

На правах рукописи

АФАНАСЬЕВ Виктор Викторович

**СТРОЕНИЕ И РАЗВИТИЕ
БЕРЕГОВ КОНТАКТНОЙ ЗОНЫ
УМЕРЕННЫХ И СУБАРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ
СЕВЕРНОЙ ПАЦИФИКИ**

Специальность: 25.00.25 – геоморфология и эволюционная
география

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в лаборатории береговых геосистем
Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения
Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН)

Научный консультант:

Игнатов Евгений Иванович,
доктор географических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Дуговской Александр Михайлович,
доктор географических наук профессор кафедры географии ФГБОУ ВО
«Московский государственный университет геодезии и картографии»

Григорьев Михаил Николаевич,
доктор географических наук, ФГБУН Институт мерзлотоведения
им. П.И. Мельникова СО РАН, заместитель директора по научной работе

Пешков Владимир Михайлович,
доктор географических наук, Акционерное общество проектно-изыскательный
институт "Кубаньводпроект", заместитель генерального директора

Ведущая организация:

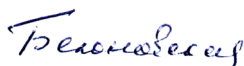
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский
институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук, г.
Владивосток, ул. Радио, 7.

Защита состоится 15 мая 2020 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета
Д 002.046.03 при ФГБУН Институте географии РАН по адресу: 109017, г. Москва,
Старомонетный переулок, д. 29. Отзывы на автореферат в двух экземплярах,
заверенные печатью учреждения, просьба присылать по указанному адресу Ученому
секретарю: e-mail: d00204603@igras.ru.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться на сайте научной
библиотеки Института географии РАН <http://www.igras.ru/1528> и официальном сайте
Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования
Российской Федерации <http://vak.ed.gov.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.002.046.03
кандидат географических наук

 Е.А. Белоновская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Берега дальневосточных морей России от Берингова, Охотского до Японского, водная циркуляция которых входит в общую циклоническую циркуляцию Северной Пацифики, находятся в пределах нескольких физико-географических поясов (арктического, субарктического и умеренного).

Смена и изменчивость природных условий обусловили особенности морфолитогенеза морских берегов и их специфику освоения и природопользования применительно к зональной и территориально-пространственной принадлежности. Различия природных факторов хорошо прослеживаются от берегов Чукотки, Аляски и Охотоморья до берегов Японского моря и Курильских островов в открытой части Тихого океана.

Несмотря на то, что регион знаменит крупными географическими открытиями островов и новых заморских прибрежных территорий, изученность берегов Северной Пацифики можно оценить как недостаточную. Эпоха открытий сменилась периодом планомерных общегеографических и целевых геоморфологических исследований берегов и дна дальневосточных морей: Берингова, Охотского, Японского и островов Алеутской, Курильской и Японской островных дуг открытой части Тихого океана (Таблица 1). Значительная активизация научных исследований морских берегов сопряжена с расширением хозяйственной деятельности и перспективами освоения прибрежных территорий. Богатые природные ресурсы стимулировали работы по поиску полезных ископаемых таких как нефть и газ, месторождениями которых богат шельф острова Сахалин.

На протяжении нескольких столетий углублялись познания и совершенствовалась теоретическая база науки о берегах. Но только в XIX веке, как указывает В.В. Лонгинов (Лонгинов В.В. Из истории изучения..., 1959, с. 110), появляются «...первые попытки создания единой концепции динамики береговой зоны».

В XX веке выходят в свет монографии о берегах и развитии береговых процессов В.П. Зенковича (1946, 1962), О.К. Леонтьева (1955, 1961, 1963), В.В. Лонгинова (1963, 1973), а затем появляются научные работы В.И. Буданова (1964), В.И. Лымарева (1967, 1986), А.С. Ионина (1959, 1992), А.А. Аксенова (1972), П.А. Каплина (1962, 1973), Н.И. Айбулатова (1966, 1990, 2005), Ю.С. Долотова (1982, 1989, 1996), Ю.А. Павлидиса (1968, 1992), С.М. Александрова (1973), Г.А. Сафьянова (1973, 1978, 1987, 1996), Е.И. Арчикова (1986), Ю.Д. Шуйского (1986), Г.И. Рычагова (1997), Ф.Э. Арз (1981, 2012), М.Н. Григорьева (1993), В.М. Пешкова (2000, 2003, 2005).

Большой вклад в развитие теории формирования морских берегов и моделирования морфолитодинамических процессов внесли в последние годы Р.Д. Косьян, П.Ф. Бровко, И.О. Леонтьев, Л.А. Жиндарев, Н.В. Есин, Е.И. Игнатов, С.А. Лукьянова, Е.Н. Бадюкова, Т.А. Янина и др.

Однако, несмотря на многочисленные попытки классифицировать берега по генетическим или динамическим типам, до сих пор так и не удалось создать концептуальную модель развития береговых процессов, тренда и стадийности развития морских берегов в высоких широтах, особенно в условиях контактной зоны перехода от субарктических к умеренно-холодным морям.

Таблица 1. Этапы изучения берегов Северной Пацифики

Этапы изучения	Исследователи	Результаты
Экспедиции ИОАН СССР и Московского государства им.Ломоносова (МГУ) на берегах дальневосточных морей. Изучение последствий землетрясения и цунами	А.Т. Владимиров (1959, 1961, 1967); В.С. Медведев (1959, 1961, 1967); А.С. Ионин (1959, 1961, 1967); П.А. Каплин (1957, 1961, 1962, 1967); В.П. Зенкович (1953, 1956, 1967, 1971); Буланов В.И. (1961); Забелина Э.К. (1957, 1961); Леонтьев О.К. (1967, 1967, 1971); Л.Г. Никифоров (1971); В.Ф. Канаев (1959); Д.Е. Гершанович (1957); Ю.А. Павлидис (1968); D.J. Miller (1960); E. Reimnitz (1965); G. Pararas-Carayannis (1967); B.W. Wilson (1968)	Получена и систематизирована обширная информация о строении и развитии берегов Северной Пацифики. Создана целостная картина строения и развития побережий Дальнего Востока. Составлены карты берегов для физико-географического атласа мира (1964). Определены величины сейсмодислокаций в береговой зоне и морфолито-динамические последствия цунами
Тематические исследования: Дальневосточный государственный университет (ДВГУ), МГУ, Сибирское и Дальневосточное отделение РАН, МинГео	Е.И. Арчиков (1979, 1982, 1986); А.П. Кулаков (1968, 1972, 1973); Л.Б. Хершберг (1982); А.М. Короткий (1982, 1990); В.Д. Кравцов (1979, 1980); И.Г. Вейнберге (1976, 1990); Грабков В.К. (1969, 1975); П.Ф. Бровка (1999, 2001); В.П. Бобыкина (1981, 2000); Л.К. Барков (1985); Г.В. Полунин (1977, 1988); А.И. Ременец (1975, 1981); Ю.И. Кононов (1969, 1975, 1976, 1992); Е.И. Игнатов (1978, 1979, 2000, 2004, 2005); М.О. Hayes (1977); B.F. Molnia (1977); J.W. Jordan (1999); O.K. Mason (1997); Lander J.F. (1996); J.C. Boothroyd (1975); J.F. Lander (1996)	Создана эволюционная схема развития берегов в неоплейстоцене-голоцене, проведены сейсмоакустические и литологические исследования подводного берегового склона, получены первые количественные данные об интенсивности и активности современных береговых процессов. По данным минералогического, granulометрического анализов и методом ДМП составлены литодинамические карты прибрежных районов Сахалина и Приморья
Изучение берегов Северной Пацифики на современном этапе	С.Л. Горин (2012, 2015); А.М. Короткий (2011); Г.П. Скрыльник (2018); Р. McLaren (2016, 2019); T. Sunamura (2015); O.K. Mason (2006, 2012); B.M. Jones (2009); Y. Gorokhovitch (2011); A.E. Gibbs (2015, 2017); T. Uda (2010); B.B. Афанасьев (2015, 2016, 2017, 2018, 2019); И.О. Леонтьев (2016, 2019)	Актуализирована климатическая составляющая и выделен субарктический тип берегового морфолитогенеза. Дистанционные методы и высокоточная фотограмметрия позволили получить количественные характеристики динамики аккумулятивных форм, размыва морских террас и разрушения скалистых берегов

Уникальное географическое положение о-а Сахалин, вытянувшегося вдоль «Оймяконского» меридиана на 1000 км, позволяет рассматривать его как своеобразную контактную зону между субарктическим и умеренным поясами, характеризующуюся последовательной сменой природных обстановок и температурного режима с севера на юг.

Северные и восточные берега о-ва Сахалин подвержены влиянию физико-географических условий субарктической зоны. Формирование и развитие берегов определяет холодное Охотское море, относящееся к категории замерзающих морей субарктического типа. Берега восточного Сахалина, находящиеся в субарктической зоне, характеризуются наличием на побережье многолетнемерзлых пород, в том числе и в основании лагунных пересыпей, развитием термоабразии и существованием, вплоть до середины июля, прибрежных наледей.

Западные и южные берега о-ва Сахалин в большей степени подвержены влиянию физико-географических условий умеренного пояса. Умеренно-холодные условия северного сектора Японского моря обеспечивают относительно частый переход температур через нуль, отсутствие или краткосрочное образование наледей и припайных льдов.

Начало интенсивного промышленного освоения побережья дальневосточных морей происходило на фоне затухания интенсивности береговых морфолито-динамических процессов в условиях однозначно установившейся аккумулятивной тенденции. Последующее усиление активности размыва берегов во второй половине XX века, отмеченное на всех рассматриваемых морях, оказало крайне негативное воздействие на объекты рыбопромышленной инфраструктуры. Низкий уровень комфорта и требований обеспечения безопасности производства спровоцировал фатальное отношение к морской стихии и, как следствие, игнорирование проблемы анализа состояния и прогноза развития морских берегов. Кардинально изменило ситуацию освоение побережья нефтегазовым комплексом. При реконструкции старых и проектировании новых объектов транспортной и промышленной инфраструктуры был получен и продолжает накапливаться огромный массив априорной инженерно-геоморфологической информации.

Вместе с тем территориальная и тематическая разобщенность прикладных исследований потребовала доведение этих сведений до уровня, дающего новый импульс для развития геоморфологии в качестве одного из фундаментальных направлений географических знаний. Другая проблема связана с тем, что наблюдаемые особенности динамики исследованных берегов не всегда могут быть объяснены с точки зрения традиционной теории, так как данные типы берегов были недостаточно изучены.

Цель исследования – создание концептуальной модели морфолитодинамики берегов контактной зоны субарктических и умеренных морей (в том числе на примере о. Сахалин как ключевого участка). Определение перспектив и масштабов приложимости разработанной теории для решения прикладных проблем освоения береговой зоны Северной Пацифики.

Основные задачи исследования:

1. Произвести оценку и анализ состояния берегов дальневосточных морей разных физико-географических поясов от субарктического до умеренного.
2. Обосновать представление о побережье о-ва Сахалин как контактной зоне субарктического и умеренно-холодного поясов Северной Пацифики.
3. Получить количественную характеристику морфолитодинамических процессов формирования и разрушения морских берегов в разных климатических

условиях и выполнить анализ пространственно-временных особенностей размыва на примере о-ва Сахалин и островов Курильской гряды.

4. Установить основные закономерности процессов аккумуляции и создать количественные и палеогеографические модели формирования и развития осадочных морфолитосистем.

5. Разработать концептуальную модель динамики берегов при абразионном тренде развития морфолитодинамических систем в условиях отсутствия дефицита наносов в береговой зоне.

6. Сформулировать концептуальные принципы развития берегов субарктических морей и морей умеренного пояса в осенне-зимний период и представить пути использования этих знаний в практической деятельности по освоению и защите берегов.

Методы исследования

В представленной работе реализована методика морфолитодинамических исследований, основанная как на традиционных, так и современных методах получения и анализа геопространственной и геолого-геоморфологической информации. Обработка цифровых моделей рельефа и материалов дистанционного зондирования проводилась в свободной кроссплатформенной геоинформационной системе QGIS 2.8.2 Wien и Agisoft PhotoScan Pro. Расчеты потоков наносов основывались на модели LONT-2D. Методы статистики существенно использовались для анализа количественных параметров, характеризующих геоморфологические процессы в изучаемом регионе. Большую роль играли экспедиционные работы по сбору данных о современной морфолитодинамике, геолого-геоморфологическом строении и истории развития береговой зоны.

Научная новизна работы

1. Впервые определены параметры и охарактеризована пространственная структура размыва берегов о-ва Сахалин, сложенных неконсолидированными и слабоконсолидированными породами. Выявлены пространственные ритмы и временные циклы размыва.

2. Не имеет аналогов полученная высокоточная количественная информация об интенсивности и активности разрушения поверхности абразионно-денудационной террасы (бенча), поднятого в результате Невельского землетрясения 2 августа 2007 г., $M_w=6,2$. Показаны особенности формирования абразионно-денудационного профиля поверхности бенча при понижении уровня моря на 1 метр. На основе анализа скоростей разрушения скалистых клифов и бенчей определен вклад денудации в процессы деструкции берегов этого типа. Создана количественная модель динамики лагунных проливов северо-восточного Сахалина, которая легла в основу анализа истории развития побережья за пределами периода, обеспеченного наблюдениями. В настоящее время мы можем проследить ситуацию до середины XIX века.

3. Впервые получена количественная информация динамики лагунных проливов северо-восточного Сахалина, которая легла в основу анализа истории развития побережья с середины XIX века.

4. Выявлены ранее неизвестные особенности морфолитодинамики берегов субарктических и холодных морей умеренного пояса. Выделены три последовательные динамические стадии развития берегов в осенне-зимний период. Показано, что период максимальной опасности разрушения берегового уступа начинается при промерзании пляжа и ухудшении вследствие этого его волно-

гасящих свойств и заканчивается формированием наледи и припая. Продолжительность этого периода на разных берегах визуализирована картой.

5. Установлен механизм размыва берегов Северной Пацифики в условиях отсутствия дефицита наносов, которая представляет не только теоретический интерес, но и уже использована для обоснования двух проектов морской берегозащиты.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. В развитии берегов субарктических и холодных морей умеренного пояса в осенне-зимний период выделяются три динамические стадии: промерзание пляжа, формирование устойчивой краевой наледи и припая, активизация морфодинамических процессов торрентогенными течениями.

2. Пространственно-временная структура разрушения берегов контактной зоны характеризуется ритмичностью и цикличностью проявления процессов размыва.

3. Размыв берегов с пляжами полного профиля обусловлен неравномерным распределением наносов вдоль берега в результате формирования систем мегафестонов.

4. Крупнейшие аккумулятивные образования голоценового возраста, приуроченные к областям с максимальными на протяжении всего неоген-четвертичного времени скоростями осадконакопления, в условиях глобального усиления размыва берегов, имеют тенденцию к увеличению размеров.

5. Наибольшие морфолитодинамические изменения береговой зоны лагунных берегов Сахалина происходят в системах проливов.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается корректной постановкой задач, многолетним характером наблюдений и большим количеством полевых данных, а также согласованностью теоретических и численных результатов с результатами статистической обработки натурных данных.

Теоретическая и практическая значимость работы

Исследования, проведенные в рамках представленной работы, направлены на решение фундаментальной научной проблемы, связанной с Геоморфологией побережий и дна морей и океанов, изучением эволюции берегов холодных морей и прогнозом их развития в условиях быстрых природных и антропогенных изменений. Установленные закономерности развития береговой зоны субарктических и умеренно-холодных морей имеют огромное значение для решения научных и прикладных проблем народного хозяйства, открывают новые возможности совершенствования теории и методики познания природной среды и рельефа прибрежной зоны как основы жизнедеятельности социума и обеспечения устойчивого развития в этих регионах. Большой интерес представляет количественный анализ морфолитодинамических процессов береговой зоны для понимания процессов трансформации природной среды в условиях современных трендов ее эволюции.

Кроме теоретического значения, исследование имеет также выраженный прикладной аспект – решение задач берегозащиты, планирование хозяйственной деятельности на побережье. Результаты исследований, представленных в диссертации, в последние годы были использованы в 14 проектах защиты морских берегов. Особый интерес представляют пионерные решения в двух проектах на берегах с устойчивым неравномерным распределением пляжевых отложений вдоль берега (мегафестонами).

Составлена карта продолжительности периода максимальной опасности разрушения берегового уступа, основанная на новой морфолитодинамической концепции развития берегов субарктических морей и морей умеренно-холодной зоны в холодный период.

Разработанная методика морфолитодинамических наблюдений в холодный период позволяет не только получать новые знания о морфолитодинамике берегов, но и существенно дополнять и уточнять инженерную информацию для целей планирования и проектирования на побережье холодных морей.

Исследования по тематике диссертационной работы велись в рамках базовых тем НИР Института морской геологии и геофизики ДВО РАН: «Цунами и другие морские опасные явления в открытом океане, на шельфе и в прибрежной зоне, оценка воздействия на берега», «Влияние природных факторов и хозяйственной деятельности на биоразнообразие и компоненты экосистем в условиях активных геодинамических зон Сахалина и Курильских островов», «Геолого-геофизические исследования строения Дальневосточной переходной зоны и Северо-Запада Тихого океана, геодинамика региона и связь с месторождениями углеводородов», а также проектов РФФИ № 11-05-98529-р_восток_а, № 16-05-00364.

Апробация работы

Результаты исследований докладывались на всесоюзных, всероссийских, международных и региональных конференциях: Всесоюзная конференция «П. Щукинские чтения», Москва (1990); Международная конференция «Северная Пацифика», Владивосток (1994); Международная конференция «Создание и использование земельных участков на берегах и акватории водоемов», Иркутск (2009, 2013); Международный симпозиум «Физика и механика снега», Южно-Сахалинск (2011); Международная конференция «Создание искусственных пляжей, островов и других сооружений в береговой зоне морей и водохранилищ», Новосибирск (2011); XXIV Международная конференция «Морские берега – эволюция, экология, экономика», Туапсе (2012); Второй Всероссийский семинар-совещание «Триггерные эффекты в геосистемах» Москва (2013); XXV Международная конференция «Береговая зона – взгляд в будущее», Сочи (2014); научно-практическая конференция «Пути решения проблемы сохранения и восстановления пляжей Крымского полуострова», Севастополь (2015); XI Международная научная конференция «Современные проблемы использования потенциала морских акваторий и прибрежных зон», Москва (2015); Международная научно-техническая конференция «Освоение ресурсов нефти и газа российского шельфа: Арктика и Дальний Восток», Москва (2016, 2018 гг.); Четвертая Всероссийская конференция с международным участием «Полярная механика – 2017», Санкт-Петербург, 2017; 9th International Conference on Geomorphology, New Delhi, India (2017); XXVII Международная береговая конференция «Арктические берега: путь к устойчивости», Мурманск (2018); International Geographical Union Thematic Conference dedicated to the Centennial of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences «Practical Geography and XXI Century Challenges» (2018).

Публикации

По теме опубликовано 84 работы, в том числе 17 в реферируемых журналах из списка ВАК, а также монография (в соавторстве). Основные положения диссертации соответствуют содержанию опубликованных работ.

Личный вклад автора. В основу данной работы легли материалы 20-летних геоморфологических береговых исследований автора на геофизическом фа-

культете ДВГУ и в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН. Личный вклад автора заключается в постановке проблем, разработке методик исследований, организации полевых работ и личном участии в них, обработке полученных результатов и их интерпретации.

Структура работы. Работа состоит из введения, 7 глав, заключения, выводов, списка литературы (471 наименование из которых 134 на иностранных языках) общим объемом 345 страниц.

Благодарности. На формирование научных взглядов автора большое влияние оказало многолетнее общение и сотрудничество с д.г.н. А.П. Кулаковым и к.г.н. Ю.А. Микишиным. Автор выражает глубокую благодарность профессору Г.А. Сафьянову, д.г.н. Л.А. Жиндареву, к.г.н. С.А. Лукьяновой за ценные советы и консультации; профессору кафедры геоморфологии и палеогеографии МГУ имени М.В. Ломоносова Е.И. Игнатову, за поддержку и помощь на всех этапах работы, а также д.г.н. И.О. Леонтьеву (ИО им. П.П. Ширшова РАН) за плодотворное сотрудничество. Особую признательность автор выражает директору ИМГиГ ДВО РАН д.ф.-м.н. Л.М. Богомолу и сотрудникам коллектива лаборатории Береговых геосистем за помощь в организации и выполнении всего комплекса научных исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **Главе 1** рассмотрена морфоклиматическая позиция (геопространственные параметры и связанные с ними различия гидрометеоклиматических показателей) о-ва Сахалин и островных систем Северной Пацифики. На основе результатов многолетних исследований берегов обосновано положение о контактных зонах морей разного типа, а также морей и океанов (Рисунок 1).

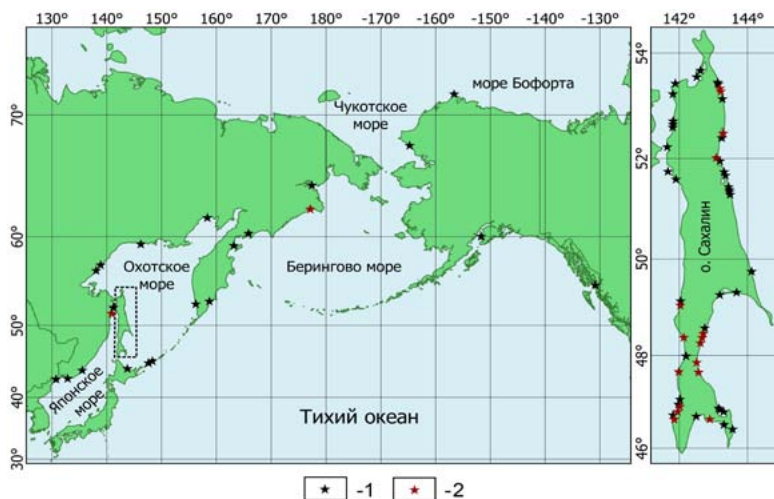


Рисунок 1 – Обзорная карта. 1 – районы детальных геоморфологических исследований, 2 – участки инженерно-геоморфологического обоснования защиты берегов.

Отмечено, что морфоклиматические характеристики контактной зоны наряду с особенностями гидродинамики и термического режима разделяемых акваторий определяют также и морфолитодинамические параметры берегов.

Сахалинские берега умеренно-холодной северной части Японского моря и субарктического Охотского моря расположены друг от друга в 30–140 км, а океанские и морские берега крупных островов в островодужных системах разделяют первые километры. Таким образом, ветроволновые поля и их взаимодействие с волнами зыби в контактных зонах имеют весьма сложный характер. Температурный режим побережий также в значительной степени зависит от геопространственных параметров контактных зон.

Аналитический обзор проблемы изученности морских берегов региона указывает на то, что геоморфологическое строение побережья является результатом длительного и сложного взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов рельефообразования. Это определило привлечение широкого спектра методов геолого-геоморфологического анализа. Основные черты геолого-геоморфологического строения побережья, история развития в неоген-четвертичный период и тенденции формирования берегов в голоцене контролируются морфоструктурой побережья, элементы которой унаследовано развиваются с начала неогена. Голоценовые береговые аккумулятивные образования локализованы на участках с повышенными мощностями неоген-четвертичных отложений.

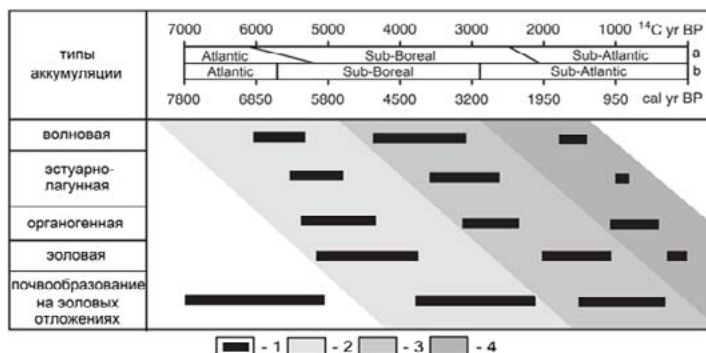


Рисунок 2 – Осадконакопление в голоцене на берегах ДВ морей по данным ^{14}C . 1 – временные интервалы; 2, 3, 4 – циклы осадконакопления; (а) – ^{14}C возраст; (б) – калиброванный возраст. Впервые выделены циклы золотого рельефообразования, связанные с волновой переработкой миллионов кубометров пемзово-пирокластического материала при эксплозивных извержениях в голоцене и формированием в результате избытка наносов в береговой зоне. Современные золотые отложения наблюдаются на отметках до + 40 метров.

Существующие несколько столетий прибрежные населенные пункты арктической и субарктической зоны расположены на прикорневых участках лагунных пересыпей у коренной суши, активно разрушаемой морозным выветриванием и абразией, которая является мощным источником наносов, обеспечивающих устойчивость аккумулятивных образований. При этом выяснилось, что минимальные перемещения отмечены для кос и баров, а максимальные скорости размыва наблюдаются на берегах равнин, сформированных при спуске озер. Более того, например, площадь барьерных островов моря Бофорта увеличилась в период 1940–2000 гг. на 45 %. Барьерные острова на арктических дельтовых побережьях России также стабильны либо нарастают. Накопление наносов в областях унаследованной аккумуляции при усилении размыва берегов, наблюдаемого с 40-х годов прошлого века, установлено нами

также при анализе динамики аккумулятивных образований свободного типа и аккумулятивных барьерных форм субарктической зоны. Т.е. бары и косы, теряющие связи с областями питания, в условиях усиления размыва не деградируют, а лишь перестраиваются как в условиях субарктики, так и в условиях арктического побережья.

Определены современные морфолитодинамические тенденции развития берегов. Приводится модель осадконакопления на берегах в среднем-позднем голоцене (Рисунок 2). В контексте динамики и эволюции береговой зоны показано, что прибрежно-эоловый морфогенез зависит от бюджета и баланса наносов в береговых морфолитодинамических системах. При этом, на участках побережья, характеризующихся большими объемами выноса обломочного материала с суши, главным образом в устьевых областях, развитие процессов эоловой аккумуляции связывается с понижением уровня моря. На побережье, где поступление наносов в береговую зону обеспечивается преимущественно морскими гидродинамическими процессами, эоловые отложения формируются в период волновой аккумуляции при повышении уровня моря. Высокой мобильностью объясняется наличие на современном побережье эоловых отложений береговых линий раннего-среднего голоцена.

Глава 2 посвящена геоморфологии и морфолитодинамике береговой зоны контактной зоны умеренных и субарктических морей. В ней сосредоточен основной информационный массив, полученный в результате исследования.

В разделе 2.1 рассмотрено побережье с комплексом неоплейстоцен-голоценовых террас, расположенное в пределах своеобразного морфоструктурного образования – зоне сочленения Сихотэ-Алинской и Хоккайдо-Сахалинской складчатых областей. Детальный анализ геолого-геоморфологического строения аллювиально-морской равнины проведен на нескольких ключевых участках. Наряду со спорово-пыльцевой, диатомовой и гранулометрической характеристиками отложений здесь выполнено более 40 радиоуглеродных определений возраста. Детальный анализ строения верхнеплейстоценовой аллювиально-морской равнины, облик которой был существенно изменен в голоцене торфонакоплением, мерзлотными и эоловыми процессами, позволил установить сложный полигенный и полихронный характер формирования поверхностей даже одного геоморфологического уровня (Рисунок 3).

Одной из наиболее интересных особенностей рельефа прибрежной равнины северо-западного Сахалина, изученных в районе пролива Невельского, являются песчаные гряды. Высота указанных образований достигает 10–15 м, и они весьма контрастно выделяются на заболоченной поверхности равнины. Приурочены они, за исключением р. Тык и р. Виахту, к левобережьям рек, что согласуется с современной результирующей вдольбереговой потока наносов. Изучение диатомовой флоры в разрезах позволяет отнести рассматриваемые формы к аллювиальным образованиям, существенно переработанным эоловыми процессами. Наличие в основании разреза отложений со следами криодислокаций, характер взаимоотношений с морскими, эстуарно-озерными отложениями и голоценовыми торфяниками позволяют предполагать их позднечетвертичный возраст (Q_{III}^{4}). В районе п. Виахту из отложений получена радиоуглеродная дата 26830 ± 940 (ДВГУ–188), что позволило отнести рассматриваемую толщу к регрессивным озерно-аллювиальным отложениям.

На берегах лагуны-эстуария реки Виахту выделено три морских голоценовых уровня (Рисунок 4). Первый представлен современными эолово-прибойными отложениями с абсолютными отметками тыловой закраины пляжа до 5 м и современной морской террасой, которая имеет здесь два уровня –

«сизигийный», затопляемый в результате высоких приливов и ветровых нагонов и «квадратурный», затопляемый практически ежедневно. Возраст низинного торфяника, залегающего на черно-синих илах – 430 ± 78 (ДВГУ-187).

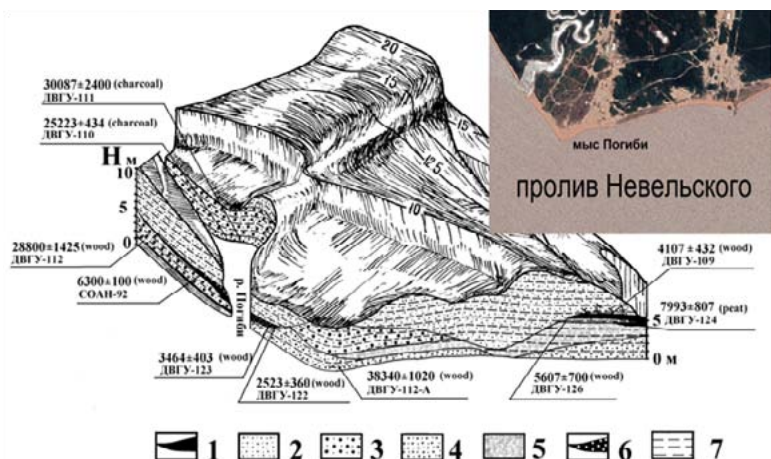


Рисунок 3 – Геолого–геоморфологическое строение аллювиально-морской террасы (мыс Погиби). 1 – торф, 2 – мелко-среднезернистые эоловые пески, 3 – железненный галечник с гравием и песчаным заполнителем (аллювий), 4 – илестые мелкозернистые лагунные пески, 5 – песчано-галечные аллювиальные отложения, 6 – торф с алевроито-пелитовым заполнителем, 7 – изогипсы. Система высот Балтийская (1977 г.).

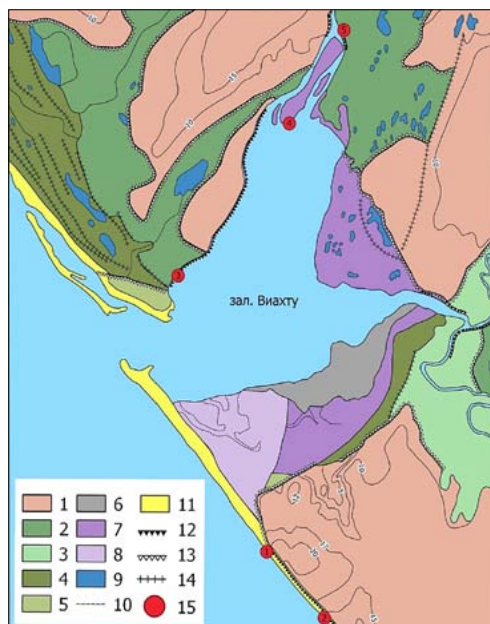


Рисунок 4 – Геоморфологическая карта эстуарной зоны р. Вяхты. 1 – позднечетвертичная полигенетическая аккумулятивная терраса; 2 – среднеголоценовая лагунная терраса; 3 – позднеголоценовая лагунная терраса; 4 – средне-позднеголоценовая поверхность волновой и эолово-прибойной аккумуляции; 5 – позднеголоценовая поверхность волновой аккумуляции; 6 – приливно-отливные аккумулятивные осушки; 7 – марши; 8 – марши, подверженные воздействию ветропесчаного потока; 9 – остаточные озера; 10 – каналы стока; 11 – современные аккумулятивные формы береговой зоны; 12 – аккумулятивные абразионно-эрозионные уступы; 13 – отмершие абразионно-эрозионные уступы; 14 – древние береговые валы и гряды; 15 – геологические разрезы с C^{14} датами и палинологическими спектрами.

Как известно, расчленение поверхности формирующейся морской террасы начинается по мере отступления моря, за счет трансгрессивного развития субпараллельных близко расположенных друг к другу речных долин с неглубокими врезами. Дальнейшее увеличение горизонтальной расчлененности происходит в результате регрессивной эрозии. Являясь одной из важнейших морфометрических характеристик речных бассейнов, густота расчленения, в условиях однородности геолого-геоморфологических параметров прибрежной аллювиально-морской равнины, приобретает особую информационную ценность (Рисунок 5Б).

К наиболее общим, установленным нами закономерностям распределения густоты расчленения северо-западного Сахалина следует отнести наличие двух зон, ориентированных согласно генеральному, субмеридиональному направлению береговой линии и «главному» водоразделу. В пределах первой зоны, расположенной на высоких гипсометрических уровнях (более 40 м) коэффициент расчленения изменяется от 0,75 км/км² до 1,75 км/км². Вторая зона расположена на низких уровнях и характеризуется сложным, мозаичным строением поля значений от 0 до 1,0 км/км². Вдоль границы с первой зоной прослеживается практически сплошная полоса минимальных значений густоты расчленения.

В целом для низкой прибрежной равнины характерно чередование расчлененных участков и участков с практически полным отсутствием водотоков. Наибольшая густота речной сети приурочена к водоразделам низкопорядковой речной сети и наблюдается на удалении 5–8 км от устья. Наименьшее расчленение испытывают приводораздельные поверхности бассейнов крупных рек, здесь же наблюдаются наибольшие значения коэффициента заозеренности. Существенное уменьшение показателя заозеренности (отношение суммарной площади озер к площади расчетной единицы территории) определяет процесс спуска озер (Рисунок 5А). Именно поэтому, осевая линия наибольшей заозеренности, протягивающаяся субпараллельно береговой линии, отстоит от нее на 3–7 км. К основным закономерностям заозеренности территории следует отнести также равномерное, с интервалом 10 и 20 км, распределение положительных аномалий вдоль побережья связанное с трансгрессивной эрозией на новообразованных равнинах.

Сопряженный анализ строения берегов этой прибрежно-морской равнины и морфоструктуры побережья показал, что в условиях преимущественно вдольберегового переноса наносов крупнейшие на западном Сахалине голоценовые

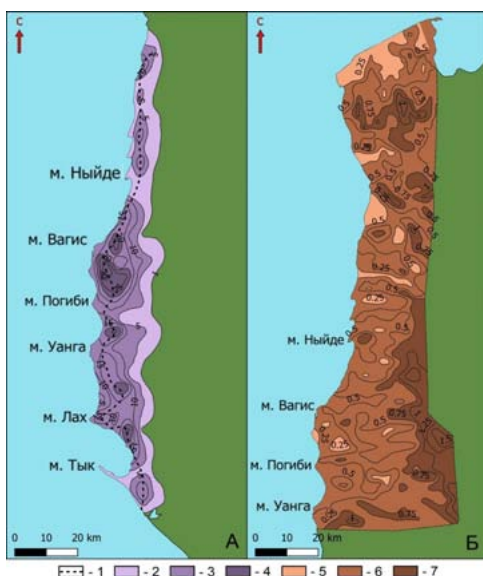


Рисунок 5 – Картометрические параметры прибрежной низменности: А – карта заозеренности территории, Б – карта густоты эрозионного расчленения территории; 1 – линия максимальной заозеренности, заозеренность: 2 – 1–5%, 3 – 5–20%, 4 – свыше 20%, густота расчлененности: 5 – до 0,25 км/км², 6 – 0,25–0,75 км/км², 7 – свыше 0,75 км/км².

свободные аккумулятивные образования – коса Тык и система кос «азовского» типа – располагаются на участках выхода в береговую зону окраинно-депрессионных элементов морфоструктурного плана, для которых характерны максимальные скорости осадконакопления в продолжении всего неоген-четвертичного времени. Строение осадочных толщ, выполняющих депрессию, свидетельствует об унаследованном с палеогена прогибания относительно центральных частей структуры. Мощность кайнозойских отложений изменяется от 3500 м на северном фланге зоны до 8000 м – на южном. Объем наносов, формирующих узаканные аккумулятивные формы, равен соответственно 152 млн м³ и 96 млн м³. Об унаследованном относительно погружении в голоцене депрессионных зон свидетельствует и система своеобразных грядово-озерковых образований на северном фланге Тыкско-Вагисской депрессии. Установлено, что волновые условия на протяжении позднего – среднего голоцена не претерпели существенных изменений и особенности осадконакопления определяются достаточно высокой мощностью вдольберегового перемещения наносов и условиями самоорганизации береговых песчаных волн на данном участке. Определенную роль сыграл и наносоудерживающий эффект приустьевой циркуляции в береговой зоне. Деформации приустьевых участков речных долин в районе кос свидетельствуют о существенных перестройках аккумулятивной системы в процессе ее становления. В районе самой северной, первой по отношению к результирующему потоку наносов, косы Ихдам, русло одноименной реки отклонено к югу на 4,8 км. Аккумулятивное тело косы расположено в районе современного устья. На участке косы Нокси направление реки изменяется только в пределах самой аккумулятивной формы. В районе третьей косы река отклоняется на юг, по направлению потока наносов, за пределы аккумулятивного тела на 4 км. Общая длина участка реки, параллельного берегу, составляет здесь 5,5 км. В современном виде морфолито-система кос Ихдам, Нокси, Ныйде была сформирована к началу заключительного ритма прибрежно-морской аккумуляции, фиксируемому волновыми отложениями, имеющими возраст около 1500 лет (1470±84, ДВГУ б/н).

В разделе 2.2 изложены сведения об аккумулятивных формах барьерного типа и морских террасах голоценового возраста.

С востока Северо-Сахалинский прогиб ограничен Пильтун-Чайвинской и Лунской синклинальными зонами, простирающимися в северо-западном направлении на 150–200 км при ширине 30–60 км. Именно в пределах этих зон расположено лагунное побережье северо-восточного Сахалина. Мощность осадочных неоген-четвертичных отложений здесь достигает 8–12 км. Неотектонический этап развития северо-восточной части о-ва Сахалин охватывает промежуток времени от плиоцена до голоцена включительно. Для трех из пяти крупных заливов (по сути – лагун) и для практически всех более мелких лагун северо-восточного Сахалина характерны сложно построенные береговые барьерные формы, отчленяющие их от Охотского моря. Участки с высокими береговыми уступами, сложенными неоген-плейстоценовыми осадками (в основном неконсолидированными, песчано-пелитовых фракций), чередуются здесь с собственно голоценовыми пересыпями. В зоне позднеголоценовых миграций проливов участков с высокими террасовыми уровнями нет. Они уничтожены здесь в первые фазы. Вскрытая мощность голоценовых отложений (коса Пильтун) достигает 31 м (ИГАН 5133 – cal BP 10135, ИГАН 5134 – cal BP 12959). Датировки растительных остатков в интервале глубин 31–36,6 м дают верхнеплейстоценовый возраст отложений (ИГАН 5132 – cal BP 37903, ИГАН 5135 cal BP 42936). Эти же отложения слагают морскую террасу высотой 7–12 м.

Породы представлены переслаивающимися (2–4 м) глинами и разнозернистыми (преимущественно – средне- и мелкозернистыми) песками, содержащими маломощные (до 0,5 м) линзы гравийно-галечного материала. Ширина голоценовой прибрежно-морской террасы достигает 2 км. Большая часть поверхности – зона береговых валов с авантюной, высота которой превышает высоту примыкающих береговых валов и эолово-прибойных террас на 1–4 м. Между этой зоной и древним береговым уступом, выработанным в неоген плейстоценовых отложениях, иногда наблюдается заболоченная поверхность остаточного лагунного происхождения. Мощность гравийно-песчаных отложений в зоне береговых валов, согласно данным бурения составляет порядка 11–15 метров. Подстилаются эолово-прибойные отложения тяжелыми серыми суглинками лагунных фаций. Абсолютная отметка кровли лагунных отложений в зоне авантюны – 10–11 метров. Мощность голоценовых лагунных отложений вскрытых скважинами достигает 18 м. Системы дюн широко представлены практически на всех геоморфологических уровнях. На пересыпях и низких морских террасах мощность эоловых отложений может превышать 20 метров. Барьерные формы более мелких лагун могут включать генерации только одного ритма прибрежно морской аккумуляции (Рисунок 6б). Самая крупная изученная нами на Сахалине морская терраса сформирована морфолитокомплексами двух ритмов аккумуляции (Рисунок 6а).

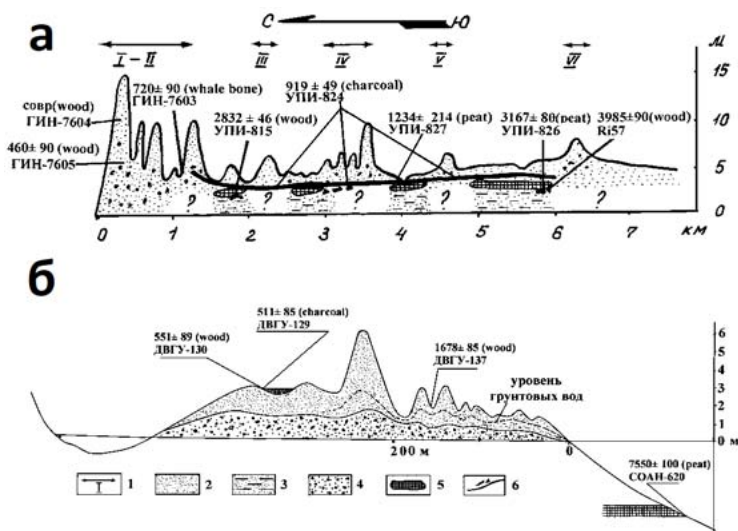


Рисунок 6 – Строение средне-позднеголоценовых береговых аккумулятивных образований: а – урочище Москальвинская падь (от м. Входного до п. Москальво, б – лаг. Буссе (южный бар). 1 – генерация береговых валов, 2 – мелко-среднезернистые преимущественно эоловые пески, 3 – илистые мелкозернистые лагунные пески, 4 – песчано-галечные волноприбойные отложения, 5 – торфяники мощностью 0,3–0,8 м, 6 – древесные остатки и уголь (протяженность слоя 4 км).

В разделе 2.3 рассмотрено строение и динамика абразионно-денудационных берегов Японского и Охотского морей.

Глава 3 посвящена закономерностям разрушения берегов различного типа на современном этапе.

В разделе 3.1 представлены результаты изучения абразии берегов, сложенных коренными породами. В настоящее время считается, что волновое воздействие является решающим в развитии таких берегов в областях с высокой волновой энергией, тогда как роль выветривания более значима в теплых умеренных и тропических районах. При определении скорости разрушения обычно используются средние значения за периоды натурных наблюдений. Однако долгосрочные средние скорости абразии коренных берегов при определении степени опасности и зонировании побережья следует использовать весьма осторожно. Широко известен случай, когда во время январских штормов 1983 года в Калифорнии было смыто около 14 м утеса, сложенного миоценовыми алевролитами, который в период с 1931 по 1982 год отступал со средней скоростью 0,2 м/год.

Подобное явление наблюдалось нами совсем недавно в районе завода СПГ «Пригородное», расположенного на цокольной террасе, сложенной слабосцементированными аргиллитами и алевролитами быковской свиты (K_2bk) третьего класса устойчивости (по Полунину, 1989). За один шторм осени 2017 года было разрушено 4–7 метров берегового уступа, тогда как за более чем десятилетний период берег разрушался со скоростью 0,1–0,15 м/год.

Срочными наблюдениями ФГУП «СахГРЭ» установлено, что средняя скорость отступления берегового уступа зал. Терпения, сложенного неогеновыми алевролитами курасийской свиты $N_1(Cr)$, за период наблюдения составила 0,26 м/год. Между тем следует отметить, что, так же как и в случае берегового уступа СПГ «Пригородное», основной разрыв произошел одномоментно, в октябре 2006 года. Вклад данного штормового события в общий объем абразии за весь период наблюдения составил 77 %. На сахалинском берегу Татарского пролива измерения отступления бровки клифа проводились на трех измерительных площадках. Несмотря на то, что береговой уступ здесь сложен литифицированными песчаниково-кремнистыми породами холмского литотипа четвертого класса устойчивости, среднегодовое скорости отступления бровки клифа примерно соответствуют скоростям разрушения клифа зал. Терпения, выработанного в породах II и III литотипа. Скорости отступления бровки клифа составляют 0,25 м/год для площадки № 1, 0,32 м/год – для площадки № 2. Исключением является площадка № 3, закрытая от преобладающего волнения, где скорость отступления клифа составила 0,05 м/год на 1 погонный метр берегового уступа.

Дифференцировать волновые воздействия и факторы субаэрального выветривания позволил анализ разрушения береговых платформ – бенчей, сформированных на скалистых берегах. Исключительную возможность в этом отношении дали исследования разрушения бенча, косейсмически поднятого на 0,8–1,0 м в результате Невельского землетрясения 2 августа 2007 г., $M_w=6,2$ в г. Невельск. Породы неогенового возраста, слагающие бенч, представлены зеленовато-серыми мелкозернистыми, глинистыми, слабо сцементированными песчаниками, алевролитами с известковыми конкрециями. На протяжении 6 лет в районе г. Невельск нами проводятся инструментальные наблюдения по сети забетонированных в поверхности бенча 100 реперов. С июня 2016 года определение скорости разрушения производится посредством вычитания карт поля высот участков размерами 2,25 м² с репером в центре. Карты поля высот построены цифровым методом в ПО Agisoft Photoscan (Рисунок 7). Средние скорости разрушения поверхности бенча изменяются от 0,25 см/год на участках, перекрытых обломочным материалом, смытым с морской части бенча при суперпозиции максимальных уровней моря и волнения, до 4,37 см/

год на участках практически ежегодно заливаемых водой. При этом скорость разрушения алевролитов примерно в 2,5 раза выше скорости разрушения известковых конкреций даже в пределах одной наблюдательной площадки.

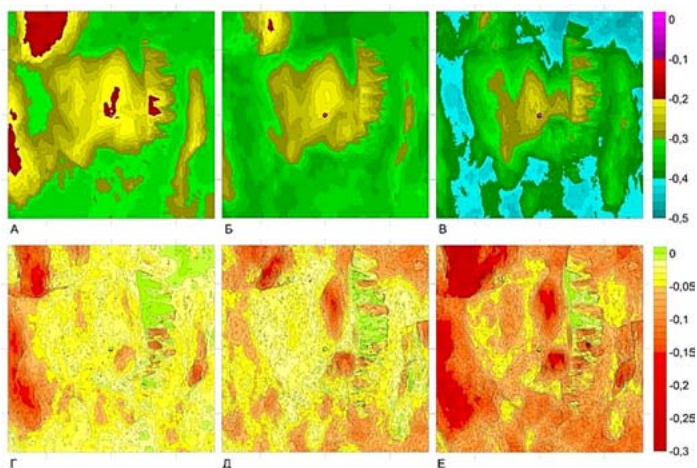


Рисунок 7 – Карты поля высот и разностей полей высот по годам (репер 13/2): (А) – модель поля высот 2016 г.; (Б) – модель поля высот 2017 г.; (В) – модель поля высот 2018 г. Матрицы разностей поля высот: (Г) – 2017–2016; (Д) – 2018–2017; (Е) – 2018–2016.

Таким образом, измеренные скорости отступления берегового уступа без прямого волнового воздействия (п. Ильинский, участок № 3) примерно соответствуют скоростям разрушения аналогичных по классу устойчивости горных пород на бенче.

Механизмы разрушения высоких клифов с неоднородной прочностью и их количественные параметры установлены с помощью высокоточных ортофотопланов и 3D-моделей береговых уступов сложенных вулканогенно-осадочными породами. Были определены морфометрические параметры берегового уступа на трех участках активных склоновых процессов, спровоцированных абразионной подрезкой уступа или уменьшением устойчивости пород в результате выветривания и суффозии, подсчитаны объемы коллювиально-пролювиальных форм у подножия. Время формирования этих форм и их элементов устанавливалось на основе анализа материалов дистанционного зондирования и характера растительности на поверхности. Скорости отступления берегового уступа на участках активного разрушения составляют; в первой более 0,29 м/год, во второй – более 0,44 м/год, в третьей – более 0,87 м/год. Отступление уступа на участках протяженностью до 100 метров могут достигать 7 м/год, что несколько необычно для коренных пород.

Размыв берегов, сложенных неконсолидированными неоген четвертичными породами, рассматривается в **разделе 3.2**. Остров Сахалин является одним из немногих регионов России, где определены параметры современного размыва берегов, сложенных рыхлыми и слабоконсолидированными неоплейстоцен-голоценовыми отложениями. Изучение картографической информации и геологических описаний Сахалина показало, что наблюдаемая пространственная структура размыва морских террас и пересыпей в основных чертах существует, по меньшей

мере, с 30-х годов XX века. При анализе пространственной структуры разрушения низких морских голоцен-плейстоценовых равнин южного и северо-западного Сахалина были выявлены ритмы размыва с длиной волны 4–5 км, 11–12 км, ≈ 30 км и ≈ 60 км (Рисунок 8).

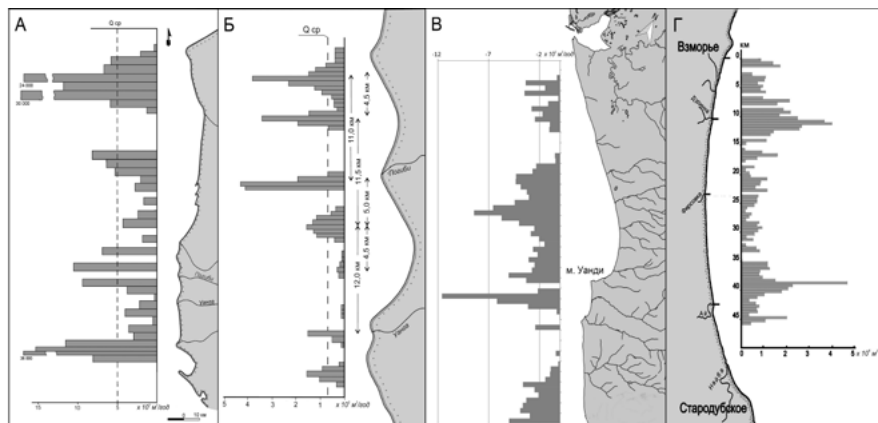


Рисунок 8 – Пространственные планы размыва берегов: А – с-з Сахалин (осреднение по 5 км участкам за период 30 лет); Б – пролива Невельского (осреднение по 500 м участкам за период 30 лет); В – Татарского пролива (осреднение по 500 м участкам за период 40 лет); Г – залива Терпения (осреднение по 500 м участкам за период 40 лет).

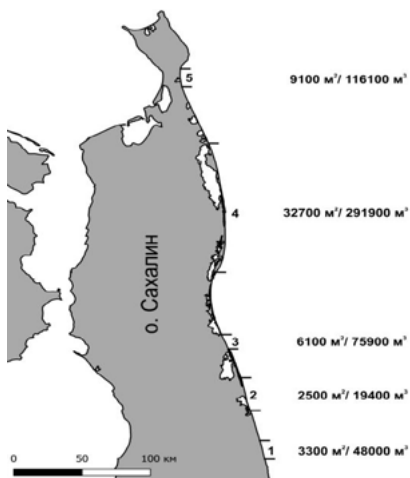


Рисунок 9 – Обзорная схема расчетных участков. Участки; 1 – Нампи-Кири-ский, 2 – Лунско-Набильский, 3 – На-биль-Ныйвенский, 4 – Пильтун-Чай-винский, 5 – Тропто-Шмидтовский, 3300 м²/48000 м³ – площадь размыва за год/объем размыва за год.

В разделе 3.3 рассмотрен размыв сложно построенных береговых барьерных форм.

Обработка массивов данных аэро- и космофотоинформации (2014 и 2015 гг.) по северо-востоку Сахалина проводилась уже в среде ГИС. После реализации процедур трансформирования, по стометровым интервалам определялись площади размыва. Были получены значения среднемноголетних скоростей размыва берегов за период 60 лет. Среднемноголетние скорости размыва нигде не превышают 2 м/год. Максимальные, осредненные на всем протяжении береговой линии скорости размыва (0,4–0,6 м/год), отмечены на участках № 3 и № 5, которые представляют высокие (14–28 м) плейстоценовые террасовые уровни (рисунок 9).

Данные о размыве получены при анализе аэрофотоинформации (залеты 1952, 1974, 1978, 1980, 1991, 2006 гг.).

На эти же участки поступают ежегодно максимальные объемы наносов, при размыве берегового уступа (5,6–7,7 м³/м).

При техногенном вмешательстве формируются локальные зоны размыва, где скорости отступления берегового уступа превышают 10–15 м/год, как, например, при обустройстве выхода подводного трубопровода на сушу. В качестве примера на рисунке 10 представлены значения среднегодовое площадей размыва на участках максимальной протяженности: Пильтун-Чайвинском (120 км) и Лунско-Набильском (30 км). При анализе интенсивности размыва этого сложно построенного барьерного аккумулятивного голоцен-плейстоценового образования протяженностью около 120 км получены значения длины волны ритма размыва, равные 4.0, 5.6, 8.5, 11.6, 25.6, 64 км (Рисунок 11 А).

Следует отметить, что в первую фазу голоценовой прибрежно-морской аккумуляции лагуны Пильтун и Чайво были связаны между собой. Обособление водоемов, вероятно, произошло во вторую фазу прибрежно-морского осадконакопления. На следующем этапе посредством сглаживания периодограммы окном Хамминга, полученной при быстром преобразовании Фурье, построены графики спектральной плотности интенсивности размыва.

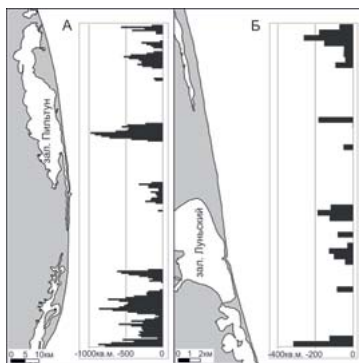


Рисунок 10 – Среднегодовое скорости размыва берегов с-в Сахалина (осреднение по 500-метровым интервалам). Участки: А – Пильтун-Чайвинский; Б – Лунско-Набильский.

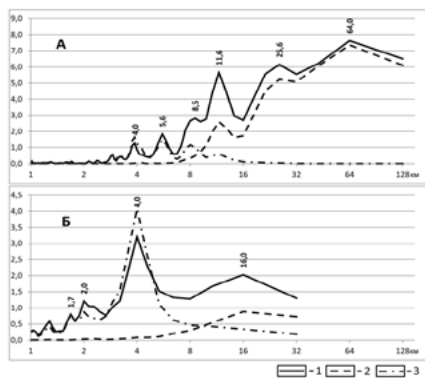


Рисунок 11 – Графики спектральной плотности интенсивности размыва. Участки: А – Пильтун-Чайвинский, Б – Лунско-Набильский; 1 – исходные данные, 2 – низкочастотная, 3 – высокочастотная, ось Х – периодичность вдоль берега, ось У – относительная спектральная плотность мощности.

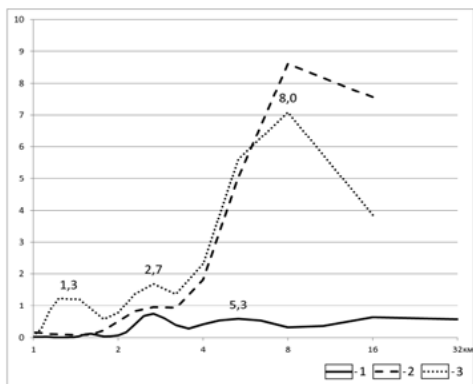


Рисунок 12 – Графики спектральной плотности интенсивности размыва (исходные данные). Участки: 1 – Нампи-Кириинский, 2 – Набиль-Ныйво, 3 – Тропто-Шмидтовский, ось Х – периодичность вдоль берега, ось У – относительная спектральная плотность мощности.

Эти значения в целом соответствуют установленной ранее пространственной структуре разрушения низких морских голоцен-плейстоценовых равнин

южного и западного Сахалина. Лунско-Набильский участок протяженностью 30 км представляет собой участок берега, включающий барьерные образования лагуны Лунская, южную размываемую часть пересыпи зал. Старый Набиль и расположенную между ними средне-позднеголоценовую морскую террасу протяженностью около четырех километров и шириной 900–1100 м. Вероятно, подобное строение берега на Лунско-Набильском участке обусловило отсутствие на графике спектральной плотности интенсивности размыва значения в интервале 8,0–8,5 км (Рисунок 11Б).

Указанный ритм размыва характерен как для самого протяженного участка, так и для участков размыва наименьшей протяженности (Рисунок 12). Самая низкопорядковая ритмичность размыва, устанавливаемая при анализе графиков спектральной плотности интенсивности размыва, при осреднении по пятисотметровым интервалам составляет 1,3 км. Именно в этой размерности нами описаны самые крупные мегафестонные структуры пляжа.

В разделе 3.4 рассмотрен размыв аккумулятивных берегов, сформированных в среднем позднем голоцене.

По мере усиления размыва с 30–40-х годов прошлого века актуализировалась проблема защиты голоценовых аккумулятивных образований. Тем не менее, в XX веке берегозащитные сооружения были построены только на одной аккумулятивной форме барьерного типа (пересыпь лагуны Меря). В 2003 г. была создана временная берегозащита из мешков с песком на барьерной форме лагуны Чайво. В последние годы остро встала проблема защиты пересыпи лагуны Пильтун.

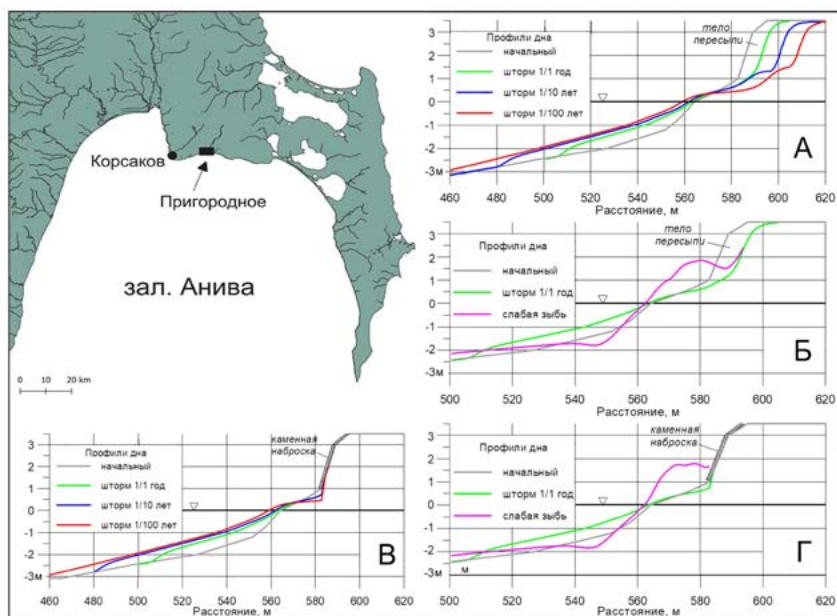


Рисунок 13 – Волновые воздействия на береговой профиль пересыпи лагуны Меря: А – деформации профиля берега при штормах различной силы, Б – воздействие слабой продолжительной зыби на штормовой профиль, В – штормовые деформации профиля при наличии каменной наброски, Г – воздействие зыби на закрепленный откос.

В этой связи представляет научный и практический интерес анализ разрушения аккумулятивных берегов барьерного типа с закрепленной верхней частью берегового профиля. Задача решалась на основе детальных морфолитодинамических наблюдений на всех трех участках и математическом моделировании динамики барьерных форм. На рисунке 13 представлены результаты моделирования воздействий волн на береговой профиль пересыпи лагуны Мерея в естественных условиях и при наличии берегозащиты. Показано, что при каждом шторме тело пересыпи размывается и смытый материал выносится на подводный склон. Шторма с периодом повторяемости 1, 10 и 100 лет при незакрепленной верхней части берегового профиля вызывают отступление бровки берега соответственно на 7, 15 и 22 м. Слабая зыбь, согласно расчетам, транспортирует наносы с подводного склона на пляж, где откладывает их в форме берегового вала (Рисунок 13Б). Однако верхняя часть размывтого склона, очевидно, не может быть восстановлена, так как зыбь ее не достигает (вследствие недостаточно высокого нагона и заплеска). Таким образом, потери материала из тела пересыпи оказываются необратимыми. При оценке деформации профиля в условиях берегозащиты предполагалось, что основание крепления расположено на отметках +1 м, и движение материала в пределах защиты откосного типа из скальника исключается. Результаты расчетов представлены на рисунке 13В. Изменения в пределах пляжа оказываются незначительными, а наиболее заметный эффект – это небольшой размыв и углубление дна у основания крепления, которое составляет около 0,2 м для штормов 1/1 год и 1/10 лет и около 0,4 для шторма 1/100 лет.

В результате размыва может происходить некоторое оползание материала крепления. Однако в периоды слабой зыби основание крепления будет засыпаться материалом, поступающим к берегу (Рисунок 13Г). Полученные результаты дают основания полагать, что волногасящее крепление морского откоса пересыпи, располагаясь выше зоны наиболее активного переноса, стабилизирует береговой профиль и не изменяет параметры вдольбереговых перемещений наносов.

В **главе 4** представлены результаты анализа геопространственной и геологической информации о строении и динамике лагунного побережья Сахалина и аккумулятивных образований свободного типа.

В **разделе 4.1** рассмотрена морфолитодинамическая системы лагунного побережья Сахалина за период 1927–2014 гг. Первый этап исследования динамики лагунных проливов завершился построением карт переформирования берегов и определением на этой основе площадей размыва и нарастания кос при перемещении проливов (Рисунок 14).

На рисунке 15 показаны осредненные значения площадей размываемых и нарастающих кос за соответствующие расчетные временные интервалы. Установлено, что скорости миграции проливов сильно варьируют по годам. Однако, среднееголетние скорости перемещения практически одинаковы для всех проливов, за исключением пролива лагуны Набиль, где при перемещении пролива размывается низкая терраса, сложенная торфами и лагунными илами. Объемы наносов, перемещаемых при миграции проливов, установлены при помощи трехмерных моделей, где, наряду с осредненными за многолетний период характеристиками площади размыва и аккумуляции, использованы данные о глубинах пролива и прилегающей акватории, параметры рельефа барьерных форм и геологическая информация, полученная при георадарной съемке и бурении.

Георадарные данные в комплексе с материалами дистанционного зондирования существенно дополнили существующие ранее представления о морфолитодинамике лагунных проливов, а созданная на их основе модель осадконако-

пления при перемещении дистальных окончаний барьерных форм лагун легла в основу анализа истории развития побережья за пределами периода, обеспеченного наблюдениями (Рисунок 16). В настоящее время реконструировано развитие ситуации с середины XIX века.

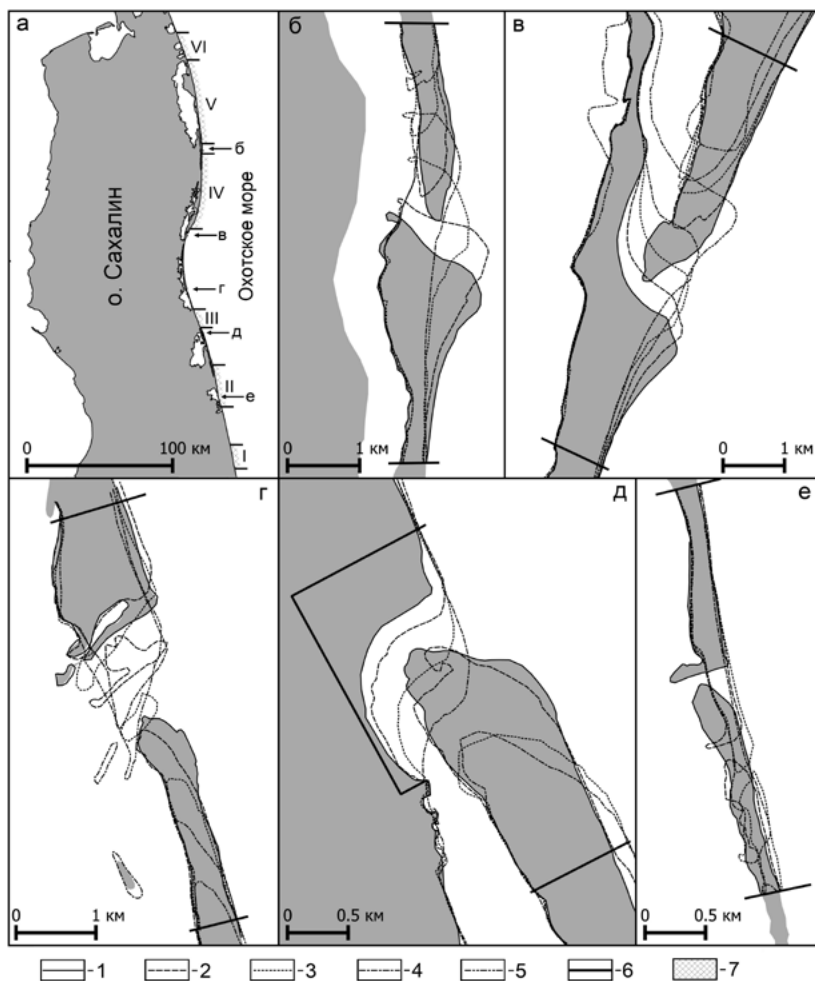


Рисунок 14 – Изменение контура береговой линии северо-восточного Сахалина в районе проливов, соединяющих Охотское море и лагуны: (а) – обзорная схема района исследований: I–VI – участки, для которых установлены объемы размыва и аккумуляции для расчета бюджета вдольбереговых перемещений наносов, (б) – пролив лагуны Пильтун, (в) – пролив лагуны Чайво, (г) – пролив лагуны Ныйво, (д) – пролив лагуны Набиль, (е) – пролив лагуны Лунская. 1 – положение береговой линии в 2014 г.; 2 – положение береговой линии в 1999 г.; 3 – положение береговой линии в 1977 г.; 4 – положение береговой линии в 1952 г.; 5 – положение береговой линии в 1927 г.; 6 – границы расчетных площадей; 7 – участки расчета размыва и аккумуляции за пределами лагунных проливов.

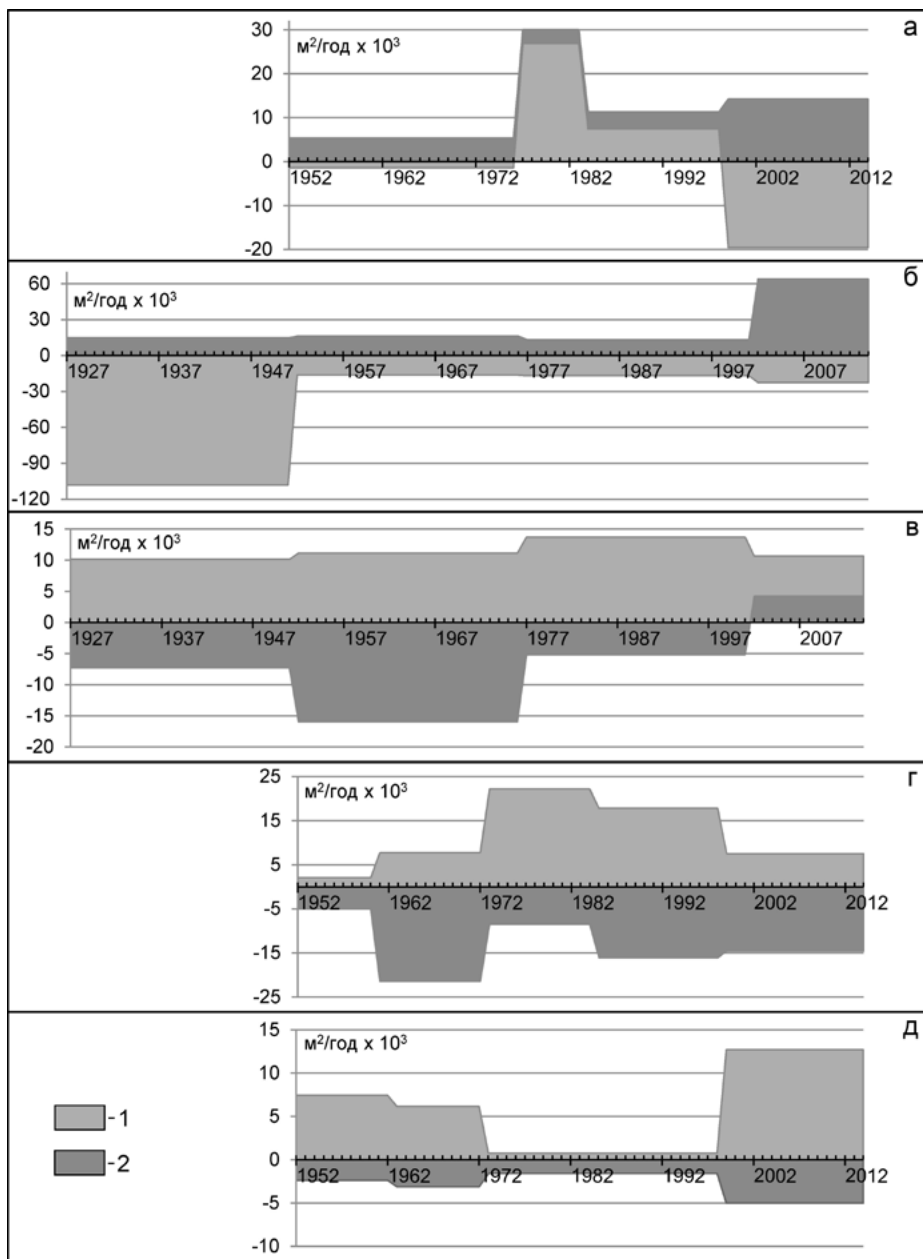


Рисунок 15 – Площади деформаций северных и южных берегов проливов, соединяющих Охотское море и лагуны (1927, 1952–2012 гг.): (а) – Пильтун, (б) – Чайво, (в) – Ныйво, (г) – Набиль, (д) – Лунская. 1 – южная коса; 2 – северная коса.

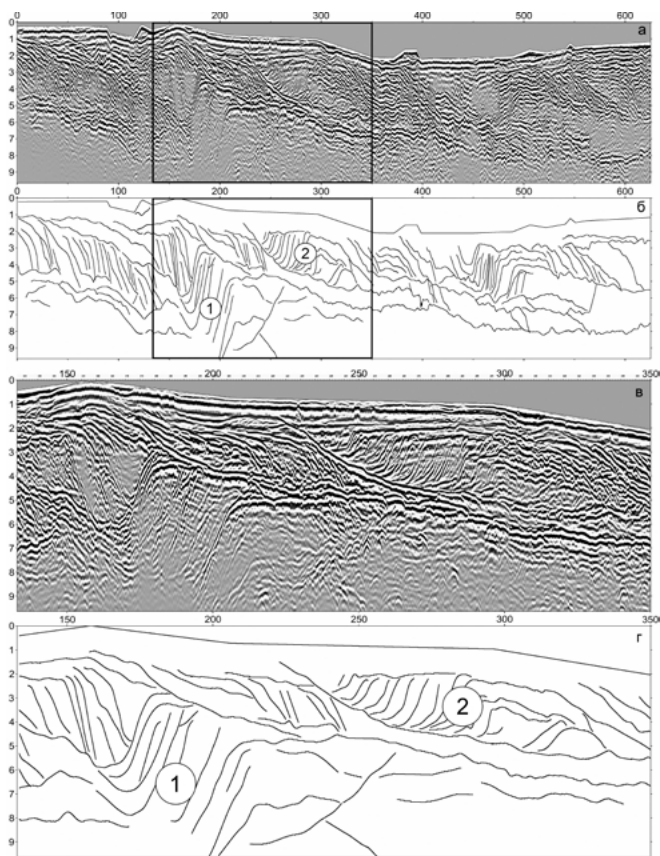


Рисунок 16 – Фрагмент продольного профиля косы Набиль: (а) – георадарный профиль; (б) – схема интерпретации с привлечением данных ручного бурения; (в, г) – увеличенные фрагменты георадарного профиля и схемы интерпретации; 1 – фации лагунного пролива, 2 – фации приустьевых бара.

На данной стадии развития побережья параметры бюджета наносов определяют процессы абразии и аккумуляции. Анализ данных переформирования берегов показал, что в среднем за многолетний период в зону конвергенции потоков наносов в районе пролива лагуны Ныйво с севера поступает около 13 тыс. м³/год наносов. Около 106 тыс. м³/год, из которых примерно 65–70 тыс. м³ осадки открытого моря (алеврито-пелитовых фракций), поступает с юга. В районе пролива лагуны Ныйво, согласно анализу карт переформирования берегов, аккумулируется около 23 тыс. м³/год осадков пляжеформирующих фракций, что практически уравнивает приходную и расходную части наносов построенной балансовой модели литодинамической системы северо-восточного Сахалина. Для уточнения модели была произведена расчетная оценка мощности потоков наносов в зоне конвергенции (Рисунок 17). Показаны распределения по протяженности берега потоков на север и на юг, а также их алгебраическая сумма – резуль-

тирующий поток. Поток на юг относительно равномерный (около 100 тыс. м³/год), тогда как поток на север испытывает заметные колебания. Результирующий поток действует в северном направлении и изменяется аналогично южному потоку. Его максимальная величина (в южной части) составляет 400 тыс. м³/год, а минимальная (у конца косы) – 180 тыс. м³/год. У острова Гафовича поток снова увеличивается (до 300 тыс. м³/год). Изменения потоков обуславливаются донной топографией, которая посредством рефракции влияет на поступающую к берегу энергию волн, определяющую объем и скорость перемещения наносов. В частности, заметное влияние оказывает мелководная область у пролива Анучина, приуроченная к отливной дельте системы Ныйского залива.

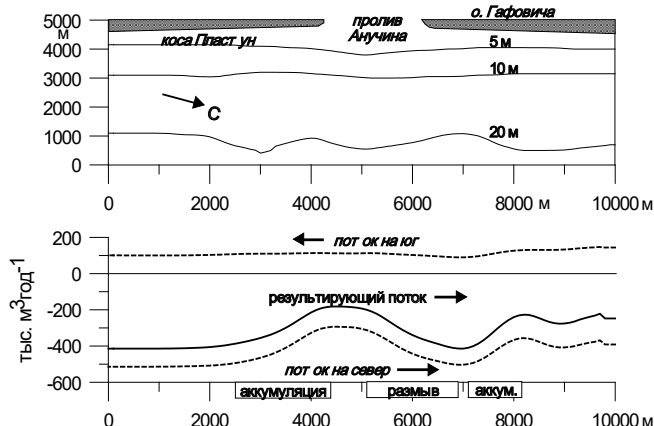


Рисунок 17 – Расчетные изменения мощности вдольбереговых потоков наносов (Iont-2d).

Для расчетов воздействий со стороны моря на дно лагуны использовалась модель CROSS-P. Результаты моделирования показывают, что деформации дна во внутренней части залива не превышают 0,1 м, однако во всех рассмотренных случаях имеет место размыв.

В заключение раздела отмечено, что расчеты потоков наносов, основанные на модели Iont-2d и выполненные на участках, для которых возможны морфолитодинамические измерения, имеют весьма высокую достоверность. Так, расчетная емкость потока наносов в районе пересыпи лагуны Меря составляет около 20 тыс. м³/год. После строительства причального сооружения завода СПГ в 2005 г. с его западной стороны за 9 месяцев сформировалась аккумулятивная форма заполнения входящего угла объемом около 22 тыс. м³. Сравнение материалов промеров 2004 и 2015 гг. показало, что приходная часть бюджета наносов с западной стороны причала за рассмотренный интервал времени составляет +272435 м³ за 11 лет или 24767 м³/год.

В разделе 4.3 главы детально рассмотрены строение и морфолитодинамика голоценовых аккумулятивных образований северо-западного Сахалина. Показано, как на фоне усиления размыва берегов за период 1952–1973 гг. при результирующем перемещении наносов с севера на юг произошло увеличение площадей кос Ихдам и Нокси и размыв косы Ныйде (Рисунок 21). В 1973–2012 гг. произошло дальнейшее увеличение площади косы Ихдам и размыв кос Нокси и Ныйде. Отмечено, что изменение морфометрических показателей аккумулятив-

ных образований за период 1926–1952–2014 гг. подтверждает сделанный ранее вывод об усилении накопления наносов в областях унаследованной аккумуляции при увеличении интенсивности размыва берегов.

В случае с системой кос Ихдам, Нокси и Ныйде увеличение площади аккумулятивной формы на фоне усиления размыва берегов в Амурском лимане наблюдается в первой ячейке (коса Ихдам) по отношению к результирующему потоку наносов (Рисунок 18).

На основе анализа данных дистанционного зондирования различного типа отмечается что, начиная с середины прошлого века и до настоящего времени, в целом происходит увеличение скорости размыва берегов Северной Пацифики, Чукотского моря и моря Бофорта, однако общая площадь поверхности барьерных форм а за исследуемый период увеличилась почти на 10 %.

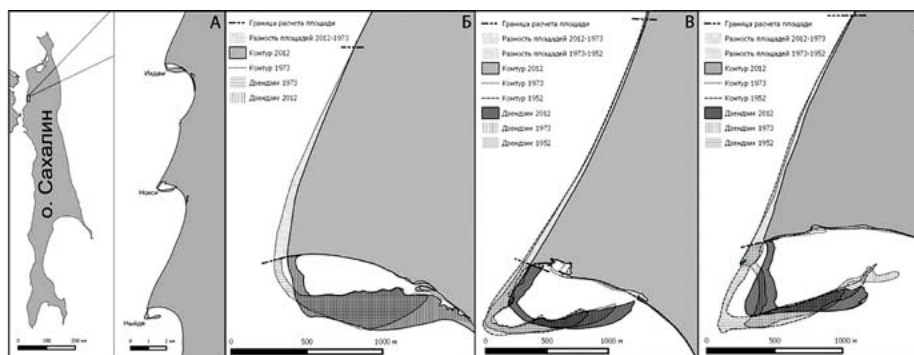


Рисунок 18 – Аккумулятивная морфолитосистема в Амурском лимане.

В **заключении главы** представлены данные об увеличении площади и объема голоценовых элементов барьерных форм лагун Пильтун и Чайво за период 1952–2012 гг.

Глава 5 посвящена механизмам формирования пляжа и распределению его волногасящих свойств вдоль берега.

В **разделе 5.1** рассмотрены строение и динамика верхней части берегового склона. Морфолитодинамические характеристики пляжа и состав пляжеформирующих отложений изучались методами повторных нивелировок по створам, детальными тахеометрическими съемками, а также пляжевыми разрезами (более 30), бурением и георадарными исследованиями.

Ритмические структуры распределения пляжевого материала вдоль берега в результате формирования мегафестонов и их систем рассмотрены в **разделе 5.2**.

Выполнен анализ неравномерного распределения пляжевого материала вдоль берега на открытых морских побережьях с преобладанием волн зыби и инфрагравитационных волн и на берегах, где наблюдается только собственно ветровое волнение. Указанные структуры имеют период от 200–300 до 1000–1400 м, в зоне пляжевых «мысов» ширина пляжа составляет 65–100 м. Размыва террас и авантюн на этих участках не наблюдается. Зоны размыва приурочены к «вогнутостям» мегафестонов, где ширина пляжа в фазу прилива составляет 3–8 метров. Как показали наши исследования, мегафестонные структуры береговой зоны в общем случае нестабильны. Они могут перемещаться либо полностью разрушаться. Так, например, в конце октября 2015 г. в результате двух интен-

сивных штормов на одном из участков косы Пильтун сформировалась мегафестонная структура распределения отложений пляжа вдоль берега, и в зоне с минимальным объемом пляжевого материала произошел размыв современной береговой террасы. Для защиты автодороги установили защитную стенку (Рисунок 19А). Следует отметить, что проблемный участок голоценовой террасы протяженностью 1800 м между двумя плейстоценовыми участками барьерной формы косы Пильтун размывается со среднегодовыми скоростями от 2,0 м/год на южном фрагменте до 0,5 м/год на северном. В основании пляжевых отложений на уровне около 2 м (БС 77) залегают мелкозернистые пески лагунных фаций. Наблюдения, проведенные в конце июля 2016 года, показали следующую картину распределения пляжевого материала вдоль берега (Рисунок 19Б). Объем пляжевых наносов в береговой зоне составляет около 250000 м³, или, при равномерном распределении вдоль берега, около 140 м³/м. На верхних элементах профиля пляжа еще сохраняется мегафестонная структура (пунктирная линия), сложившаяся в октябре-ноябре 2015 г., в то время как на нижних элементах пляжа к июлю 2016 г. в районе волноотбойной стенки (сплошная линия) сформировался аккумулятивный выступ шириной около 80 м. Однако в начале сентября 2016 г. снова начала формироваться мегафестонная структура распределения пляжевых отложений аналогичная той, при которой произошел размыв дороги. В рамках эксперимента нами было рекомендовано переместить пляжевый материал с южного мыса мегафестона в зону размыва. Эксперимент по изменению структуры распределения пляжевых отложений вдоль берега полностью удался. Буквально с первых дней байпасинга в пределах литодинамической ячейки сформировался равномерно широкий пляж без выступов и врезов, который сохранялся до начала лета 2017 г.

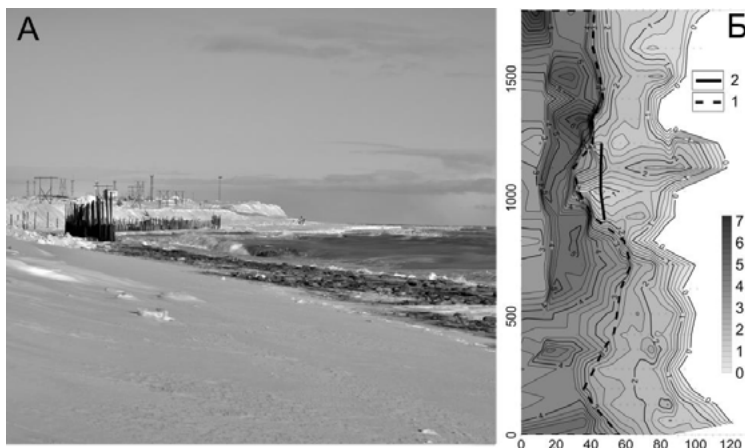


Рисунок 19 – Морфолитодинамическая ситуация на участке размыва, произошедшего 22 октября 2015 г.: А – защита берегового уступа в вершине мегафестона (фото 25.11.2015 г.); Б – строение пляжа в районе размыва на 28.07.2016 г.

На рисунке 20 представлен пример формирования мегафестонного распределения пляжевых наносов в результате строительства шпунтового коффердама на участке выхода трубопровода с морского газового месторождения на низкую террасу в 2012 г. В результате чего, ранее стабильный 400-метровый участок бере-

га стал размываться со скоростью более 3 м/год. Через год коффердам был демонтирован, но сложившаяся мегафестонная структура распределения пляжевых отложений сохраняется до настоящего времени. Объемы пляжевых отложений здесь изменяются от 20 м³/м в вогнутостях до 140 м³/м на выступах мегафестонов при среднем значении для участка по данным трех съемок 79 м³/м, 91 м³/м и 83 м³/м.

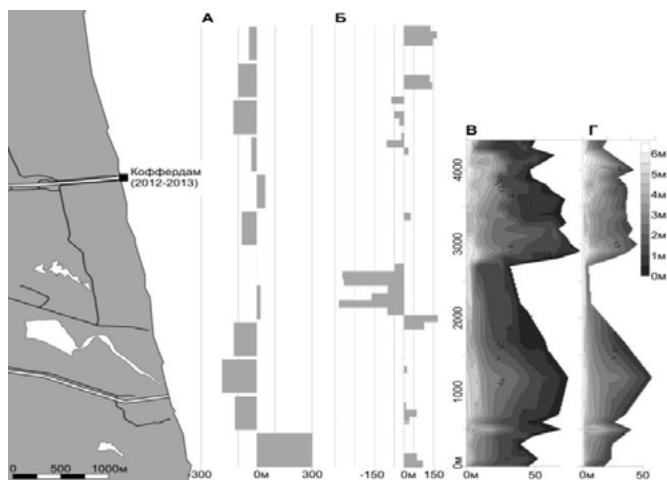


Рисунок 20 – Особенности размыва голоценовой морской террасы: А – среднемноголетние значения абразионно-аккумулятивных процессов по 500-метровым интервалам за период 60 лет; Б – среднегодовые значения абразионно-аккумулятивных процессов по 100-метровым интервалам за период 2013–2015 гг. Морфометрические параметры пляжа: В – в летний гидродинамический режим, Г – в осенний гидродинамический режим (2014–2015 гг.)

Единственный участок побережья о-ва Сахалин, где основные морфологические черты системы сохраняются уже в течение более 60 лет, установлен нами в районе п. Возморье (Рисунке 21). Характерный шаг периодических форм составляет около 800 м, а размах колебаний береговой линии достигает 40–50 м. Запасы пляжевых отложений составляют здесь от 50 м³/м в вогнутостях до 290 м³/м на выступах мегафестонов. В среднем по участку на один метр береговой линии в период 2006–2014 гг. приходилось 133–152 м³/м пляжевых наносов. При этом сезонные изменения параметров пляжа составляли 15–30 м³/м, что превышает межгодовую изменчивость. Имеющиеся материалы дистанционного зондирования и наши натурные наблюдения позволили выделить здесь три периода, различающиеся по интенсивности разрушения берегов (Рисунок 21Б).

Пространственный план размыва за период 1952–1991 гг. практически полностью соответствует мегафестонной картине, наблюдаемой последние 15 лет, что позволяет сделать вывод об устойчивости структур неравномерного распределения пляжевых отложений уже более 60 лет, по крайней мере, с начала усиления размыва берегов зал. Терпения. Строительство деревянных волноотбойных стенок в 80-е годы практически остановило процессы размыва берегов в период с 1991 по 2005 гг. Но к середине прошлого десятилетия берегозащитные сооружения были разрушены, что привело к восстановлению структуры размыва, наблюдаемой до берегозащитных мероприятий.

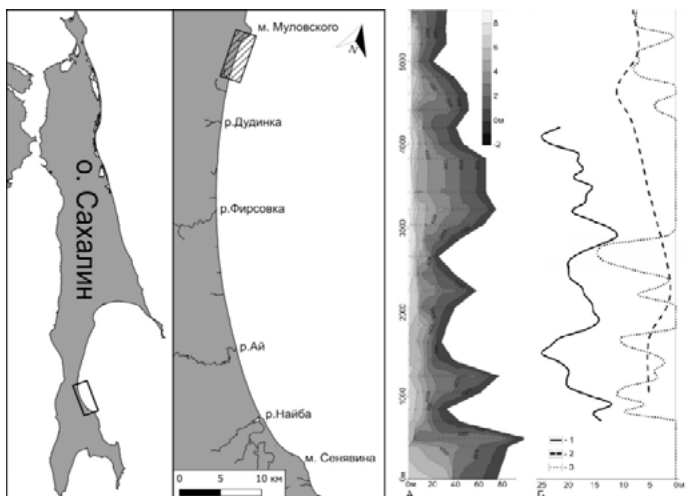


Рисунок 21 – Динамика берегов с устойчивыми мегафестонами на участке с берегозащитой, п. Взморье. А – параметры пляжа 2014 г., Б – отступление берегового уступа; – период 1952–1991 гг., 2 – период 1991–2005 гг., 3 – период 2005–2013 гг.

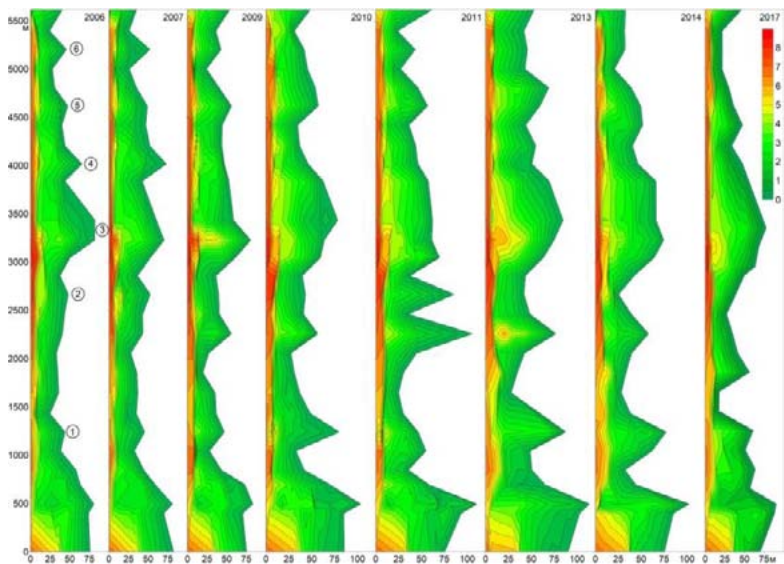


Рисунок 22 – Морфодинамика устойчивой системы мегафестонов (песчаных волн) залива Терпения за период 2006–2017 гг. В правом верхнем углу шкала высот.

В 2012 г. в «вогнутости» мегафестона на участке 104,9–105,3 км была построена защита. К сожалению, в 2014 г. сооружение, рассматриваемое нами как опытно-экспериментальное, было разрушено из-за крайне низкого качества строительного камня, который буквально рассыпался на мелкие обломки. Тем не менее,

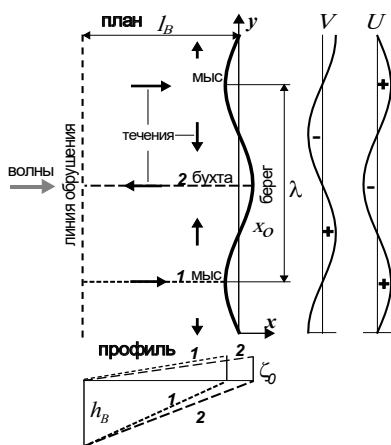


Рисунок 23 – Схема течений и потоков взвешенных наносов в условиях волнообразного контура берега. l_B – ширина прибойной зоны, h_B – глубина обрушения, x_0 – положение береговой линии, ζ_0 – высота волнового нагона, U и V – поперечная и продольная скорости течений.

ленное соотношение между шагом периодических форм λ , размером прибойной зоны l_B и скоростями прибрежных течений (Рисунок 23). Иначе говоря, длина начального возмущения должна попасть в нужный диапазон величин. Рост мегафестонов продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие между их длиной и параметрами действующего волнения. Шаг системы при этом близок к 4-кратной ширине прибойной зоны ($\lambda \approx 4 l_B$). Исходя из этого, можно полагать, что система мегафестонов в заливе Терпения поддерживается, главным образом, умеренными волнениями с высотой значимых волн H_s около 1.6 м.

В заключительном разделе главы рассмотрены основные особенности размыва берегов и представлена концептуальная модель размыва берегов на участках с большим количеством пляжевых наносов. Как показали многолетние исследования строения и морфометрии пляжа для целей практического проектирования на берегах о-ва Сахалин, формирование полностью волногасящего профиля на песчано-гравийных пляжах происходит при объеме отложений 70–90 м³/м. На большей части аккумулятивных берегов о-ва Сахалин нет дефицита наносов, однако размыв наблюдается, даже при средних значениях объема пляжевых наносов в пределах литодинамических ячеек в 140–150 м³ на 1 метр протяженности берега. По нашему мнению, размыв таких берегов связан с неравномерным распределением пляжевого материала вдоль берега в результате формирования мегафестонов и их систем. Это показано на примере участков с наблюдаемым разрушением берегового уступа, где при равномерном распределении пляжевого материала в пределах литодинамической ячейки возможность размыва морских террас в условиях Сахалина практически исключена.

в период полноценного функционирования берегозащиты на этом участке никаких негативных последствий (размывов и перемещений мысов) для сопредельных участков мегафестона отмечено не было. Следует отметить, что результаты измерения морфометрических параметров пляжа, регистрируемых по 29-му профилю-створу за период 2006–2017 гг., представленные в работе, являются первым опытом мониторинговых наблюдений мегафестонного распределения наносов береговой зоны в России (Рисунок 22). Наблюдения выполнялись 2–3 раза за сезон открытого моря, для сравнительного анализа использованы результаты осенних съемок.

Предлагается модель, объясняющая появление и развитие периодических форм берегового контура как результат самоорганизации рельефа, связанной с механизмом прибрежных циркуляционных ячеек, благодаря которым небольшое начальное возмущение контура берега может увеличиваться со временем. Положительная обратная связь между рельефом и гидродинамикой возникает тогда, когда выполняется опреде-

В Главе 6 изложена морфолитодинамика береговой зоны приливных морей после устойчивых переходов среднесуточных температур через 0 градусов.

В разделе 6.1 рассмотрены основные региональные характеристики береговой зоны о-ва Сахалин в холодный период.

В разделе 6.2 представлены концептуальные принципы развития берегов субарктических морей и морей умеренного пояса в холодный период (Рисунок 24). Выделено три динамические фазы развития берегов. Промерзание пляжа, формирование распластанных наледей и усиление размыва берегового уступа из-за ослабления волногасящих свойств пляжа (основной волногасящей структуры береговой зоны) характеризуют первую морфолитодинамическую фазу развития берегов в холодный период. В этот период формируются толщи пляжевых отложений с сингенетическими прослоями льда. Переформирование надводной части береговой зоны прекращается после формирования устойчивых краевых береговых наледей. В этот период увеличивается крутизна подводной части берегового склона и увеличивается крупность осадка в приустьевой зоне. Эта динамическая фаза начинается через несколько недель после начала промерзания отложений пляжа и заканчивается формированием ледового покрова. Развитие береговой зоны переходит в третью динамическую фазу. После установившегося ледового покрова приливно-отливные и трансформированные волновые течения под припайными льдами продолжают переформирование подводного берегового склона. Величины деформаций, установленные нами в результате повторных промеров со льда в бухте Угольная (Чукотка), могут достигать 1,5–2,0 м.

Показано как, начиная с конца октября на верхних уровнях берегового профиля, которые являются волногасящими для штормовых условий при максимальных приливах, происходит промерзание пляжевых отложений на глубину до 40–50 см и обусловленное этим ухудшение их волногасящих (главным образом дренажных и шероховатости) свойств. Следует отметить, что пляжевые отложения на этих уровнях в основном распреснены и начинают промерзать при температурах 0... –1 °С. Согласно наблюдениям, растеplяющее воздействие моря в период интенсивного гидродинамического события не успевает восстановить волногасящие свойства пляжа, и береговой уступ размывается, т.к. высота отметок заплеска увеличивается на 30–45 %. Расчеты же показали, что если для песчано-галечного пляжа со среднестатистическими для Охотоморского побережья параметрами высота наката расчетного шторма составляет 2,7–3,1 м, то для гладкого (ледяного) откоса тех же морфометрических параметров высота наката расчетного шторма составляет 5,67 м.

Теплофизические свойства снега также играют существенную роль в сезонных изменениях морфолитодинамических свойств пляжевых отложений. Снежный покров высотой более 0,4 м при наблюдаемом режиме температур воздуха в декабре-январе в ветровой тени берегового уступа низких морских террас исключает промерзание как отложений тыловой закраины пляжа, так и собственно берегового уступа.

В период формирования краевых наледей происходит перестройка верхней части подводного берегового склона. Отмечено, что формирование наледи происходит в несколько этапов. Образования начального периода обычно сильно разрушаются, т.к. представляют собой, главным образом, снежно-ледовые образования. В последующие 2–3 недели формируется несколько наледных гряд, в которых присутствует уже довольно много песчано-гравийных наносов. При этом каждая новообразованная наледь занимает все более низкое гипсометриче-

ское положение, так как начинает формироваться в период затухания штормов различной интенсивности, главным образом в фазу отлива.

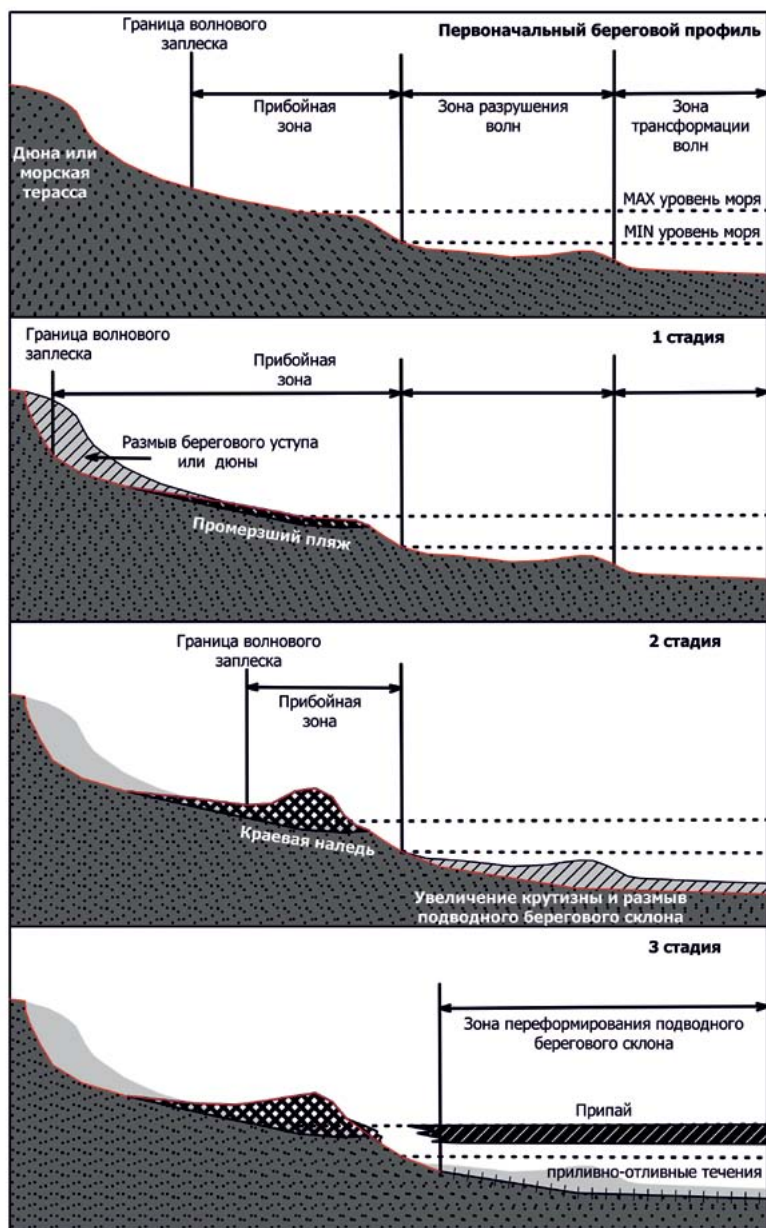


Рисунок 24 – Концептуальная схема динамики берегов в холодный период.

В фазу прилива забрызг и заброшенный на наледь пляжевый материал увеличивают параметры наледи. Несмотря на то, что непосредственные измерения в волноприбойной зоне для определения характера воздействия наледи на морфолитодинику береговой зоны практически невозможны, при изучении разрезов пляжа с наледями и при анализе участков пляжа с растаявшими наледями установлено, что пляжевый материал здесь характеризуется повышенной крупностью. Это свидетельствует о повышении энергетики прилегающей части берегового склона при увеличении уклонов. Увеличение крутизны берегового профиля и соответственно глубин в приурезовой зоне подтверждено результатами моделирования (Рисунок 25).

Для моделирования использован квазиравновесный профиль, сложенный песком 0,3 мм. Глубина на морской границе – 8 м, возвышение пляжа – 1,5 м, длина профиля – 400 м. Предполагалось, что часть пляжа, расположенная за валом, покрыта льдом и превратилась в неподвижную поверхность. После этого прошел шторм, подходящий по нормали к берегу. Средняя высота волн на глубокой воде – 1,8 м, средний период волн – 7 с, продолжительность – 12 ч. В результате сформировался профиль более крутой, чем исходный.

В заключении главы рассматривается морфолитодинамическая модель развития береговой зоны в холодный период и представляется прогноз опасного периода усиления размыва берегового уступа при изменении волногасящих свойств пляжа. Этот временной интервал начинается с момента промерзания отложений пляжа и заканчивается при формировании устойчивой краевой наледи и припая. Завершение периода высокой вероятности разрушения берегового уступа устанавливается нами по данным о формировании и развитии припая. За дату начала периода высокой вероятности разрушения берегового уступа принята наиболее ранняя вероятная дата, совпадающая с датой перехода средней температуры поверхности почвы через 0°C . Расчет даты перехода через 0°C осуществлялся по показаниям срочных напочвенных термометров для трехчасовых сроков измерения, полученным с сайта ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» [<http://aisori.meteo.ru/ClimateR>]. Для нескольких станций расчеты проведены ФГБУ «Сахалинское УГМС». Для каждой ГМС получено среднее значение за 21-летний период. По полученным данным методом экспоненциального крингнга проведена аппроксимация и построена сеть интерполированных и экстраполированных дат, на основе которой получена карта средних многолетних дат перехода среднесуточной температуры поверхности почвы через 0°C (Рисунок 26А). Полученная информация по переходу среднесуточной температуры поверхности грунта через 0°C на минусовые отметки была сопоставлена с данными по началу формирования припая (наледей). При этом принято допущение, что скорость распространения припая вдоль береговой линии изменяется линейно, постепенно возрастая в начале периода образования наледи и убывая к концу. На основе осредненного за многолетний период положения припая в фиксированные моменты времени построен график скоростей пространственного изменения положения припая, которые были рассчитаны методом линейной интерполяции между датами. Далее была проведена интерполяция ежедневного изменения об-

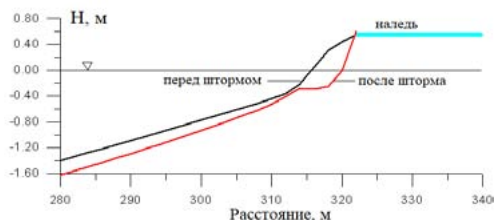


Рисунок 25 – Перестройка профиля пляжа при формировании наледи (модель).

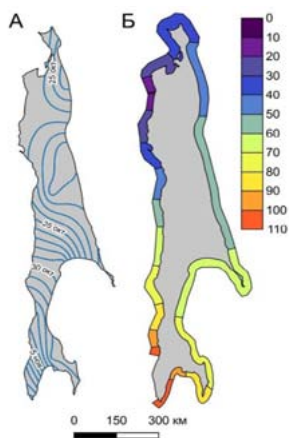


Рисунок 26 – А – карта изохрон перехода среднесуточной температуры поверхности грунта на минусовые значения; Б – карта продолжительности периода максимальной опасности разрушения берегового уступа.

Таким образом, расчетный период опасных воздействий на береговой уступ соответствует данным полевых наблюдений и подтверждает предлагаемую концепцию развития береговой зоны после перехода среднесуточных температур почвы к минусовым значениям.

В главе 7 выполнен критический анализ проблем берегопользования на берегах субарктических и умеренно-холодных морей. Сделан акцент на особенности морфолитодинамики берегов в холодный период, что следует учитывать при хозяйственном использовании побережий. Отмечено, что в условиях сложившейся системы берегопользования одним из следствий решения сложных технических задач «хозспособом» явилось то, что оценки техногенной нагрузки на берега Сахалина существенно занижены. Мы постарались исправить ситуацию (Таблица 2). Безразмерный показатель (коэффициент К), показывающий отношение протяженности инженерных сооружений и других техногенных объектов к длине береговой линии, характеризует только наиболее общие тенденции воздействия человека на берега, тем не менее, этот коэффициент позволяет сравнить и оценить уровень техногенной нагрузки на них. В самое ближайшее время потребуются защита еще до 28 км ранее не защищаемых берегов. В том числе около 7 км ж/д пути.

В разделе 7.1 подробно рассмотрено инженерно-геоморфологическое обоснование защиты линейных объектов и транспортных коридоров на берегах различного типа, в разработке которых автор принимал непосредственное участие.

В силу сложных инженерно-геологических условий (оползни, сели) на острове есть районы, где транспортные коммуникации, в том числе регионального значения, возможны только вдоль береговой линии по поверхности голо-

ласти распространения припая на основе расчетных скоростей. Продолжительность периода наиболее интенсивного размыва берегового уступа рассчитывалась с декадной дискретностью (Рисунок 26Б). Как и ожидалось, минимальная продолжительность периода интенсивного размыва берегов определена для северо-западного побережья о-ва Сахалин, где наледь и припай формируются в течение 2–3 недель после перехода среднесуточных температур к минусовым значениям. Максимальный период интенсивного размыва берегов в холодный период времени характерен для побережья зал. Анива и зал. Невельского. За счет теплых течений припай здесь в некоторые годы вообще не формируется. Полевые наблюдения, проводимые нами на берегах зал. Терпения в период 2002–2016 гг., подтверждают, что опасный период для побережья зал. Терпения начинается с конца октября и продолжается 2–3 месяца. Практически все разрушения автодорожного полотна наблюдались здесь в ноябре–январе. Период повышенной опасности размыва берегов на северо-востоке Сахалина существенно короче – в среднем около 30–40 дней. В конце ноября – начале декабря, как показали наши наблюдения 2009–2016 гг., здесь формируются наледь и припай, и переформирование надводной части береговой зоны прекращается.

ценовых морских террас. Особо отмечено, что при проведении реконструкции железной дороги с переустройством ширины колеи на 1520 мм проигнорированы тенденции развития и особенности морфолитодинамики берегов. Серьезным общим недостатком продольных берегозащитных сооружений является разрушение аккумулятивных образований на стыках с берегозащитными сооружениями. Кроме того, защищая на протяжении десятилетий берег от разрушения, мы исключаем из баланса наносов береговой зоны такую важную приходную статью, как поступление обломочного материала из береговых обрывов. Для решения этой проблемы на флангах аккумулятивных образований, сопряженных с укрепленными участками побережья, нами были предложены и рассчитаны искусственные галечные пляжи. Десять лет наблюдений показали, что на этих участках сформировался устойчивый песчано-галечный пляж.

Таблица 1. Антропогенная нагрузка на берега о-ва Сахалин.

Участок побережья	Протяженность побережья, км	Протяженность сооружений, км				Коэффициент техногенной нагрузки K_t , км/пог. км
		Бетонные, шпунтовые, рьявые стенки, сооружения откосного типа, бетонно-каменные наброски	Моли, причалы, шпоры, угольные галереи	Участки, ранее не защищенные, требующие безотлагательной защиты для сохранения хозяйственных объектов	Карьеры песчаные в зоне пляжа $L/Q_{км/тыс. м^3}$	
зал. Анива	245,0	17,9	4,8	-	0,75/200	0,1
зал. Мордвинова	30,0	0,8	0,4	-	12,0/1622 (1975-1985гг)	0,44
зал. Терпения м. Сенавина – м. Терпения	405,0	32,0	2,9	25,4	9,85/60-лее5000	0,11
м. Терпения – м. Елизаветы	690,0	2,0	0,9	-	1,4/60-лее1000	0,006
Сахалинский залив, Амурский лиман, пролив Невельского	420,0	2,1	2,1	-	-	0,01
Татарский пролив м. Тык – м. Корсакова	225,0	1,5	2,7	-	-	0,02
м. Корсакова – м. Ламанон	160,0	9,4	3,4	-	-	0,08
м. Ламанон – м. Слепиковского	185,0	12,0	2,2	2,5	-	0,08
зал. Невельского м. Слепиковского – м. Лопатина	95,0	37,8	5,7	-	-	0,46
м. Лопатина – м. Крильон	90	2,4	0,3	-	0,3/ нет данных	0,03
Итого:	2545	102,1	25,4	27,9	24,3	0,06

В разделе 7.2 подробно рассмотрены вопросы разработки рекомендаций по освоению прибрежной зоны для природопользования и защиты селитебных территорий. Анализируются подходы к проблеме берегозащиты в разных регионах. Показана эволюция берегозащитных решений на побережьях холодных морей. Предложены новые решения в условиях холодных морей.

Раздел 7.3 посвящен нефтегазовой инфраструктуре расположенной на побережье и непосредственно в высокоэнергетической береговой зоне. Выполнен анализ ситуации и проведена экспертиза намечаемой деятельности. Представлены концепции берегозащиты на проблемных участках побережья. Отмечено, что дноуглубительные работы могут быть весьма опасны для водных биологических ресурсов. Сделан вывод о необходимости детальных исследований площадки завода СПГ в зал. Де-Кастри на предмет изучения глубинной суффозии по вулканическим туфам. Отмечено, что в перспективе значительная часть нефтегазовых проектов будет реализовываться в высоких широтах и поэтому принципиально важным является изучение субарктического и арктического типа берегового морфолитогенеза.

В заключении диссертации после критического анализа исторического опыта исследований береговых морфолитодинамических процессов морей Северной Пацифики, разработан и представлен собственный подход к решению этой проблемы. Отмечено, что при планировании деятельности на берегах субарктических и умеренно-холодных морей следует обратить самое пристальное внимание на специфику эрозийного (абразионного) берегового процесса контактной зоны. Новые данные о динамике и развитии берегов дальневосточных морей в условиях усиления размыва позволили создать модель осадконакопления и сделать прогноз развития аккумулятивных форм свободного и барьерного типа.

Основные выводы

Исследования показали, что в развитии берегов субарктических и умеренно-холодных морей в осенне-зимний период в общем случае установлены три морфолитодинамических стадии. В начале происходит промерзание пляжа, формирование распластанных наледей и усиление размыва берегового уступа из-за ослабления волногасящих свойств пляжа в холодный период. Через несколько недель после начала промерзания отложений пляжа формируются устойчивые краевые береговые наледы, увеличивается крутизна берегового профиля и соответственно глубины в приустьевой зоне, что приводит к увеличению высоты заплеска и укрупнению гранулометрического состава отложений. С формированием ледового покрова приливо-отливные течения под припайными льдами продолжают переформирование подводного рельефа. Величины деформаций на бухтовых берегах могут достигать 1,5–2,0 м. На основе разработанной концепции динамики береговой зоны при переходе среднесуточных температур к минусовым значениям определены периоды максимальной опасности разрушения берегов этих морей. Сделан вывод о том, что расчетный период опасных воздействий на береговой уступ соответствует данным полевых наблюдений и подтверждает предлагаемую концепцию развития береговой зоны после перехода среднесуточных температур к минусовым значениям.

Основные закономерности пространственной структуры разрушения берегов определяют ритмичность и цикличность проявления процессов размыва. Анализ графиков спектральной плотности интенсивности размыва, определенной на основе обработки в среде ГИС аэрофотоинформации (залеты 1952, 1974 гг.) и космофотоинформации (2014 и 2015 гг.) позволил установить ритмы размыва с длиной волны вдоль береговой линии 1.3, 2.0, 4.0, 5.6, 8.5, 11.6, 25.6, 64 км. Высокопорядковая ритмичность процессов размыва, в нашем случае ≈ 30 –60 км, на выровненных берегах связана с устойчивыми зонами дивергенции результирующих потоков наносов, характеризующихся пониженным объемом

пляжевых отложений. Ритмичность размыва 1,3 км соответствует размерности крупных мегафестонных структур пляжа.

Для формирования полностью волногасящего профиля на изученных песчано-гравийных пляжах Сахалина достаточно 70–90 м³ наносов на 1 погонный метр протяженности береговой линии. Тем не менее, размыв берегов наблюдается даже при средних значениях объема пляжевых наносов в пределах литодинамических ячеек в 140–150 м³/пог. м. Размыв таких берегов обусловлен именно неравномерным распределением пляжевого материала вдоль берега в результате формирования систем мегафестонов. Устойчивые системы мегафестонов поддерживаются, главным образом, умеренными волнениями с высотой значимых волн около 1,6 м. Несмотря на значительные флуктуации в масштабах сезонов, лет и десятилетий, основные морфологические черты устойчивых систем сохраняются уже в течение не менее 60 лет.

Выявлено, что крупнейшие аккумулятивные образования голоценового возраста приурочены к областям с максимальными на протяжении всего неоген-четвертичного времени скоростями осадконакопления. Изменение морфометрических показателей аккумулятивных образований за период 1952–2012 гг. свидетельствует о накоплении наносов в областях унаследованной аккумуляции при общей тенденции усиления размыва берегов наблюдаемого с 40-х годов прошлого века.

На данной стадии развития побережий дальневосточных морей параметры бюджета наносов определяют процессы размыва береговых уступов в неконсолидированных отложениях неоген-плейстоценового возраста и переформирования голоценовых аккумулятивных форм. Наибольшие морфолитодинамические изменения береговой зоны лагунных берегов Северной Пацифики происходят в системах проливов. Анализ информации, в частности, о переформировании берегов северо-восточного Сахалина показал, что в среднем за многолетний период в зону конвергенции потоков наносов в районе пролива лагуны Ныйво с севера поступает около 13 тыс. м³/год наносов. Около 106 тыс. м³/год, из которых примерно 65–70 тыс. м³ осадки открытого моря (алеврито-пелитовых фракций), поступает с юга. В зоне пролива лагуны Ныйво, согласно анализу карт переформирования берегов, аккумулируется около 23 тыс. м³/год осадков пляжеформирующих фракций, что практически уравнивает приходную и расходную части наносов построенной балансовой модели литодинамической системы северо-восточного Сахалина.

Построены высокоточные фотограмметрические цифровые разновременные модели (SFM Photogrammetry) рельефа абразионно-денудационных берегов морей Северной Пацифики, позволившие определить скорости и характер разрушения коренных горных пород слабой и средней устойчивости. Высокоточные данные о скоростях разрушения поверхности косейсмически поднятого бенча показали, что разрушение субгоризонтальной поверхности бенча на стадии адаптации субаквального типа рельефа к субаэральным условиям происходит со скоростями примерно на порядок меньшими, чем скорости разрушения субвертикальных береговых уступов в породах слабой и средней устойчивости. Роль волнового воздействия в развитии бенчей сводится, главным образом, к мобилизации и выносу обломков, полученных в результате морозного выветривания при отрицательных температурах воздуха в период открытого моря. Высокоточные ортофотопланы и 3D-модели высокого берегового уступа, сложенного вулканогенно-осадочными породами, позволили выявить механизмы разрушения клифов с неоднородной прочностью и определить их количественные параметры.

Только в последнее время при анализе геопространственной информации о динамике арктических побережий выяснилось, что минимальные перемещения отмечены для кос и баров, максимальные скорости размыва наблюдаются на берегах равнин, сформированных при спуске озер. Площадь же барьерных островов увеличилась в период 1940–2010 гг. на западном побережье моря Бофорта на 45 %. Интересно, что барьерные острова на дельтовых побережьях России также стабильны либо нарастают. Накопление наносов в областях унаследованной аккумуляции при усилении размыва берегов, наблюдаемого с 40-х годов прошлого века, установлено нами при анализе динамики аккумулятивных образований Сахалина. Т.е. бары и косы, не теряющие связи с областями питания, не деградируют, а лишь перестраиваются как в условиях субарктики, так и арктического побережья. Наиболее страдающие от переформирования берегов – Shishmaref, Kivalina, Unalakleet, расположены на дистальных окончаниях кос системы лагунного пролива. Соответственно берегозащитные решения должны основываться на анализе миграций пролива, формы и морфометрии дистальных окончаний кос, модификации приливной призмы и возможностей изменений направления роста кос.

Результаты теоретических построений и моделирования морфолито-динамических процессов внедрены в практическую деятельность по сохранению, защите, хозяйственному использованию и управлению морских берегов дальневосточных морей России и других территорий Северной Пацифики.

Основные публикации автора по теме диссертации

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК

1. **Афанасьев В.В.** Проблемы берегопользования Сахалинской области // Проблемы региональной экологии. 2010. № 2. С. 142–148.
2. **Афанасьев В.В.** Состояние правового регулирования отношений в сфере использования берегов России // Проблемы региональной экологии. 2009. № 5. С. 65–70.
3. **Афанасьев В.В.** Геоэкология береговой зоны острова Сахалин // Проблемы региональной экологии. 2009. № 6. С. 275–280.
4. **Афанасьев В. В.** Защита берегов Сахалина // География в школе. 2011. № 10. С. 19–20.
5. **Афанасьев В.В.** Геоморфологические аспекты проблемы защиты берегов острова Сахалин // Геоморфология. 2015. № 2. С. 28–37.
6. **Афанасьев В.В.,** Игнатов Е.И., Чистов С.В., Ткаченко Н.Ф. Экологические проблемы строительства крупных транспортных переходов (на примере Невельского и Керченского проливов) // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2015. № 4. С. 55–60.
7. **Афанасьев В.В.,** Игнатов Е.И., Чистов С.В., Ткаченко Н.Ф. Экологические проблемы строительства крупных транспортных переходов (на примере Невельского и Керченского проливов) // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2015. № 5. С. 51–58.
8. **Леонтьев И.О., Афанасьев В.В.** Динамика лагунного берега северо-восточного Сахалина на примере системы Ныйского залива и косы Пластун // Океанология. 2016. Т. 56, № 4. С. 618–626.
9. **Афанасьев В.В.,** Уба А.В. Средне-позднеголоценовые аккумулятивные образования северо-западного побережья острова Сахалин: происхождение, история и современная динамика // Вестник ДВО РАН. 2017. № 1 (191). С. 12–17.
10. **Афанасьев В.В.,** Дунаев Н.Н., Горбунов А.О., Уба А.В. Проявление кальдерообразующего вулканизма в формировании морского побережья (на примере о. Итуруп Большой Курильской Гряды) // Процессы в геосредах. 2018. № 3(16). С. 990–998.
11. **Афанасьев В.В.,** Уба А.В. Размыв морских берегов северо-восточного Сахалина // Геоморфология. 2018. № 4. С. 25–35.

12. Афанасьев В.В. Геоморфологические аспекты проблемы выбора участков для строительства заводов СПГ на побережье // Проблемы региональной экологии. 2018. № 5. С. 25–35.
13. Леонтьев И.О., Афанасьев В.В., Уба А.В. Ритмические структуры контура берега в заливе Терпения о. Сахалин // Океанология. 2019. Т. 59, № 3. С. 497–505.
14. Афанасьев В.В. Морфолитодинамика лагунных проливов северо-восточного Сахалина // Геоморфология. 2019. № 2. С. 79–94.
15. Афанасьев В.В., Игнатов Е.И. Геоморфологические аспекты проблемы защиты населенных пунктов на берегах морей в высоких широтах // Теоретические и прикладные проблемы экологии. 2019. № 4. С. 39–45.
16. Afanas'ev V.V., Uba A.V. The destruction of rocky shores at high latitudes according to precision measurements data // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. Vol. 324. № 1. Article number: 012025.
17. Afanas'ev V.V. et al. Vetrovoy isthmus of iturup island–holocene strait // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. Vol. 324. № 1. Article number: 012029.

Монографии

18. Афанасьев В.В., Игнатов Е.И., Чистов С.В. Морфология и динамика берегов и дна пролива Невельского района проектирования постоянного железнодорожного перехода. Смоленск: Маджента, 2008. 128 с.

Статьи в сборниках и журналах РИНЦ

19. Афанасьев В.В. К вопросу о морфоструктуре северо-западного Сахалина // Геологические и геоморфологические особенности некоторых регионов Дальнего Востока и зоны перехода к Тихому океану. Владивосток: ДВПИ, 1989. С. 100–106.
20. Афанасьев В.В. Размыв берегов северо-западного Сахалина // Береговая зона дальневосточных морей. Л.: Изд-во ГО СССР, 1991. С. 98–104.
21. Афанасьев В.В. Эволюция побережья дальневосточных морей в голоцене // Эволюция берегов в условиях поднятия уровня океана. М., 1992. С. 166–174.
22. Афанасьев В.В. Косы “азовского” типа в Амурском лимане // Географические исследования шельфа дальневосточных морей. Владивосток: Изд-во ДВГУ, 1993. С. 93–99.
23. Афанасьев В.В., Мыглан М.Ю., Типер А.И. Развитие бухтового берега в условиях 50-ти лет техногенного воздействия (Чукотское побережье) // Геогр. исслед. морских побережий. Владивосток: Изд-во ДВГУ, 1998. С. 35–43.
24. Афанасьев В.В. Как остановить наступление моря // Строительная индустрия Сахалина. 2014. № 21. С. 36–39.
25. Афанасьев В.В. Устойчивое развитие или конфликт интересов: что выбираем // Строительная индустрия Сахалина. 2014. № 22. С. 42–45.
26. Афанасьев В.В. Геоморфологическое строение и история развития прибрежной равнины северо-западного Сахалина // Проблемы современной науки и образования. 2016. № 11(53). С. 139–148.
27. Афанасьев В.В. Проблемы берегопользования Дальневосточных морей (на примере о. Сахалин и сопредельных территорий) // Вестник науки и образования. 2016. № 6 (18). С. 121–129.
28. Афанасьев В.В., Романов А.О., Уба А.В. Динамика берегов в холодный период // Геосистемы переходных зон. 2017. № 1. С. 23–29.
29. Афанасьев В.В., Уба А.В., Горбунов А.О., Зарочинцев А.С., Левицкий А.И. Морфодинамика устойчивой системы мегафестонов (песчаных волн) зал. Терпения (о. Сахалин) // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2, № 1. С. 42–51.
30. Afanasiev V.V., Ignatov E.I. Geomorphological aspects of coast protection in high latitudes // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2, № 2. С. 116–124.
31. Афанасьев В.В., Леонтьев И.О., Уба А.В. Динамика аккумулятивных берегов с закрепленным береговым уступом // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3. № 1. С. 77–83.

Статьи в трудах международных конференций

32. **Афанасьев В.В.**, Игнатов Е.И., Сафьянов Г.А., Чистов С.В. Защита берегов в п. Взморье, остров Сахалин, методом компенсации дефицита наносов // Тр. междунар. конф. "Создание и использование земельных участков на берегах и акватории водоемов". Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. С. 181–187.
33. **Афанасьев В.В.**, Гогоберидзе Г.Г., Мараховская С.Г. Влияние глобальных изменений климата и усиления антропогенной нагрузки на рекреационные ресурсы побережья о. Сахалин // Труды 2-ой Международ. научно-практ. конференции «Подготовка кадров для XXII Олимпийских и XI Паралимпийских игр». Сочи, 2009. С. 164–172.
34. **Афанасьев В.В.**, Игнатов Е.И. Основные принципы защиты побережий Дальнего Востока // Тр. 2-й Междунар. конф. «Создание искусственных пляжей, островов и других сооружений в береговой зоне морей, озер и водохранилищ», 1–6 августа 2011 г. / отв ред. А.Ш. Хабидов. Новосибирск, 2011. С. 67–70.
35. **Афанасьев В.В.** Морфодинамика береговой зоны приливных субарктических морей после устойчивых переходов среднесуточных температур через 0 и проблемы берегозащиты // Морские берега - эволюция, экология, экономика: Материалы XXIV Междунар. конф., 1–6 окт. 2012 г., Туапсе. Краснодар, 2012. Т. 2. С. 46–52.
36. **Афанасьев В.В.**, Игнатов Е.И. Геоморфологические казусы берегового природопользования острова Сахалин // Тр. 3-й Международ. конф. «Создание и использование искусственных земельных участков на берегах и акваториях водных объектов», 29 июля – 3 августа 2013 г., Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2013. С. 12–13
37. **Афанасьев В.В.** Динамика барьерных форм лагунного побережья северо-восточного Сахалина и вопросы зонирования побережья для целей проектирования и эксплуатации // Береговая зона – взгляд в будущее: мат-лы XXV Международ. береговой конф., 13–17 октября 2014 г., Сочи: в 2-х томах. М.: ГЕОС, 2014. Т. 1. С. 12–14.
38. **Афанасьев В.В.** Проблемы берегопользования субарктических морей (на примере о. Сахалин) // Современные проблемы использования потенциала морских акваторий и прибрежных зон: мат-лы 11 Международ. науч. конф., г. Москва, 26 марта 2015 г. М.: Сам Полиграфист, 2015. Ч. 1. С. 118–131.
39. **Afanasyev V.**, Ignatov E. View of the shore geomorphologist on the problem of coastal erosion and shore protection in high latitudes // Practical Geography and XXI Century Challenges International Geographical Union Thematic Conference dedicated to the Centennial of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences. 2018. С. 36–43.
40. Леонтьев И.О., **Афанасьев В.В.**, Уба А.В. Система мега фестонов на берегах залива терпения о. Сахалин: наблюдения и моделирование // Арктические берега: путь к устойчивости: материалы XXVII международной береговой конференции. Мурманск, 24–29 сентября 2018 г. С. 104–107.
41. **Афанасьев В.В.** Особенности морфолитодинамики лагунных берегов арктических и субарктических морей // Арктические берега: путь к устойчивости: материалы XXVII международной береговой конференции. Мурманск, 24–29 сентября 2018 г. С. 15–19.