАРСКОГО МОРЯ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

Распространение и мощность многолетнемерзлых пород

Континентальная часть побережья Карского моря полностью располагается в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП) большой мощности. Только в кутовых частях Байдарацой и Обской губы и в дельте Енисея мощность ММП значительно снижена. Максимальная мощность ММП, составляющая более 600 м, характерна для северного Таймыра. Минимальные мощности, не превышающие 100 м, отмечаются на побережье в южных частях Обской и Байдарацкой губы.

Известно, что вследствие засоленности криолизона на морском побережье имеет двухъярусное строение. Верхний ярус представлен твердомерзлой толщей, нижний - представляет собой отрицательно температурную охлажденную толщу. Соотношение мощностей этих двух толщ определяется степенью засоленности отложений и среднегодовой температурой, при условии примерно одинаковых значений геотермического градиента. На основе имеющихся данных построен график зависимости мощности твердомерзлой толщи от среднегодовых температур ММП (рис.2). Разумеется, приведенный график может использоваться только для приближенных оценок мощности твердомерзлой толщи по данным о среднегодовой температуре, поскольку основывается на предположении о незначительной изменчивости засоленности пород с глубиной.



Рис. 2. Зависимость мощности твердомерзлой толщи Западного Ямала от среднегодовой температуры пород. Построено с использованием данных (Баду, Харькозов, 1987, Дубровин, 2003, Кондаков и др., 2001).

Температура ММП и ее динамика

Среднегодовая температура многолетнемерзлых пород на побережье Карского моря изменяется в широких пределах.

Минимальные температуры характерны для островов Северной Земли и северного Таймыра и составляют $-11 - 15^{\circ}\text{C}$ (Геокриология СССР, 1989). Максимальные среднегодовые температуры ММП отмечаются в долинах рек в южной части побережья Карского моря. Закономерности формирования и пространственное распределение температуры ММП достаточно хорошо изучены (Баулин, 1985, Полуостров Ямал..., 1975, Трофимов и др., 1980 и др.).

Помимо региональных закономерностей в распределении среднегодовой температуры ММП, в пределах каждого района наблюдаются собственные отличия в температуре, обусловленные ландшафтными особенностями. Понятно, что реакция ландшафтов, выраженная в изменениях среднегодовой температуры, на климатические изменения будет разной в зависимости от особенностей ландшафтов (Павлов, 2001 и др.). В связи с этим проанализированы многолетние данные об изменении температуры ММП во времени и, главное, связь температуры ММП и среднегодовой температуры воздуха (рис.3).

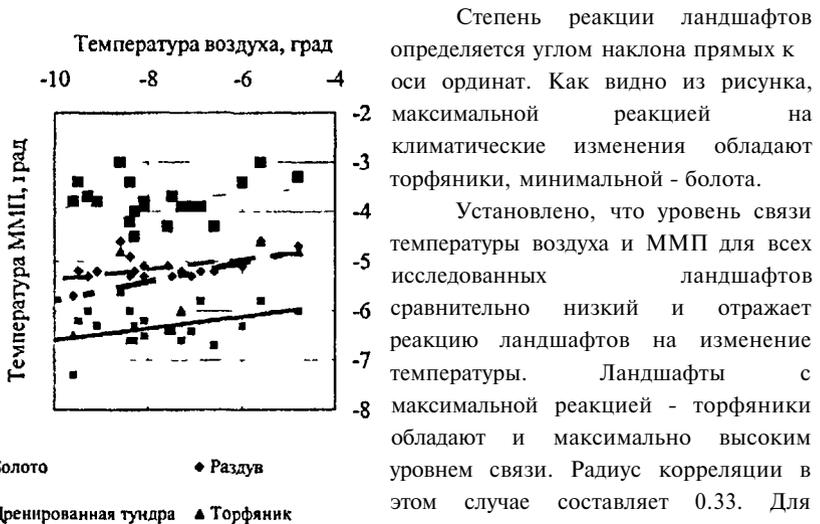


Рис. 3. Зависимость среднегодовой температуры ММП в доминантных ландшафтах Марре-Сале от среднегодовой температуры воздуха.

Степень реакции ландшафтов определяется углом наклона прямых к оси ординат. Как видно из рисунка, максимальной реакцией на климатические изменения обладают торфяники, минимальной - болота.

Установлено, что уровень связи температуры воздуха и ММП для всех исследованных ландшафтов сравнительно низкий и отражает реакцию ландшафтов на изменение температуры. Ландшафты с максимальной реакцией - торфяники обладают и максимально высоким уровнем связи. Радиус корреляции в этом случае составляет 0.33. Для ландшафтов с минимальной реакцией на изменения температуры воздуха (болота) радиус корреляции всего 0.07. Столь невысокие радиусы корреляции количественно иллюстрируют общеизвестное положение о том, что формирование температуры ММП

определяется не только среднегодовой температурой воздуха, но и условиями теплообмена на поверхности, которые и определяются индивидуальными свойствами ландшафтов.

Коль скоро температура ММП изменяется в некоторых пределах в зависимости от среднегодовой температуры воздуха, то каждое разовое измеренное значение температуры ММП характеризует только условия данного года. Возникает проблема, как найти значение среднегодовой температуры ММП, которое однозначно характеризует температурный режим данного ландшафта, независимо от текущих изменений температуры воздуха. Такая оценка возможна на основе определения некоей нормы среднегодовой температуры ММП, которая может быть найдена на основе данных о зависимости температуры ММП от среднегодовой температуры воздуха и климатических данных. Так, по данным метеостанции Марре - Сале средняя многолетняя среднегодовая температура воздуха за период наблюдений 1914-2003г составляет -7.9°C . Эта величина и может считаться многолетней климатической нормой. Далее из графика (рис. 3) можно найти среднегодовую температуру пород, отвечающую температуре воздуха в -7.9°C . Для дренированных тундр он составит -6.3°C , песчаных раздувов - 5.6°C , торфяников -5.3°C и для болот -3.8°C . Эти характерные значения среднегодовой температуры ММП и являются региональной нормой температуры ММП.

Сравнивая нормы среднегодовой температуры ММП с фактическими значениями, нетрудно видеть, что отклонения текущих значений от нормы в отдельные годы могут достигать в некоторых ландшафтах 1.0°C и более. Это совершенно необходимо принимать во внимание при оценках изменения среднегодовой температуры ММП как при естественной эволюции криолитозоны, так и при техногенных нарушениях (Дроздов, Чекрыпша, 1998).

Глубина сезонного оттаивания и ее динамика

Глубина сезонного оттаивания на побережье Карского моря изменяется в больших пределах. Максимальное оттаивание характерно для дренированных песчаных пород и достигает 3м и более, минимальные значения глубины оттаивания присущи торфяникам и составляют 0.3- 0.5м. Глубина сезонного оттаивания подчиняется широтной зональности, а в горных районах и высотной поясности.

Наиболее детальные, многолетние наблюдения за динамикой сезонного оттаивания на побережье Карского моря и вблизи него проводятся в зоне типичной тундры на Западном Ямале, стационар Марре-Сале (с 1978г), Центральном Ямале, стационар Васысины Дачи (с 1991 г) и в зоне северной тайга в районе 8км. трассы газопровода «Надым-Пунга» - стационар Надым (с 1972г), (Васильев и др.,1998, Лейбман, 2001, Москаленко и др.,2001, Павлов, 2001, Vasiliev et al., 2003 и др.).

Проблема интерпретации результатов измерения глубины сезонного оттаивания заключается в том, что, как правило, продолжительность наблюдений недостаточна для однозначных выводов о многолетних тенденциях динамики СТС, в т.ч. и в связи с изменением климата. Опыт геокриологических исследований показывает, что, за редким исключением, в лучшем случае исследователи располагают результатами наблюдений за несколько лет, обычно 3-5 лет. В этом случае прямой анализ трендов может дать совершенно противоположные результаты. Кроме того, даже в сопоставлении с тенденциями климатических изменений крайне трудно понять имеем ли мы дело с периодом потепления и соответствующей реакцией ландшафтов, выраженной в глубине оттаивания, или наоборот.

В диссертации предлагается новый подход к интерпретации результатов, который позволяет установить основные закономерности изменения сезонного оттаивания в связи в условиях меняющегося климата.

Анализ результатов многолетних наблюдений за сезонным оттаиванием в различных природно-климатических зонах показал, что реакция мерзлотных ландшафтов, независимо от их расположения в той или другой природно-климатической зоне, определяется только индивидуальными свойствами ландшафтов и пропорциональна количеству поступившего тепла (DDT) (рис.4).

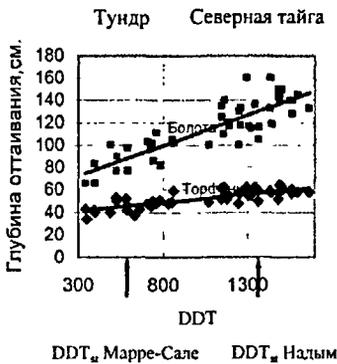


Рис. 4. Зависимость глубины оттаивания болот и торфяников от суммы положительных температур (DDT) в зоне тундры и северной тайги.

В таком случае реакция ландшафтов на климатические изменения, выраженная в глубине сезонного оттаивания, определяется наклоном линии тренда к оси ординат, в нашем случае — оси DDT. Из приведенного примера видно, что торфяники обладают меньшей реакцией на климатические изменения, чем болота. Поскольку зависимость имеет линейный характер, становится неважно, в какой климатической и геокриологической зоне проводились наблюдения.

Имеющиеся данные по многолетним наблюдениям за глубиной сезонного оттаивания в различных

доминантных ландшафтах в районе Маре-Сале позволяют оценить, какие именно ландшафты из тех, в которых проводились наблюдения, обладают максимальной и минимальной реакцией на климатические изменения. На

рисунке 5 приведены зависимости глубины оттаивания от DDT для доминантных ландшафтов тундровой и северо - таежной природно-климатических зон.

Как видно из рисунка, максимальной реакцией обладают болота, минимальной - торфяники (Melnikov et al., 2003). Остальные ландшафты характеризуются промежуточной реакцией. Поскольку абсолютные величины глубин сезонного оттаивания сильно отличаются друг от друга, резонно использовать не абсолютные, но относительные величины. На основе многолетних климатических данных можно рассчитать средние многолетние значения DDT, которые могут быть названы климатическим стандартом (DDT_{st}) или климатической нормой. Для условий Марре-Сале DDT_{st} составляет 566 градусо - дней (1914-2002), для Надыма - 1352 градусо - дней (1965-2002).

Вертикальные линии на рис. 5 как раз и соответствуют климатическим нормам DDT_{st} для зоны тундры (район Марре-Сале) и северной тайги (район Надыма).

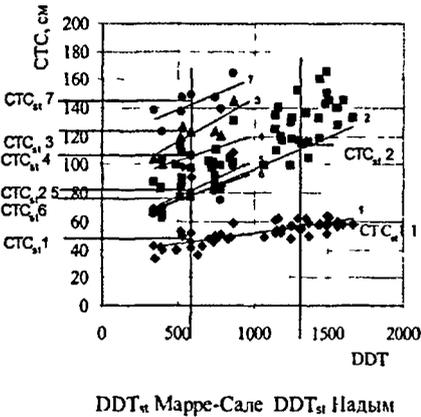


Рис. 5. Зависимость глубины сезонного оттаивания в доминантных ландшафтах тундры и северной тайги от суммы положительных температур воздуха. 1 - торфяники, 2 - болота, 3 - дренированные тундры, 4 - днища логов, 5 - болота (CALM), 6 - увлажненные тундры, 7 - песчаные раздувы.

Из пересечения вертикальных линий и линий трендов можно найти соответствующие средние многолетние величины глубин сезонного оттаивания для каждого из представленных ландшафтов, которые могут быть названы стандартами (или нормой) глубины оттаивания. Имея эти данные, далее можно пересчитать все текущие значения СТС в относительные величины и построить диаграмму зависимости относительных величин оттаивания от относительных значений сумм положительных температур воздуха. Целесообразно это сделать только для ландшафтов, обладающих максимальными (болота) и минимальными (торфяники) реакциями на климатические изменения, поскольку остальные будут располагаться на рисунке между ними (рис. 6.).

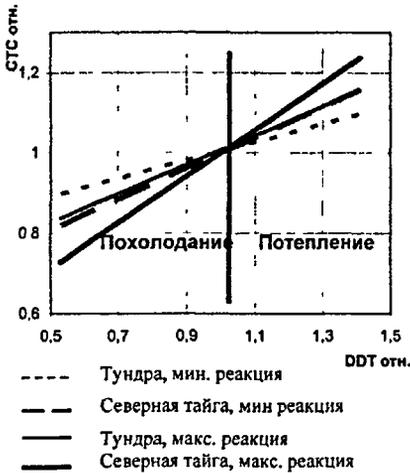


Рис.6. Диаграмма реакции ландшафтов, выраженной в глубине сезонного оттаивания, на потепление и похолодание климата для тундры и северной тайги.

Построенная диаграмма дает возможность оценить текущие межгодовые тенденции в формировании слоя сезонного оттаивания. Если большинство из наблюдаемых глубин оттаивания, пересчитанных в относительные величины, устойчиво располагаются в правой части диаграммы ($СТС_{отн} > 1$), то мы имеем дело с потеплением климата. Соответственно, наоборот, если величины располагаются в левой части ($СТС_{отн} < 1$), то они соответствуют периоду похолодания (Vasiliev et al., 2003).

Приведенная диаграмма не только позволяет количественно установить реакцию ландшафтов, выраженную в сезонном оттаивании, при заданных сценариях и выявить тенденции (потепление или похолодание), но, главное, определить пределы ее изменения на климатические изменения в основных природно-климатических зонах на побережье Карского моря.

Сравнение реакции ландшафтов на климатические изменения, выраженной в глубине сезонного оттаивания и среднегодовой температуре ММП, показывает, что ее направленность строго противоположна. Другими словами, ландшафты, обладающие максимальной реакцией глубины оттаивания, обладают одновременно и минимальными изменениями среднегодовой температуры. И наоборот, минимальным изменениям в глубине оттаивания соответствуют максимальные изменения среднегодовой температуры.

Таким образом, проведенный анализ показал, что криолитозона является высокодинамичной системой, в которой различные ландшафты характеризуются индивидуальной реакцией на климатические изменения. Предельными случаями являются ландшафты болот и торфяников, обладающие экстремальной реакцией.

Особенности криогенного строения и льдистости

Криогенное строение и льдистость отложений побережья Карского моря, вследствие единой истории их формирования и последующих изменений, обладают общими чертами и закономерностями их пространственной изменчивости. Разумеется, локальные условия осадконакопления и криогенеза в разных секторах Карского моря накладывают индивидуальные особенности на

геокриологическое строение. В результате в криогенном строении прибрежных отложений выделяются как общие, так и индивидуальные черты.

Наиболее полно исследовано криогенное строение и льдистость севера Западной Сибири. Основные закономерности пространственной изменчивости рассмотрены в работе В.Т. Трофимова с соавторами (1980), а позднее на основе более полных данных и с учетом особенностей криогенеза - в монографии Г.И. Дубикова (2002). Разрезы четвертичных отложений, их криогенное строение и льдистость для целей их типизации по особенностям криогенеза изучались нами на Югорском п-ове - в районе м. Шпидлер, Западном Ямале - в районах устья р. Юрибей, Марре-Сале, Харасовой, м. Бурунный, Центральном Ямале - на Бованенковском ГКМ, районе оз. Ней-то.

В зависимости от условий криогенеза на Западном Ямале выделены пять основных типов криогенного строения:

- 1) континентальные и прибрежно-морские отложения, промерзшие преимущественно сингенетически, подстилаемые эпикриогеничными морскими и прибрежно-морскими отложениями;
- 2) синкриогенные континентальные и прибрежно-морские отложения, верхняя часть которых подверглась оттаиванию и вторичному промерзанию;
- 3) эпикриогенные морские и прибрежно-морские отложения, промерзшие до начала складкообразования;
- 4) эпикриогенные морские и прибрежно-морские отложения, оттаявшие после завершения складкообразования и промерзшие вторично;
- 5) синкриогенные отложения современных морских лаид.

Примером соотношения разных типов криогенеза может служить один из многочисленных разрезов, описанный нами в районе Марре-Сале (рис. 7).

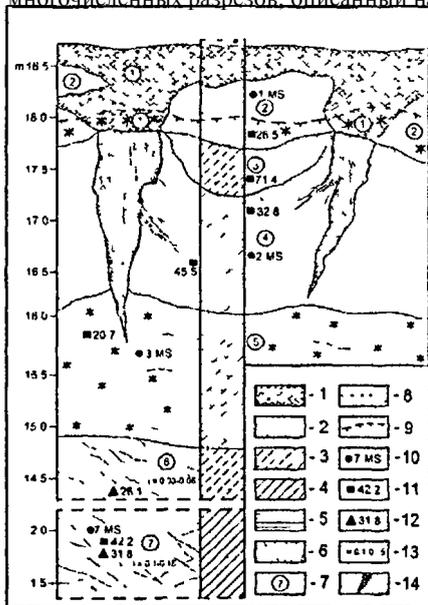


Рис.7. Криогенное строение разреза отложений третьей морской террасы, Марре-Сале

1 - торф, 2 - песок, 3 - супесь, 4 - суглинок, 5 - глина, 6 - осыпь, 7 - номер слоя, 8 - массивная криотекстура, 9 - подошва СТС, 10 - точки отбора и номера образцов, 11 - суммарная влажность, %, 12 - влажность минеральных прослоев, %, 13 - объемная льдистость шлировая, в долях единицы, 14 - повторно-жильный лед

В разрезе синкриогенная песчано-супесчаная толща с микролинзовидной и массивной криогенными текстурами, перекрытая сверху торфяными отложениями, подстилается снизу эпикриогенными суглинками, глинами и супесями с косослоистой и неполно-сетчатой криогенными текстурами. В диссертации рассмотрены разрезy всех типов криогенных толщ и приведены их параметры и значения льдистости.

Подземные льды

Изучение криогешюго строения ММП на побережье Карского моря позволяет выделить три основных типа подземных льдов: 1) повторно-жильные льды; 2) современные залежеобразующие льды береговой зоны, 3) пластовые льды.

Повторно-жильные льды достаточно хорошо изучены (Васильчук, 1980, 1992, Дубиков, 2002, Трофимов и др., 1980 и др.). В целом для побережья Карского моря характерны сравнительно небольшие повторно-жильные льды, их ширина поперу составляет, как правило, менее 2-3 м, а высота несколько метров. Хотя, в районе оз. Халэв-то (Центральный Ямал) нами изучена древняя ледяная жила глубиной около 18м. Но это скорее исключение, чем правило.

Современные залежеобразующие льды береговой зоны представлены тремя формами - перекристаллизованные современные снежники в волноприбойных нишах, покровно-натечные льды, современные трещинно-жильные льды. В геокриологическом отношении эти ледяные тела не играют значительной роли, но они оказывают существенное влияние на динамику и механизм разрушения берегов.

Пластовые льды изучались нами в районе мыса Шпиндлера (совместно с М.О. Лейбман, А.И. Кизяковым), в районе Марре-Сале, и в районе Харасовея. Кроме того, пластовые льды изучались так же в районе Бованенковского ГКМ (совместно с М.О. Лейбман, А.И. Кизяковым и Г. И. Ржанициным) и районе оз. Ней-то (совместно с Ю.Л. Шуром и Л.И. Вейсманом).

Вслед за В.И. Соломатиным (1992) и Н.А. Шполянской (2001) мы считаем, что на побережье Карского моря присутствуют пластовые льды разного генезиса. В качестве примера различного соотношения ледяных залежей и вмещающих пород приведены разрезy пластовых льдов в районе Марре-Сале (рис. 8).

Как видно из рисунка, для пластового льда первой генерации (А) характерен согласный контакт ледяного тела и перекрывающих пород. По имеющимся данным (Дубиков, 2002 и др.) и нижний контакт пластовых льдов этого типа также имеет согласный характер. Такие пластовые льды, как правило, приурочены к морским глинистым отложениям. Напротив, пластовые льды второй генерации (Б) имеют несогласные верхний и нижний контакты и приурочены к контактам морских глинистых отложений и перекрывающих их песчаных толщ.

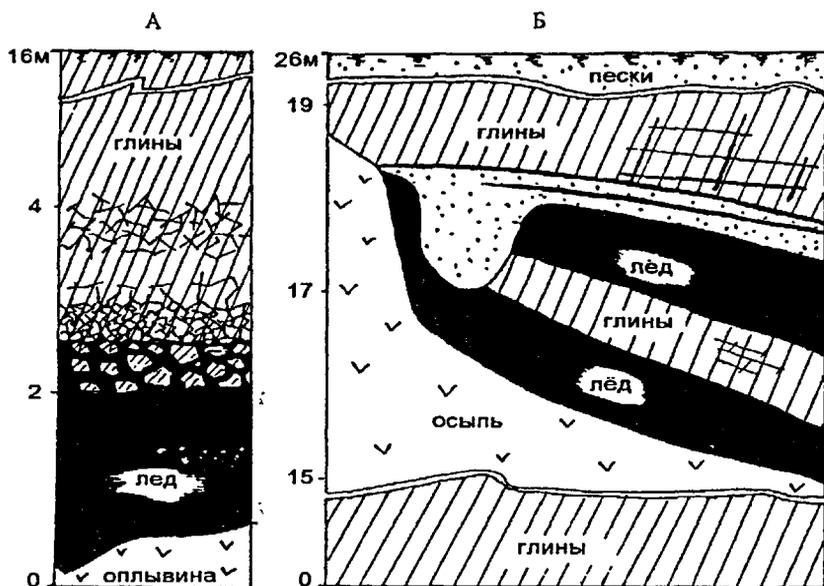


Рис. 8. Строение разрезов пластовых льдов первой (А) и второй (Б) генерации в районе Марре-Сале.

Важно отметить, что на примере Марре-Сале установлено совместное присутствие в одном разрезе пластовых льдов разных генераций. К такому же выводу одновременно с нами пришел и Ф.А. Романенко (2001).

Рассмотренные примеры морфологии льдов и геокриологического строения обнажений с пластовыми льдами позволяют утверждать, что на побережье Карского моря представлены пластовые льды разного генезиса, морфологии, мощности и с различным геокриологическим строением вмещающих отложений.

4. ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ДИНАМИКУ МОРСКИХ БЕРЕГОВ

В науке о берегах принято все факторы, влияющие на динамику берегов, разделять на две группы: пассивные и активные (Каилип и др., 1991). Применительно к морским берегам в Арктике это деление достаточно условно и не отражает особенностей взаимодействия моря и суши в области криолитозоны. Таким образом, при рассмотрении факторов, влияющих на динамику морских берегов в Арктике более целесообразно разделить их по природным средам и отдельно оценивать влияние климата, гидродинамических параметров моря и физико-геологических факторов.

Климат

В соответствии с климатическим районированием Арктики (Прик, 1971) Карское море относится к восточному району Атлантического сектора

Северного Ледовитого океана. Архипелаг Северная Земля образует естественную географическую границу сектора. Район испытывает значительное влияние циркуляционных процессов в Северной Атлантике, особенно Исландской депрессии (Природные условия..., 1997).

Важнейшими характеристиками климата, влияющими на динамику морских берегов, являются особенности барического и циркуляционного режима, температура воздуха, и ветер.

Барический и циркуляционный режим. Поле атмосферного давления и связанная с ним циркуляция атмосферы имеет некоторые, хорошо выраженные особенности, которые определяют чередование режимов в атмосфере полярной области.

Замечено, что изменение режимов в атмосфере имеет некую периодичность (Hurrell, 1995, Thompson, Wallace, 1998). Средние многолетние чередования режимов изменения атмосферного давления принимаются за климатический шаблон (стандарт), а отклонения от него принято характеризовать индексом осцилляции. По физическому смыслу индекс осцилляции (АО) определяется как относительная скорость изменения атмосферного давления в циркумполярной области. Установлено, что при положительных значениях индекса АО вдоль морского побережья в Западном секторе Арктики формируется устойчивая полоса с повышенным волнением на море или даже полоса штормов. Наоборот, при отрицательных величинах индекса АО полоса штормов смещается к югу и затрагивает побережье западной и южной Европы. В арктической зоне в это же время формируется спокойная обстановка, без повышенного волнения на море. Иногда расчеты проводятся для всей Североатлантической области, тогда принято употреблять термин «индекс CAO». На рис. 9 приведено изменение индексов АО и CAO во времени. Как видно из рисунка, начиная с 1970-х годов, индексы имеют явную тенденцию к повышению, достигают максимума в 1990-х г. и далее снижаются. Временной ход кривых АО и CAO очень близок.

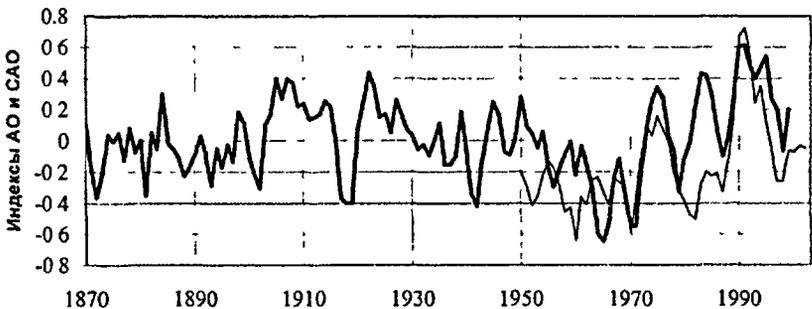


Рис. 9. Изменение индексов CAO (толстая линия) и АО (тонкая линия) во времени.

Температура воздуха является важнейшим климатическим показателем, определяющим как изменения геокриологических условий в прибрежной зоне, так и гидродинамические параметры моря, в первую очередь - продолжительность безледного периода. Наибольший интерес представляет анализ изменения температуры воздуха во времени, поскольку именно с этими изменениями можно увязать тенденции в динамике морских берегов. Оценка закономерностей изменения температуры воздуха в Российской Арктике проведена А.В. Павловым (Павлов, 2001, 2002, 2003). По общему мнению, в последние 30-35 лет наблюдается общее потепление климата. При этом наибольшее потепление характерно для континентальных районов. На морских побережьях потепление выражено гораздо более слабо (Павлов, 2001). По данным А.В. Павлова и Г.В. Ананьевой (2004) максимальное повышение среднегодовой температуры воздуха за последние 50 лет наблюдается в субарктических районах побережья Карского моря и составляет около ГС. Минимальное повышение характерно для островов Новая Земля, здесь оно не превышает 0.2°C, или вовсе не наблюдается.

Ветер. Для анализа использованы среднесуточные характеристики ветров по данным метеостанции Марре-Сале, как наиболее представительной по крайней мере для центральной части побережья Карского моря. Данные о ветре собраны в компьютерную базу данных, в которой содержатся ежесуточные показатели скорости и направлении ветра в теплый период.

Анализ собранных данных показал, что в распределении скоростей ветра имеется ярко выраженный максимум, соответствующий скоростям 2-5 и 5-10 м/с. В некоторые годы может наблюдаться преобладание скорости 2-5, в другие 5-10 м/с. Но в целом их повторяемость близка друг к другу. Повторяемость скорости выше 10 м/с (штормовые ветра) очень невелика и составляет, как правило, не более 5%. В преобладающих направлениях ветра превалируют ветра северных и северо-западных румбов.

Особенности гидродинамики моря.

Температура морской воды является важнейшим фактором термоабразии морских берегов в Арктике, поскольку развитие деструктивных процессов здесь в первую очередь связано с оттаиванием многолетнемерзлых пород. На рис. 10 приведен временной ход температуры воздуха и морской воды (А) и корреляция между ними (Б) на примере района Марре-Сале.

Как видно из рисунков, в зимнее время температура морской воды примерно постоянна и составляет -1.6 -1.8°C. В летнее время наблюдается хорошая корреляция между температурами воздуха и морской воды.

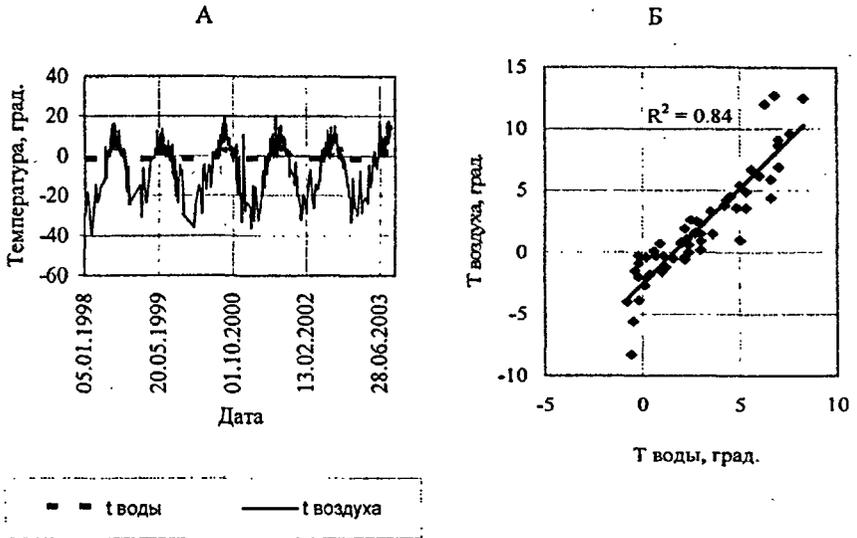


Рис 10. Изменение температуры воздуха и морской воды во времени (А) и корреляция между ними в летний период (Б).

Ветровое волнение. Волны являются главным фактором разрушения морских берегов. В процессе работы были собраны данные о ежесуточных значениях высоты волн в течение безледного периода за 1989–2003 гг. Так же были проведены разовые наблюдения за длиной и периодом морских волн. Анализ полученных данных показал, что в спектре высот волн резко преобладают волны с высотой до 0.5 м. Их повторяемость составляет, как правило, не менее 0.75. Доля волн штормовой высоты (более 1 м.) не превышает 0.1.

Важно отметить, что не наблюдается прямого соответствия между преобладающими направлениями ветров и направлением подхода волн к берегу. При отсутствии фактических данных о высоте морских волн и направлении их подхода к берегу в расчетах отступления морских берегов, как правило, используются модели, в которых так или иначе параметры морских волн или сразу их энергия рассчитывается по метеорологическим данным о ветре (Попов, Совершаев, 1982, Ogorodov, 2002). Анализ фактических данных показал, что между скоростью ветра и высотой волн, хотя и наблюдается корреляция, ее уровень сравнительно невысок. Поэтому можно ожидать, что энергия морских волн, рассчитанная по данным о скорости ветра, будет определена с большими ошибками - порядка 100%.

На основе результатов собственных наблюдений и с учетом опубликованных данных (Советская Арктика, 1970, Леонтьев, 2002, и др.)

построены диаграммы, связывающие высоту (H), период (T) и длину (L) волн. Полученные зависимости хорошо описываются формулами:

$$T = 3.95 H^{0.6}; \quad L = 19.1H - 0.66; \quad L = 6.03 e^{0.31T}.$$

Продолжительность безледного периода, хотя и относится по формальным признакам к пассивным факторам, прямо определяет динамику морских берегов в Арктике. Наиболее важно установить влияние климатических изменений на продолжительность безледного периода. На рис. 11. показано изменение

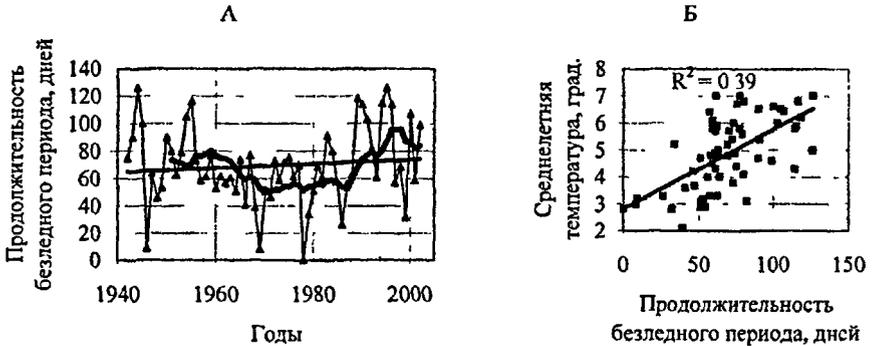


Рис.11. Изменение продолжительности безледного периода (А) во времени и его корреляция с среднелетней температурой воздуха (Б), Марре-Сале.

продолжительности безледного периода во времени (А) и его корреляция с среднелетними температурами воздуха (Б). Как видно из рисунка, общей тенденцией в изменении продолжительности безледного периода является, во-первых, положительный тренд, т.е. общее увеличение продолжительности безледного периода в целом, во-вторых, колебательный характер временных изменений. Изменения продолжительности безледного периода и среднелетней температуры во времени происходят синхронно.

Разумеется, на продолжительность безледного периода оказывают влияние множество факторов, но все же, вероятно наибольшая роль в деградации ледового покрова принадлежит летней температуре воздуха. Для оценки этого эффекта построен график корреляции продолжительности безледного периода и среднелетней температуры воздуха (рис.11Б). Конечно, при величине радиуса корреляции 0.39 вряд ли стоит говорить о тесной связи среднелетней температуры воздуха и продолжительности безледного периода, но положительная зависимость между этими величинами явно присутствует.

Установлена так же положительная связь между продолжительностью безледного периода и значениями индекса АО (CAO).

Важно отметить, что **межгодовые изменения индекса АО (CAO), температуры воздуха и продолжительности безледного периода во времени в Западном секторе Российской Арктики происходят синхронно.**

Физико-геологические факторы

При постановке исследований влияния физико-геологических факторов на динамику морских берегов Российской Арктики необходимо было принять во внимание то обстоятельство, что в опубликованной литературе практически нет никаких количественных данных о влиянии геологического строения берегов на темпы их разрушения. Также отсутствуют конкретные сведения о влиянии льдистости. В лучшем случае можно найти упоминания о том, что особенности разрушения берегов связаны с составом пород, слагающих берега, и их льдистостью. Поэтому главными задачами было установить количественные характеристики влияния состава пород и их льдистости на скорость разрушения берегов, сложенных дисперсными породами в криолитозоне.

Эрозионная прочность мерзлых дисперсных пород

Для сравнительной оценки размываемости мерзлых дисперсных пород, преимущественно слагающих берега Карского моря, были проведены полевые эксперименты (Шур и др., 1984) в районе Марре-Сале, оз. Ней-то и районе Харасовея по размыванию пород в естественном залегании с использованием гидравлической помпы. Понимая всю условность соответствия размывания пород гидравлической помпой и реального геологического процесса, мы исходили из того, что физико-геологические механизмы размывания в обоих случаях более или менее подобны.

Результаты полевых экспериментов сведены в таблицу 1. Из таблицы видно, что минимальной эрозионной прочностью обладают мелкие пески, как в талом, так и в мерзлом состоянии, максимальной - тяжелые суглинки. Таким образом, по мере возрастания дисперсности пород наблюдается увеличение их эрозионной прочности.

Таблица 1.

Результаты полевого определения эрозионной прочности пород.

Порода	Пределы пластичности		Плотность, г/см ³	Влажность, %	Эрозионная прочность, н *			R _w /R _r
	W _T	W _P			R min	R max	R ср.	
Песок мелкий, мерзлый	-	-	1,43	29	9•10 ⁴	1,8•10 ⁵	1,3•10 ⁵	26
Песок мелкий, талый	-	-	1,54	12			<5•10 ³	
Песок пылеватый, талый	-	-	1,47	9			6•10 ³	
Суглинок легкий, мерзлый	32	26	1,83	32	1,8•10 ⁵	6,9•10 ⁵	3,7•10 ⁵	11

Суглинок легкий, талый			1,85	33			$0.3 \cdot 10^5$	
Суглинок средний, мерзлый	34	23	1,89	30	$2.4 \cdot 10^5$	$1.1 \cdot 10^5$	$4.5 \cdot 10^5$	8
Суглинок средний, талый			1,92	33			$0.6 \cdot 10^5$	
То же, переувлажнен ый			1,88	37			$< 3 \cdot 10^4$	
Суглинок тяжелый, мерзлый	30	19	2,05	30			$> 10^6$	

* значения эрозионной прочности определены при температуре морской воды + 3-4°C.

! Оказалось, что для талых и мерзлых пород сохраняется ряд (в порядке возрастания эрозионной прочности): песок → пылеватый песок → супесь → суглинок → глина.

Тем не менее, в реальных условиях различия в составе дисперсных пород в пределах конкретного участка мало сказываются на конфигурации берега и скорости его разрушения (отступления). Это объясняется высокой фациальной изменчивостью состава пород, слагающих берега Карского моря, по простиранию и глубине, которая выравняет различия в сопротивлении пород размыву.

Льдистость мерзлых пород Исследование влияния льдистости пород на разрушение морских берегов выполнялось в два этапа. На первом этапе главной задачей работ было достоверно установить сам факт влияния льдистости на скорость разрушения берегов. Качественные наблюдения показывают, что льдистость мерзлых пород оказывает существенное влияние на темпы разрушения берега. Для количественной оценки на участке побережья длиной около 4.5км в районе Марре-Сале было выполнено опробование прибрежных обнажений сначала по прореженной, а затем по сгущенной сети и проведено сравнение скорости отступления берега с суммарной льдистостью береговых отложений. Рис. 12 иллюстрирует влияние суммарной льдистости береговых отложений на величину отступления берега. Несмотря на небольшое количество точек на графике, его достоверность не вызывает сомнения в силу детальности исследования.

Как видно из рисунка, имеется тесная связь между льдистостью пород и величиной их отступления при термоабразии. Вероятно, предельным случаем является разрушение берегов, сложенных ледовым комплексом. Здесь суммарная объемная льдистость достигает 80-90%. Под влиянием процессов термоабразии и термоденудации скорость разрушения таких берегов может составлять до 5 м/год и более (Арэ, 1980, Grigoriev et al., 2001 и др.).

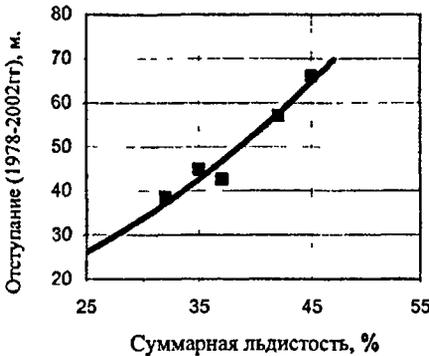


Рис. 12. Влияние суммарной льдистости пород на интегральную величину отступления берега (1978-2002гг).

Таким образом, экспериментальные исследования влияния физико-геологических факторов показали, что состав и суммарная льдистость прибрежных отложений являются весьма важными параметрами, непосредственно влияющими на динамику морских берегов в криолитозоне.

5. ДИНАМИКА МОРСКИХ БЕРЕГОВ

Характеристика районов полевых работ

Основной целью исследований на всех полевых участках было изучение геоморфологических, геологических и геокриологических особенностей морских берегов, динамики и механизма их развития. По - возможности, собирались климатические данные и гидродинамические характеристики моря.

При выборе районов работ было необходимо в максимальной мере охватить различные типы морских берегов, отличающихся по геологическому и геокриологическому строению, и развивающихся в разных природных условиях, в т.ч. климатических и гидродинамических. Исследование динамики берегов Карского моря проводилось с разной степенью детальности в районе м/ст Марре-Сале (Западный Ямал), Марре-Сальские кошки (Юго-западный Ямал), м. Бурунный и м. Харасовэй (Западный Ямал), м. Шпиидлера (Югорский п-ов), западный берег Енисейского залива (устье р. Танама). Для выявления особенностей динамики морских берегов в других геокриологических и гидродинамических условиях по согласованной с автором программе некоторые виды наблюдений проводились на побережье Баренцового и Печорского морей - в районе м. Болванский - устье р. Печоры- Г.В. Ананьевой и М.З Каневским и на западном побережье о. Колгуев - М.О. Лейбман, А.И. Кизяковым, Ю.Г. Фирсовым.

В диссертации приведены данные о природных, климатических, геокриологических условиях каждого из районов работ.

Методика и виды исследований

В диссертации критически рассмотрены различные методы исследования динамики морских берегов. Методологической основой изучения динамики берегов, принятой автором, является комплексный мониторинг прибрежно-

морской области. Система мониторинга включает в себя изучение морфологии прибрежной зоны, включая и подводный склон, геокриологических условий в их динамике, собственно систематические наблюдения за динамикой и механизмом переработки берегов, сбор данных о климате территории и гидродинамике моря. Применительно к конкретным участкам наблюдений виды исследований приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Участки экспериментальных наблюдений и виды исследований

Участок	Геоморфология	Отложения	Высота берегового обрыва, м.	Виды исследований*	Период исследований
Марре-Сале, Ямал	Третья и вторая морские террасы	Глины, пески	15- 30	ГС, КрС, ГКУ, ОР, СК, АФС, DGPS, ЛТ, Ств., ММД	1978-2003
Марре-Сальские кошки, Ямал	Низкие аккумулятивные острова	Пески	-	ГС, ОР, СК	2003
Харасовэй, Ямал	Третья и первая морские террасы	Глины, пески	12- 25	ГС, КрС, Ств.	1978-1979, 2001
м. Шпиндлера, Югорский п-ов	Грядово-холмистая ледниково-морская равнина	Глины, пески	25- 45	ГС, КрС, ОР, АФС, ММД	1999-2003
Устье р. Танама	Четвертая морская терраса	Глины, пески	20-50	ГС, КрС	1979
м. Болванский, устье р. Печора**	Полого-холмистая ледниково-морская равнина	Суглинки, пески, торф	5- 30	ГС, КрС, ГКУ, ОР, Ств., ММД	1999-2003
Западное побережье о. Колгуев***	Пологая ледниково-морская равнина	Глины, суглинки с валунами, пески	40- 50	КрС, КС, АФС, ММД	2002

* В видах исследований: ГС- геологическое строение, КрС - криогенное строение и льдистость, ПСУ - динамика геокриологических условий, ОР-опробование геологических разрезов, СК- сравнение топографических карт, АФС- сравнение АФС, КС- сравнение космоснимков, DGPS- применение дифференциальной системы спутникового позиционирования, Ств.- наблюдения на закрепленных створах, ЛТ- съемки с помощью лазерного теодолита. ММД- морфология примыкающего участка морского дна.

"Исследования проведены совместно с Г.В. Ананьевой, М.З. Каневским (ИКЗ СО РАН).

"Исследования проведены совместно с М.О. Лейбман, А.И. Кизяковым (ИКЗ СО РАН), Ю.Г. Фирсовым (ВНИИОкеангеология).

Современная динамика морских берегов

В процессе исследований была проанализирована вся доступная литература, посвященная динамике морских берегов западного сектора Российской Арктики, и собраны сведения о скорости отступления берегов в различных его регионах. В обобщенной форме данные для побережья Карского моря приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Скорость разрушения берегов Карского моря.

Район	Высота обрыва, м.	Литология	Скорость разрушения берегов, м/год			Источник
			Max.	Min.	Средн.	
Северное побережье Таймыра		Коренные породы			0,2	Каплин и др., 1991.
Северо-западное побережье Таймыра	10-40	Глины, суглинки, пески, подстилаемые коренными породами	0,4	0,2		Романенко, 1998
Западное побережье Енисейского залива, устье р. Танама	20-40	Глины с прослоями песков	0,4	0,2		
Тазовский п-ов, м. Ямбург	10-30	Глины с прослоями песков			0,7	
Юго-западное побережье Обской губы, м. Салета	8-10	Пески	0,7		0,33	Медкова, 2002
Северо-западный Ямал, от м. Скуратова до м. Бурушного	8	Пески с прослоями глины			0,8	Воскресенский, Совершаев, 1998
м. Харасовей	10-25	Глины с прослоями	4,5	0,4		Геоэкология..., 1992
			2,0			Камалов и др., 2002

		песков, пески	3,0	0,5	1,4	
м. Белужий	До 40	Пески	1,0	0,5		Воскресенский, Совершаев, 1998
м. Марре-Сале	10-30	Глины, суглинки, пески			1,8	Троицкий, Кулаков, 1976
					2,5	Фирсов и др., 2002
			1,9	1,0		Крицук, Дубровин, 2000
			1,8	1,0	1,4	Шур и др., 1984
			3,3	0,5	1,7	Васильев и др., 2001
Юго-западное побережье Байдарачкой губы, устье р. Яра-яха	10-25	Пески, подстилаемые суглинками	0,9	0,05	0,4-0,5	Природные условия..., 1997
То же	6-10	Пески, торф	0,7	0,3		Природные условия..., 1997
Юго-восточное побережье Байдарачкой губы, в районе о.Левдиев	5-17	Пески с прослоями супесей и суглинков	3,5	1,0	1,7	Природные условия..., 1997
То же	2-3	Пески, супеси	0,6	0,2	0,4	Природные условия..., 1997
м. Шпиндлера			2,0	0,9	1,6	Kizyakov, Perednya, 2003

*при отсутствии ссылки на источник приведены собственные неопубликованные данные.

Как видно из таблицы, даже для одного и того же района разные исследователи приводят данные о скорости отступления берега, иногда разительно отличающиеся между собой. Особенно хорошо это видно на примере районов м. Харасовой и Марре-Сале. По нашему мнению, это связано с исключительно высокой пространственной и временной изменчивостью скорости разрушения берегов в криолитозоне вообще и в западном секторе Арктики в частности. Поэтому величины разрушения берегов, полученные в разные годы или для разных промежутков времени, да еще и разными методами, часто несопоставимы между собой (Шур и др., 1984, Vasiliev, 2003).

Результаты более чем 25 - летних собственных исследований сведены в компьютерную базу данных, организованную в среде Paradox- 5.0 для Windows.

В базе данных информация сосредоточена в виде четырех основных блоков и нескольких служебных файлов.

Морфология подводных склонов и ее связь с геологическим строением и динамикой берегов.

Морфология подводного склона изучалась на участках моря, примыкающих к термоабразионным берегам, площадью примерно 1 x 3 км. в районе Марре-Сале, м. Шпиндлера и на западном побережье о. Колгуев. В порядке сравнения на рис. 13 приведен рельеф подводного склона для районов Марре-Сале и о. Колгуев.

Как видно из рисунка, в целом рельеф морского дна в районе Марре-Сале достаточно спокойный. Изобаты практически параллельны береговой линии. Расстояние до 10-м изобаты составляет в среднем 2800 м, а общий уклон дна равен 0,0036. Следы воздействия волн прослеживаются до глубины 6 м, далее поверхность дна монотонно погружается до глубины 8-10 м.

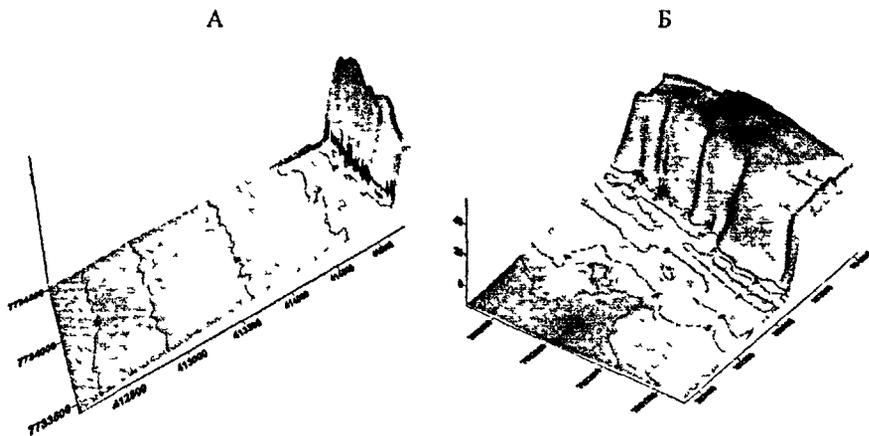


Рис. 13 Морфология подводных склонов на участках термоабразионных берегов, Марре-Сале (А) и о. Колгуев (Б)

Напротив, для подводного склона о. Колгуев характерен бугристо-западинный рельеф дна, изобаты имеют сложную петлеобразную форму. По нашему мнению, это объясняется дефицитом песчаного материала в разрезе отложений о. Колгуев и, возможно, также неоднородной осадкой при оттаивании мерзлых пород при переходе их в субаквальное состояние. Расстояние до изобаты 10 м. здесь составляет 1700 м, а общий уклон дна - 0,0055. Приведенный пример показывает, что, геокриологическое строение берега прямо влияет на рельеф подводных склонов.

Профили подводных склонов отражают также и их динамику (Are et al., 2000, Are, 2003). Однако анализ полученных результатов показывает, что уклон

морского дна, хотя и является важной характеристикой динамики морских берегов, но не может служить однозначным показателем скорости их разрушения в криолитозоне, поскольку на формирование рельефа подводных склонов существенное влияние оказывает геокриологическое строение берега.

Современная динамика морских берегов

Анализ полученных результатов показал, что отступление берега характеризуется исключительно высокой пространственной и временной изменчивостью. Максимальное отступление в районе Марре-Сале за 25 лет (1978-2003) составило около 68м., минимальное - 13м., при среднем - 42,2 м. Сравнение статистических характеристик величин отступления берега для участков второй и третьей морских террас показало, что средние величины отступления равны между собой - около 42м, но стандартное отклонение для третьей террасы составляет 11, а для второй террасы - около 8. Это объясняется, прежде всего, значительной неоднородностью геологического и криогенного строения берега, а так же высокими вариациями льдистости пород, слагающих берег третьей морской террасы. Участки берега, представляющие собой чередование фрагментов высокольдистых, в т.ч. и с пластовыми льдами, и малольдистых пород при разрушении образуют характерную фестончатую (зубчатую) форму кромки берегового обрыва, что хорошо различается на аэрофотоснимках.

На рис. 14 приведено изменение положения береговой линии во времени на примере Марре-Сале. Как видно из рисунка, в целом береговая линия смещается параллельно самой себе, но при этом в течение длительного времени северная (на рисунке - левая) часть берега устойчиво отступает с несколько более высокой скоростью. Возможно, это связано с повышенной льдистостью этого участка.

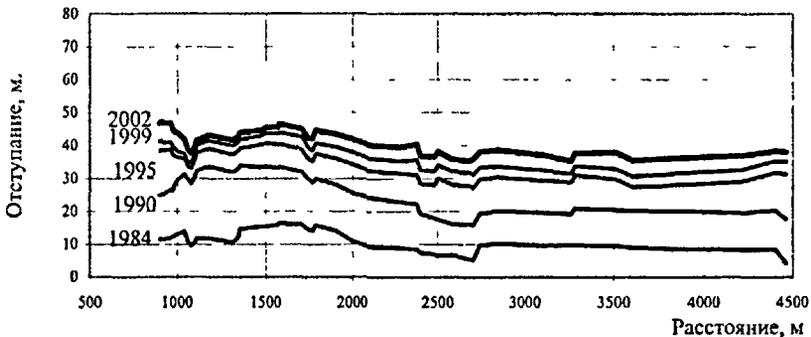


Рис.14. Изменение положения береговой линии по годам.

Для термоабразии характерна также высокая изменчивость во времени. Наблюдения в Марре-Сале показали, что средняя скорость отступления берега составляет 1,7 м/год, максимальная скорость наблюдалась в 1989 - 1990 гг. - до 3,3 м/год, минимальная - в 1999 г. - 0,5 м/год. В связи с высокой пространственной изменчивостью параметров термоабразии в качестве характерной необходимо принимать среднюю для всего участка наблюдений скорость разрушения берега.

Изменение скорости во времени не является случайным, а подчиняется хорошо выраженной зависимости (рис.15). Максимум приходится на 1989-1990 гг., а минимумы на 1978 г. и 1999 г. Установленное явление внутривековой ритмичности разрушения берегов для криолитозоны является новым, хотя для берегов вне криолитозоны многолетние ритмы в скорости морской абразии известны на примерах Черного и Балтийского морей, а так же Мексиканского залива (Есин и др., 1980).

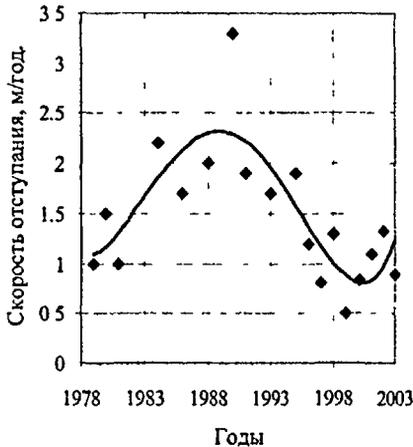


Рис.15. Изменение скорости отступления бровки берегового обрыва во времени, Марре-Сале.

Похожие данные получены М.Н. Григорьевым с соавторами для района м. Быковский - море Лаптевых и района м. Крестовского - Восточно-Сибирское море (Григорьев и др., 2000). Но здесь ритмичность скорости разрушения берегов выражена гораздо слабее.

Проявление ритмичности связано с особенностями атмосферной циркуляции и океанической гидродинамики циркумполярной области Арктики, а так же

региональной гидрометеодинамической обстановки.

По физическому смыслу разрушение и отступление морских берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами, вызывается постоянным нарушением профиля равновесия берегов вследствие размыва основания берегового клифа и подводного склона. Это инициирует деструктивные процессы в верхней части клифа. Поэтому следует ожидать устойчивую связь между скоростью отступления берега и энергией волнового воздействия на него. На основе фактических данных о ежесуточных высотах волн, периодах и направлении подхода их к берегу рассчитаны величины годовых суммарных величин энергии морских волн (Nequette, Barnes, 1990). Энергия для каждого

направления рассчитана как сумма произведений квадрата высоты волны на продолжительность волнения, деленная на величину периода. Общая энергия равна сумме энергий с каждого направления с учетом коэффициентов, позволяющих учесть ортогональную к берегу составляющую волновой энергии.

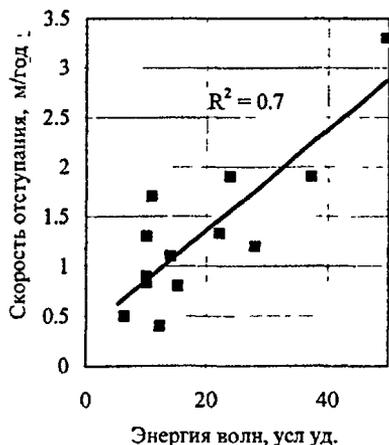


Рис 16. Корреляция между величиной энергии волн и скоростью отступления берега, Марре-Сале.

Как видно из рисунка 16, действительно, наблюдается хорошая корреляция между суммарной энергией морских волн и скоростью отступления берега. Интересно, что прямая на рис. 16 не проходит через начало координат, а отсекает на оси скоростей (ординат) отрезок примерно 0,4 м/год. Т.е., если не наблюдается волнового воздействия на основание клифа, то начальная скорость отступления кромки берега за счет термоденудации составит около 0,4 м/год.

Вероятно, эта величина термоденудации является локальной нормой, относящейся к данным климатическим и геокриологическим условиям.

В научной литературе часто встречается мнение о решающей роли штормов в механизме и скорости разрушения морских берегов, в т.ч. сложенных многолетнемерзлыми породами. Полученные данные позволяют количественно оценить это явление для условий Западного Ямала. Анализ результатов показал, что за счет штормов с высотой волн более 1 м энергия волн увеличивается не более чем на 25%. При этом величина отступления берега возрастает примерно на 20-25%. Таким образом, для исследуемого участка арктического побережья, основной вклад в разрушение берегов вносит волновое воздействие с высотой волн менее 1м. Именно их длительное воздействие в безледный период приводит к размыву основания берегового клифа, нарушению его устойчивости и, в конечном итоге, к отступанию берега. Незначительное влияние штормов на скорость разрушения морских берегов подтверждается и низким уровнем корреляции между энергией штормов и скоростью отступления берега. Коэффициент корреляции между этими величинами составляет всего 0.1, т.е. нельзя говорить о более или менее устойчивой связи между ними.

Таким образом, в мелководных морях Российской Арктики, к которым относится и Карское море, отступление берегов полностью контролируется процессами разрушения- волнами нижней части клифа и прибрежной части

подводного склона. В таком случае можно говорить о сбалансированности прибрежной геосистемы, включающей береговой клиф, пляж и, по крайней мере, часть подводного склона до глубины волнового воздействия. Динамика этой системы полностью определяется волновым воздействием на основание клифа и подводного берегового склона. Система обладает прямой положительной связью и в качестве реакции на воздействия волн стремится выработать равновесный профиль, что и приводит к разрушению клифа и его отступанию.

Динамика берегов и изменения климата

Прямой связи динамики берегов и летней температуры воздуха не установлено. Тем не менее, исходя из представлений о физических процессах разрушения берегов, можно предположить, что климат в значительной мере влияет на процессы разрушения морских берегов.

Как было установлено, продолжительность безледного периода прямо связана с величиной среднелетней температуры воздуха. Была выявлена положительная связь скорости разрушения берегов и продолжительности безледного периода. Кроме того, ранее установлена связь температуры воздуха и морской воды в летний период. Таким образом, можно говорить об опосредованном влиянии летней температуры воздуха на темпы разрушения берегов через продолжительность безледного периода и температуру морской воды. Вероятно, сравнительно низкое влияние тепла воздуха объясняется невысокой льдистостью прибрежных отложений и небольшим вкладом процессов термоденудации в разрушение берегов. При средней скорости отступления берега в районе Марре-Салс в 1.7 м/год доля термоденудации не превышает 0.4 м/год. Для морских берегов, сложенных высокольдистыми породами, можно ожидать более тесной связи между среднелетними температурами воздуха и скоростью отступления клифа.

Очевидно, что разрушение морских берегов под действием волн прямо связано с барико-циркуляционным режимом атмосферы, который характеризуется индексом Арктической осцилляции (АО). Для западного сектора Российской Арктики, включая и Карское море, усиление ветрового волнения наблюдается при положительных значениях индекса АО. Поэтому можно ожидать, что влияние климатических изменений на разрушение берегов реализуется через связь индекса АО и скорости отступления берегов.

На основе анализа результатов собственных наблюдений за отступанием берегов и опубликованных данных М.Н. Григорьева (Григорьев и др., 2000) и Дж. Брауна (Brown et al., 2003) установлено соответствие изменений во времени индексов АО и соответствующих скоростей разрушения берегов (рис.17 А). Как видно из рисунка, для района Марре-Сале временной ход индекса АО и скорости отступления берега идентичны. Выявлена также хорошая корреляция между величиной индекса АО и скоростью отступления берегов (рис.17 Б).

• Исходя из физической природы формирования барико - циркуляционного режима в циркумполярной области можно ожидать, что наибольшая связь между

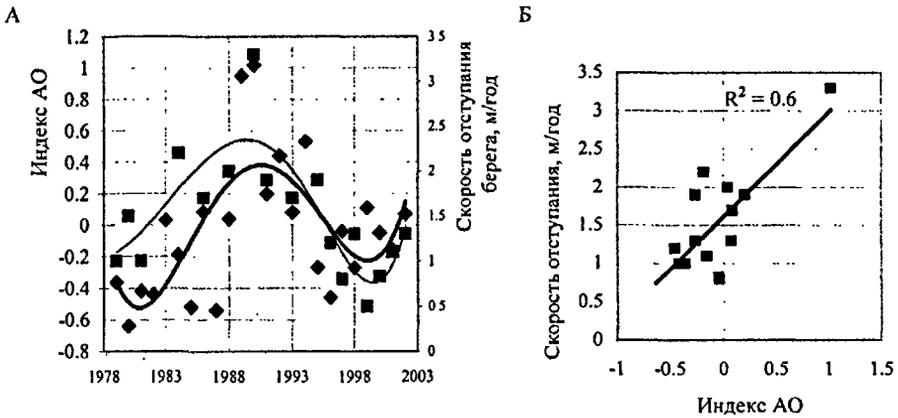


Рис. 17. Изменение скорости разрушения берега (тонкая линия) и индекса АО (жирная линия) во времени (А) и корреляция между ними (Б)

индексами АО, ветрами, волнением на море и, следовательно, скоростями отступления берега будет наблюдаться в Западном секторе Арктики. По мере смещения к востоку эти связи будут ослабевать, и минимум связей будет характерен для района Канадского архипелага. Косвенно это предположение подтверждается результатами анализа Д. Эткиисона (Atkinson, Solomon, 2003) пространственного распределения уровня связей между индексом АО и скоростью и направлением ветров в циркумполярной области. По этим данным максимальный уровень связей наблюдается в западном секторе Арктики. Минимальные связи между этими величинами характерны как раз для Канадского арктического побережья.

Установленная связь скорости отступления берегов и барикоциркуляционного режима атмосферы позволяет сделать очень важный вывод о том, что изменения скорости разрушения морских берегов во времени происходят синхронно во всем западном секторе Российской Арктики.

Механизм разрушения берегов

Для изучения механизма разрушения морских берегов было выполнено их обследование и детальное описание криогенных деструктивных процессов. Всего на Югорском п-ове и Ямале было обследовано около 100 п. км. В

процессе обследования было выделено четыре преобладающих механизма разрушения:

1. *Термоабразионный механизм разрушения.* Развивается преимущественно на участках берега со сравнительно льдистыми глинами в основании разреза, а также на приглубых участках с повышенной волновой активностью.

2. *Обвальнo-осыпной механизм разрушения.* Присутствует на участках берега, сложенных сравнительно малольдистыми песками.

3. *Оползневой механизм разрушения.* Характерен для участков берега, сложенных преимущественно высокольдистыми глинистыми отложениями.

4. *Термоденудационно-термоэрозионный механизм разрушения.* Характерен для участков с залежеобразующими льдами (ПЖЛ, пластовыми).

Чаще всего отмечается комбинированный тип разрушения (1+2, 2+3 и т.д.).

На основе статистического анализа установлено, что при всем многообразии деструктивных криогенных процессов ведущая роль в разрушении морских берегов Карского моря, сложенных многолетнемерзлыми песчано-глинистыми отложениями, в равной мере принадлежит комбинациям термоабразионного и обвальнo-осыпного, а также обвалью-осыпного и оползневого механизмов.

Моделирование и прогноз разрушения морских берегов

Применительно к разрушению морских берегов в криолитозоне можно выделить несколько групп моделей, описывающих влияние природных процессов.

К первой группе относятся строгие гидродинамические построения. Модели этой группы описывают изменения вещественных и энергетических потоков, таких как подводный транспорт взвешенных частиц, энергетическое воздействие волн (Леонтьев, 2002), теплообмен в системе «мерзлая порода - вода» (Малиновский, 1982) и другие элементы термоабразионного процесса с учетом их динамики.

Модели второй группы основаны на эмпирических зависимостях результирующих параметров термоабразии от характеристик природных и техногенных факторов (Лрэ, 1985, Разумов, 2000, 2001, 2002, Narin et al, 1998 и др.). Такие модели позволяют описать процесс термоабразии в целом, однако ориентированы в основном на стационарные условия, а их практическое использование осложнено необходимостью трудоемкого определения многочисленных эмпирических коэффициентов.

В диссертации выполнено стохастическое моделирование процесса разрушения берегов на примере Марре-Сале. По своей сути стохастическое моделирование основано на анализе свойств и продлении более или менее длинных рядов наблюдений. Расчеты проведены для двух вариантов: в первом

варианте продлевались непосредственно ряды наблюдений за отступанием берегов, насчитывающие 24 года; во втором варианте продлевались ряды наблюдений временной изменчивости индекса АО (СЛО) (рис. 9) и на основе связи индекса ЛО и скорости отступления берега (рис.17) вычислялись величины отступления берега на 20-летнюю перспективу. Результаты прогноза приведены на рис.18. Как видно из рисунка, первый вариант расчета, скорее всего, позволяют оценить минимальное отступление, а расчеты по второму варианту, соответственно,- максимальные величины отступления. Это связано с тем, что продолжительность первого ряда в 24 года явно недостаточна для прогнозирования на 20 лет, и расчет выполнен для условий снижающейся

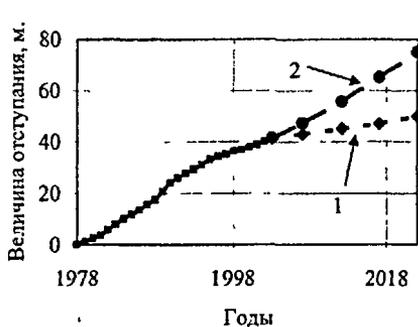


Рис. 18. Фактическая и прогнозная кривые отступления берега, Марре-Сале. 1 и 2 – варианты прогноза

скорости разрушения берега. Расчетные скорости отступления берега по первому варианту составили 0.8-0.9 м/год, по второму - 1.8-1.9 м/год при современной средней за 25 лет скорости 1.6-1.7 м/год.

На основе выявленных связей энергии морских волн и скорости отступления берега выполнен прогноз развития берегов в условиях повышения уровня моря со скоростью 1 см/год. В этом случае скорость отступления берега с современных 1.6

-1.7 м/год возрастет до 1.8-1.9 м/год.

Аналогично сделан расчет увеличения скорости разрушения берега при отборе песчаного материала с пляжей. При темпах отбора в 0.5 м по глубине скорость отступления берега возрастет приблизительно в 4 - 5 раз. Это вполне согласуется с результатами фактических наблюдений в районе м. Харасовый (Камалов и др., 2002). Здесь при добыче песка с пляжа скорость термоабразии возросла с 14 до 5 м/год.

6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СУШИ И МОРЯ. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Факторы формирования геоэкологических условий в мелководной прибрежной зоне

На формирование геоэкологических условий в прибрежной зоне решающее влияние оказывают как процессы разрушения морских берегов, так и, напротив, аккумуляции осадочного материала и образования аккумулятивных форм в прибрежной зоне. При разрушении морских берегов, сложенных дисперсными мерзлыми породами, в море поступает не только твердый

дисперсный материал, но и пресная вода вследствие оттаивания внутригрунтового льда, растворенные минеральные соли и органический углерод. По оценкам Ф.Э. Арэ (1998) эмиссия газов за счет оттаивания пород и высвобождения заземленных газов также существенна.

Основными источниками поступления твердых осадков, растворимых солей и органического углерода в прибрежно-морскую область являются разрушающиеся морские берега и вынос крупных рек. Таким образом, по условиям формирования геоэкологических условий прибрежно-морская область разделяется на два типа. В областях первого типа формирование геоэкологических условий происходит преимущественно под влиянием процессов взаимодействия суши и моря. В областях второго типа геоэкологические условия формируются, главным образом, под влиянием выноса крупных рек. По имеющимся оценкам (Арэ, 1998, Васильев, 1999, Воскресенский, Совершаев, 1998, Романкевич, Ветров, 2001) масштабы влияния этих факторов для Карского моря вполне сопоставимы между собой.

Типизация и картографирование морских берегов по геолого-геоморфологическому строению

Типизация и картографирование берегов Карского моря представляет собой важный этап исследований динамики морских берегов, который является основой для анализа пространственной изменчивости природных условий на морском побережье, определяющих особенности их динамики, структуры морских берегов, а также для оценки формирования геоэкологических условий побережья и баланса материала, поступающего в море. Была составлена серия тематических ГИС-ориентированных карт арктического побережья России, в т.ч. и побережья Карского моря.

На основе анализа геокриологического строения и геоморфологических условий прибрежно-морской области выполнена индивидуальная типизация морских берегов Карского моря. Все побережье было разбито на однородные в геокриологическом и геоморфологическом отношении участки. Для каждого из них было выполнено описание состава пород, геокриологического строения и льдистости, принадлежности к тому или иному геоморфологическому уровню, береговых форм, уклона прилегающей части подводного склона и динамики (рис.19). Карта составлена на ландшафтной основе (рис.19А). Всего на карте отражено более 200 индивидуальных типов морских берегов. Для оценки динамики берегов наиболее важно иметь карту динамических типов морских берегов, на которой можно видеть пространственное распространение берегов разных динамических типов. По динамическим признакам выделены **термоабразионные, стабильные и аккумулятивные** берега. Выделение только трех названных динамических типов морских берегов не охватывает всего их динамического многообразия. На северном побережье Таймыра и на Новой Земле широко распространены морские берега, сложенные коренными

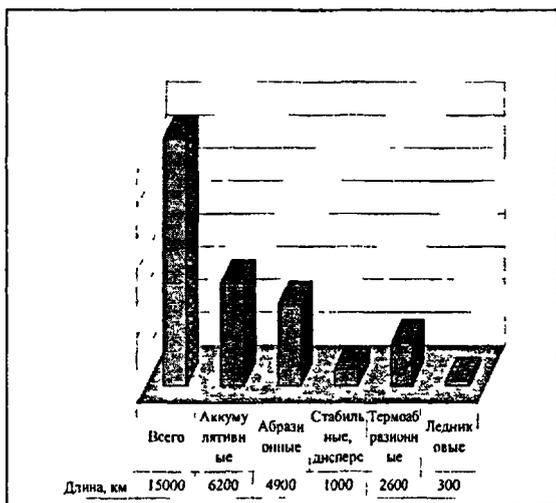


Рис.Ю. Структура берегов Карского моря по динамическим признакам.

Растворимые соли и органический углерод в прибрежных отложениях

Как известно (Брушков, 1998, Дубиков, 2002 и др.), практически все четвертичные отложения на побережье Карского моря засолены по морскому типу. В диссертации проанализированы все опубликованные данные по засоленности дисперсных пород и результаты собственных полевых исследований. Установлено, что, помимо известной закономерности снижения засоленности пород с севера на юг, существует и изменение засоленности отложений в широтном направлении (рис.21). Кроме того, на основании многочисленных данных рассчитано содержание вводно-растворимых солей основных геологических типов отложений Ямала (рис.22).

Такие закономерности в изменении засоленности объясняются нами условиями формирования четвертичных отложений на побережье Карского моря.

Данные по содержанию органического углерода ($C_{орг.}$) в четвертичных отложениях очень немногочисленны. Поэтому при проведении полевых работ особое внимание уделялось отбору проб и последующему лабораторному определению содержания $C_{орг.}$. Собранные данные пока позволили лишь приблизительно оценить содержание органического углерода. В целом для термоабразионных берегов Карского моря в первом приближении можно принять, что содержание органического углерода в песках составляет 0.1-0.6%, в глинах - 0.8-1.2%. Иная ситуация наблюдается в районах формирования аккумулятивных образований. На участках формирования низких затапливаемых песчаных аккумулятивных островов содержание органического углерода резко понижено и составляет всего 0.1%.

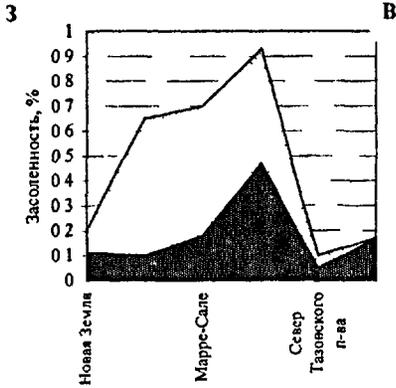


Рис. 21. Изменение засоленности глинистых отложений на побережье Карского моря в широтном направлении.

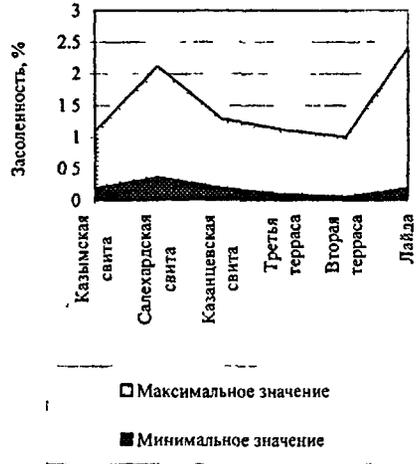


Рис.22. Соотношение засоленности морских глинистых отложений Центрального Ямала по возрасту.

На морских лайдах содержание $C_{орг}$ в песках вновь повышается до обычных значений - 0.1-0.6%, в глинистых отложениях - до 1.1%.

В полевых условиях также было оценено содержание органического углерода в основных типах почв, распространенных на побережье Карского моря.

Баланс материала, поступающего в Карское море при разрушении берегов

Результаты картографирования морских берегов и исследования состава, льдистости, содержания растворимых солей и органического углерода в прибрежных отложениях позволяют составить баланс материала, поступающего в Карское море при разрушении берегов.

На основе карт сегментации (рис. 19) для каждого сегмента рассчитана его протяженность, средняя высота берегового обрыва и оценена ежегодная величина отступления берега. Таким образом, рассчитан объем и масса материала, ежегодно поступающего в море. Для каждого сегмента по данным о льдистости также рассчитывалась доля оттаявшего льда в общей массе поступившего материала.

Исходя из состава пород и среднего содержания органического углерода и растворимых солей, присущих данному литологическому типу отложений, рассчитывалось поступление доли солей и органического углерода за счет

содержания его в прибрежных отложениях. Общий баланс находился простым суммированием результатов по каждому сегменту.

Результаты оценки баланса материала, ежегодно поступающего в Карское море за счет разрушения берегов, приведены на рис.23.

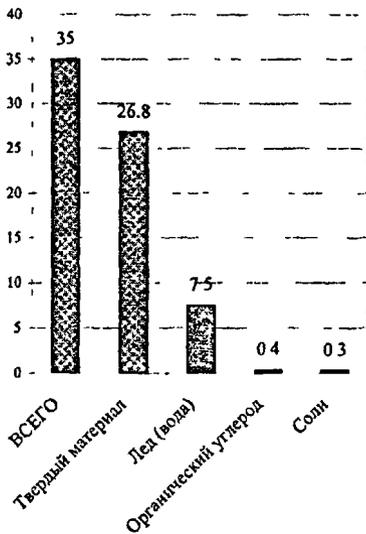


Рис. 23. Баланс материала, ежегодно поступающего в Карское море за счет разрушения морских берегов, млн. тонн.

Масса органического углерода, приведенная на рисунке, найдена как сумма масс углерода за счет прибрежных отложений и углерода почв. Как видно из рисунка, общее количество материала составляет около 35 млн. тонн, из них примерно 27 млн. тонн составляют твердые осадки, 7.6 млн. тонн - оттаявший лед, 0.4 млн. тонн - органический углерод и 0.3 млн. тонн - растворимые соли. Для сравнения, по данным В.В. Михайлова (1997) твердый сток

(за счет выноса крупных рек) в Карское море составляет 27.3 млн. тонн. Таким образом, поступление твердого материала в Карское море за счет разрушения берегов практически равно твердому стоку.

Сравнение результатов, полученных по органическому углероду, с данными Е.А. Романкевича и А.Л. Ветрова (2001), показывает, что по нашим оценкам поступление органического углерода за счет разрушения берегов в 2.5 раза меньше по сравнению с приведенными ими оценками в 1 млн. тонн. Это расхождение объясняется явно завышенными величинами отступления берегов, которые они использовали в своих расчетах.

Поступление в море растворимых солей и питательных веществ за счет разрушения морских берегов пренебрежимо мало по сравнению с выносом рек.

Кроме того, необходимо отметить, что ежегодные потери земель за счет термоабразии берегов Карского моря составляют около 170 га, в том числе в Ненецком ЛО - 30-40 га, в Ямало - Ненецком АО - 130-140 га.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования динамики морских берегов криолитозоны западного сектора Российской Арктики и закономерностей формирования

геоэкологических условий в прибрежно-морской области на примере Карского моря позволяют сделать следующие выводы:

1. В неотектоническом отношении все побережье Карского моря, кроме Западной Сибири и примыкающей части Югорского полуострова, испытывает устойчивое поднятие. На Западно-Сибирском побережье и прилегающей части Югорского п-ова, напротив, наблюдается опускание поверхности. Именно к этому региону приурочено широкое распространение процессов разрушения морских берегов. Другими словами, термоабразионные берега распространены, главным образом, в пределах областей устойчивого неотектонического прогибания.

2. Побережье Карского моря целиком расположено в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП). Мощность ММП изменяется в очень широких пределах - от нескольких десятков метров до 600м и более. Криогенная толща четвертичных отложений вследствие засоленности по морскому типу имеет двухъярусное строение. Верхний ярус представляет собой твердомерзлую толщу, нижний ярус представлен отрицательно температурными охлажденными породами. На основе анализа засоленности и состояния криогенной толщи выявлены зависимости изменения мощности твердомерзлой толщи и ее связи со среднегодовой температурой ММП. Предложена диаграмма, позволяющая в первом приближении оценить мощность твердомерзлой толщи на основе данных о среднегодовой температуре пород на глубине годовых теплооборотов. Установлено, что, вследствие отепляющего влияния моря, среднегодовая температура вблизи берега повышена примерно на 0.5-1.0° по сравнению с фоновой, характерной для данного региона.

Установлено, что криолитозона на морском побережье представляет собой высокодинамичную систему, чутко реагирующую на климатические изменения. Реакция криолитозоны отличается в разных типах мерзлотных ландшафтов. Реакция мерзлотных ландшафтов, независимо от их расположения в той или другой природно-климатической зоне, определяется только индивидуальными свойствами ландшафтов как природных систем и количеством поступившего тепла. Впервые выявлены количественные пределы реакции мерзлотных ландшафтов на климатические изменения. Предложен метод и диаграмма, позволяющая на основе результатов сравнительно краткосрочных наблюдений за межгодовой динамикой сезонного оттаивания оценить тенденции изменений в глубине оттаивания и ее соответствие потеплению или похолоданию климата.

Максимальной реакцией на изменения климата, выраженной в глубине сезонного оттаивания, характеризуются ландшафты болот. Напротив, ландшафты торфяников являются наиболее инертными. Эти же ландшафты характеризуются экстремальными реакциями на изменение климата, выраженными в среднегодовой температуре. Но направленность этой реакции строго противоположна. Другими словами, при изменении климата, в болотах будут максимально изменяться глубины сезонного оттаивания, но изменения

среднегодовой температуры будут минимальны. Наоборот, в торфяниках глубины сезонного оттаивания будут изменяться минимально, но среднегодовые температуры изменятся очень сильно.

Выделены пять типов мерзлых прибрежно-морских толщ по особенностям криогенного строения. Показано, что в прибрежно-морских разрезах четвертичных отложений могут одновременно присутствовать пластовые льды разных генераций.

3. Детально охарактеризованы факторы природной среды, влияющие на динамику морских берегов. Показано, что межгодовые изменения индекса Арктической осцилляции (ЛО), температуры воздуха и продолжительности безледного периода в Западном секторе Российской Арктики протекают синхронно.

Геокриологическое строение прибрежных толщ непосредственно влияет на скорость разрушения берегов. Составлены ряды мерзлых и оттаявших пород по их устойчивости к термоабразионному разрушению. Количественно охарактеризовано влияние льдистости мерзлых толщ на скорость и величину отступления берегов: при возрастании суммарной льдистости с 0.2 до 0.6, скорость разрушения берегов возрастает в 1.5-2.0 раза.

4. Установлено, что в пределах термоабразионных берегов прибрежно-морская область представляет собой единую сбалансированную природную систему, динамика которой полностью определяется воздействием морских волн на прибрежную часть подводного склона и основание берегового клифа. Вклад термоденудации в разрушении - морских берегов, сложенных относительно малольдистыми породами, составляет около 20%.

5. Многолетняя изменчивость скорости разрушения морских берегов имеет ритмичный характер. Охарактеризовано влияние факторов природной среды на темпы отступления берегов. Установлено, что изменение скорости отступления берегов во времени происходит синхронно в пределах всего западного сектора Российской Арктики. Это связано с особенностями изменения атмосферной циркуляции и климата в циркумполярной области.

Доказано, что, в отличие от сложившихся представлений, в Западном секторе Российской Арктики, в многолетнем аспекте роль штормов в разрушении морских берегов сравнительно невелика и не превышает 20%.

Разработан стохастический метод моделирования динамики берегов и впервые выполнен прогноз динамики морских берегов в условиях меняющегося климата, повышения уровня Мирового океана и при техногенных воздействиях. На примере района Марре-Сале определены пределы прогнозируемых величин отступления берегов в связи с изменениями климата. Минимальная скорость отступления берегов в ближайшие 20 лет составит 0.8-0.9 м/год, максимальная - 1,8-2.0 м/год.

6. По условиям формирования геоэкологических условий прибрежно-морскую область предложено разделять на два типа. В областях первого типа

формирование геоэкологических условий происходит преимущественно под влиянием процессов взаимодействия суши и моря. В областях второго типа геоэкологические условия формируются, главным образом, под влиянием выноса крупных рек.

Изучена структура морских берегов по геолого-геоморфологическим и динамическим особенностям и составлена карта индивидуальной типизации берегов Карского моря по геокриологическим и геоморфологическим признакам, а также карта динамических типов берегов Карского моря. Подсчитано, что термоабразионные берега занимают около 25% от общей протяженности берегов Карского моря.

Анализ данных по засоленности четвертичных отложений показал, что помимо известного понижения засоленности в меридиональном (с севера на юг) направлении, выявлено и закономерное изменение содержания растворимых солей в широтном направлении. Это связано с интргрессионным характером наступления моря в четвертичный период в окраинных зонах моря.

Впервые систематизированы данные о содержании органического углерода в четвертичных отложениях на побережье Карского моря. Для термоабразионных берегов среднее содержание органического углерода в песчаных отложениях составляет 0.1-0.6 %, в глинистых- 0.8-1.2%.

На основе составленных карт и данных о геокриологических особенностях отложений, содержании растворимых солей и органического углерода рассчитан баланс материала, поступающего в Карское море при разрушении берегов. При разрушении морских берегов в прибрежную область Карского моря ежегодно поступает 27 млн. тонн твердых осадков, около 7.5 млн. тонн оттаявшего льда, 0.4 млн. тонн органического углерода и 0.3 млн. тонн растворимых солей.

Список основных публикаций по теме диссертации.

Раздечы в монографіі і руководства.

Методы региональных инженерно-геокриологических исследований для равнинных территорий. Под ред. Е.С.Мельникова, Г.И. Дубикова. - М.: Недра, 1986.

1. Методические рекомендации по учету состава и структурно-текстурного строения мерзлых пород при прогнозе развития криогенных физико-геологических процессов. Отв. ред. С.Е.Гречишев, ЮЛ.Шур. - М.: ВСЕГИНГЕО, 1990.
2. Изучение инженерно-геокриологических и гидрогеологических условий верхних горизонтов пород в нефтегазоносных районах криолитозоны. Методическое руководство. Под ред. С.Мельникова, С.Е.Гречишева, А.В.Павлова. - М.: Недра, 1992.
3. Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и экологии. Под ред. Г.С. Вартаняна. - М.: ВСЕГИИГЕО, 1994.

Статьи

Методы изучения скорости термоабразии.// Береговые процессы в криолитозоне. - Новосибирск: Наука, 1984, с. 5-12, (соавторы- ЮЛ.Шур, Л.И.Вейсман, В.Г. Заиканов, В.В.Максимов, Н.П. Петрухин).

4. Новые результаты наблюдений за разрушением берегов в криолитозоне.// Береговые процессы в криолитозоне. - Новосибирск: Наука, 1984, с. 12-19, (соавторы- Ю.Л. Шур, Л.И. Вейсман, В.Г. Заиканов, В.В. Максимов, Н.П. Петрухин).
5. Новые методы исследования состава, строения и свойств мерзлых грунтов.// Пристендовый лист ВДНХ СССР. 1985, (соавторы- С.Е. Гречишев, Э.Д. Ершов, Л.В. Чистотинов).
6. Полевые изучения физико-механических свойств мерзлых и оттаивающих пород.// Методы инженерно-геокриологической съемки.- М.: ВСЕГИНГЕО, 1990, с. 111-118.
7. Термоабразия морских берегов на западном побережье Ямала.// Методы изучения криогенных физико-геологических процессов. - М., ВСЕГИНГЕО, 1992, с. 71-77, (соавтор- Е.В. Сауткин).
8. Оценка потенциальной опасности развития склоновых процессов на территории Бованенковского месторождения)/ Методы изучения криогенных физико-геологических процессов. - М.: ВСЕГИНГЕО, 1992, с. 109-113, (соавторы- Н.Г. Украинцева, Е.М.Шувалова).
9. Особенности мониторинга геологической среды территорий субъектов Российской Федерации, расположенных в криолитозоне.// Материалы первой конференции геокриологов России. - М.: МГУ, 1996, книга 3, с.317-326, (соавторы- Е.С.Мельников, Л.С.Язвин).
10. Методика и результаты крупномасштабных эколого- геологических исследований территорий рудных месторождений в криолитозоне.// Криосфера Земли, 1997, т.1, №4, с. 42-49, (соавтор- Д.СДроздов).
11. Измерения сезонно-талого слоя в Западной Сибири по программе CALM (база данных)7/ Криосфера Земли, 1998, т.2, №3, с. 87-90, (соавторы- Ю.В. Коростелев, Н.Г. Москаленко, В.Л. Дубровин).
12. Исследование пластового льда Югорского полуострова кристаллографическими методами7/ Криосфера Земли, 2000, т.4, №2, с.31-40, (соавторы - М.О. Лейбман, В.В. Рогов, О. Ингольфсон).
13. Пластовые льды в районе Марре-Сале, Западный Ямал.// Материалы второй конференции геокриологов России. - М.: МГУ. 2001, т.1, ч.2, с.188-194, (соавтор -В.В.Рогов).
14. Динамика термоабразионных берегов Западного Ямала.// Криосфера Земли, 2001, т.У, №1, с.44-52, (соавторы - С.И. Покровский, Ю.Л. Шур).
15. Результаты многолетнего мониторинга разрушения морских берегов западного сектора Российской Арктики.// Материалы Международной конференции "Экология северных территорий России, проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения". - Архангельск: 2002, с.493- 497.
16. Monitoring of permafrost conditions of the west part of the Yamal Peninsula.// The 25th Arctic 1995 Workshop. Quebec, Canada, 1995. p. 144-147, (соавторы -А.В. Павлов, Ю.Л. Шур).
17. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM Program: Research Designs and Initial Results).// Polar Geography, 2000, vol.24, N 3, p. 166-25 8, (соавторы - Дж. Браун, Ф. Нельсон, К. Хинкель и др.).
18. Shore Erosion in Russian Arctic.// Cold Regions Engineering. Proceedings of the eleventh International Conference. ASCE, 2002, p. 736-747, (соавторы - Ю.Л. Шур, М.З. Каневский, В.Г. Заиканов и др.).
19. The mechanism of the sea coast destruction in Marre-Sale, Western Yamal.// Reports on Polar and Marine Research, Ed. V. Rachold, J. Brown, S. Solomon. 2003, № 443, p. 110-113, (соавторы - М.З. Каневский, Ю.Г. Фирсов).

20. Permafrost controls of coastal dynamics at the Marre-Sale key site, Western Yamal.// Proceedings, Eighth International Conference on Permafrost, 21-25 July 2003, Zurich, Switzerland, Swets & Zeitlinger B.V., Lisse, The Netherlands, 2003, vol. 2: p. 1173-1178.
21. Tabular ground ice: cryolithological construction and crystalline structure.// Proceedings, Eighth International Conference on Permafrost, 21-25 July 2003, Zurich, Switzerland, Swets & Zeitlinger B.V., Lisse, The Netherlands, 2003, vol. 2: p. 977-982, (соавторы - В.В. Рогов, Д.Д. Передняя, М.О. Лейбман, А.И. Кизяков).
22. Comparative analysis of active layer monitoring at the CALM sites in West Siberia.// Proceedings, Eighth International Conference on Permafrost, 21-25 July 2003, Zurich, Switzerland. Extended abstracts. Glaciology and Geomorphodynamics Group Geography Department University of Zurich, Switzerland, 2003, p. 105-106, (соавторы - Е.С. Мельников, М.О. Лейбман, Н.Г. Москаленко).
23. A new approach for interpreting active layer observations in the context of climate change: a West Siberian example.// Proceedings, Eighth International Conference on Permafrost, 21-25 July 2003, Zurich, Switzerland. Extended abstracts. Glaciology and Geomorphodynamics Group Geography Department University of Zurich, Switzerland, 2003, p. 169-170, (соавторы - Дж. Браун, Н.Г. Москаленко).
24. Coastal Dynamics at the Barents and Kara Sea Key Sites.// GeoMarine Letters, 2004 - в печати (соавторы Г.А. Черкашев, Б.Г. Ванштейн, М.З. Каневский).
25. Hydrodynamic Parameters of the Kara Sea and the Response of Coastal Dynamics to Climate Changes.// Reports on Polar and Marine Research, 2004 - в печати (соавтор - М.З.Каневский).

Тезисы докладов

26. Стационарное изучение термоабразии для целей геокриологического прогноза // Геокриологический прогноз в осваиваемых районах Крайнего Севера. Тезисы докладов к межведомственному совещанию. - М.: ВСЕГИНГЕО, 1982. (соавторы - Н.П. Петрухин, Л.И. Вейсман).
27. Термоабразия морских берегов западного Ямала.// Эволюционные геокриологические процессы в Арктических регионах и проблемы глобальных изменений природной среды и климата на территории криолитозоны. Тезисы докл. Научного Совета по криологии Земли. - Пушино: 1995, с.56-57.
28. База данных термоабразии морских берегов Западного Ямала.// Фундаментальные исследования криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Тезисы докладов. - Пушино: 1996, с 125-127.
29. Измерения СТС в Западной Сибири по программе CALM (база данных).// Проблемы криологии Земли (Фундаментальные и прикладные исследования)
30. Тезисы докладов. - Пушино: 1997, с. 285-286, (соавторы - Ю.В.Коростелев, Н.Г.Москаленко, В.А.Дубровин)
31. Карта динамики морских берегов Западного Ямала.// Ритмы природных процессов в криосфере Земли. Тезисы докладов. - Пушино: 2000, с. 173, (соавтор - С.И. Покровский).
32. Динамика термоабразии морских берегов Западного Ямала.// Ритмы природных процессов в криосфере Земли. Тезисы докладов. - Пушино: 2000, с. 112.
33. Оценка б/тланса материала при разрушении морских берегов (на примере Марре-Сале, Западный Ямал.// Межд. Конф. "Консервация и трансформация вещества и энергии в криосфере Земли" Пушино: 2001,с. 186-187, (соавтор - С.И. Покровский).
34. Оценка факторов, влияющих на разрушение морских берегов в западном секторе Российской Арктики.// Материалы Межд. Конференции

- "Экстремальные криосферные явления: фундаментальные и прикладные аспекты". - Пушине 2002, с.73-74.
35. Мониторинг активного слоя и температуры многолетнемерзлого фунта на севере России.// Материалы Межд. Конференции "Экстремальные криосферные явления: фундаментальные и прикладные аспекты". - Пушино: 2002, с.132-133, (соавторы - А.В. Павлов, Д.С. Дроздов, В.А. Дубровин и др.).
 36. Анализ результатов мониторинга по программе CALM на примере Западной Сибири.// Материалы Международной конференции «Криосфера Земли как среда жизнеобеспечения»- Пушино: 2003, с. 124, (соавторы- Н.Г. Москаленко, Дж. Браун).
 37. Криогенное строение четвертичных отложений и процессы разрушения морских берегов в районе полярной станции Марре-Сале.// Материалы Международной конференции «Криосфера Земли как среда жизнеобеспечения». - Пушино: 2003, с.236-237, (соавтор - М.З. Каневский).
 38. Органический углерод и растворимые соли в балансе материала, поступающего в Карское море при разрушении морских берегов.// Материалы международной конференции «Криосфера нефтегазоносных провинций». - Тюмень: 2004, с. 114. (соавторы - И.Д. Стрелецкая, Е.С. Миролобова, А.В. Куршепа).
 39. Ландшафтная карта Российской Арктики и типизация береговой зоны по условиям развития современных экзогенных процессов.// Материалы международной конференции «Криосфера нефтегазоносных провинций». - Тюмень: 2004, с. 127. (соавторы - Д.С. Дроздов, Ю.В. Коростелев, Е.С. Мельников).
 40. Results of 20-years observations of coastal thermoerosion in Marre-Sale, the Kara sea.// Arctic Coastal Dynamics. Report of an International Workshop. Woods Hole, MA 02543, USA. Geological Survey of Canada, 1999, Open File 3929, p. 29-30. Brown J., Solomon S.M. (editors).
 41. Ground ice of the Baydarata Bay coast (Kara Sea) and its influence on the mechanism of coastal Destruction. Arctic Coastal Dynamics. Report of an International Workshop. Woods Hole, MA 02543, USA. Geological Survey of Canada, 1999, Open File 3929, с 30-31, (соавтор - М.О. Лейбман).
 42. Arctic coastal dynamics in the Areas with massive ground ice occurrence. Arctic Coastal Dynamics. Report of an International Workshop. Woods Hole, MA 02543, USA. Geological Survey of Canada, 1999, Open File 3929, с 5-6, (соавторы - М.О. Лейбман, Г.А. Черкашов, Б.Г. Ванштейн и др.).
 43. Cryogenic (periglacial) processes at the coastal zone as a source of material income into the Arctic basin in relation to the climate change.// Global changes and the Barents region. First International BASIN research conference. St.Petersburg. Russia, February 22-25, 1999, (соавторы - М.О. Лейбман, Е.С. Мельников, В.А. Поляков).
 44. Monitoring of the active layer in the western part of the Russian Arctic.// First European Permafrost Conference, Rome 26-25th March 2001,2001, p.26, (соавторы - Е.С. Мельников, Г.В. Малкова, Н.Г. Москаленко).
 45. Coastal Dynamics in Marre-Sale, Kara sea: A new observation program.// Reports on Polar and Marine Research. Ed. V. Rachold, J. Brown, S. Solomon. 2002, # 413, p.78-79, (соавторы - Г.А. Черкашов, Б.Г. Ванштейн, Ю.Г. Фирсов, М.Н. Иванов).
 46. Some problems of Coastal Mapping in the Russian Arctic.// Reports on Polar and Marine Research. Ed. V. Rachold, J. Brown, S. Solomon. 2002, #413, p.77.

15476