

На правах рукописи

УДК 551.46.062.8 : 551.465.45 : 551.466.62

**ШЕВЧЕНКО Георгий Владимирович**

**ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА ШЕЛЬФЕ  
И ПРОГНОЗ МОРСКИХ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ  
(НА ПРИМЕРЕ О. САХАЛИН)**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук



Южно-Сахалинск  
2006

Работа выполнена в Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук и ФГУП «Сахалинский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии».

**Официальные оппоненты:** доктор географических наук, профессор Некрасов Алексей Всеволодович;

доктор физико-математических наук, профессор Жмур Владимир Владимирович;

доктор физико-математических наук Доманский Андрей Владимирович.

**Ведущая организация:** Институт прикладной физики Российской академии наук.

Защита состоится 26 июня 2006 г. в 14 час. на заседании диссертационного совета ДМ005.026.01 при Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу: г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1 б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «\_\_\_» мая 2006 г.



Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

 О. Н. Лихачева

Бурное развитие хозяйственной деятельности в прибрежных районах, освоение океанского шельфа и его минеральных ресурсов – характерная черта для последних десятилетий прошлого века и ближайшего будущего. Шельф – это специфическая область океана, где существуют особые виды динамических процессов, связанных с эффектами захвата волновой энергии, шельфового резонанса, явления прибрежного апвеллинга, собственных колебаний в заливах и бухтах, прибойных биений и разрывных течений, оказывающих существенное влияние на размывы берегов и формирование прибрежного рельефа. Исследование этих процессов, выявление физических механизмов их формирования, описание и прогноз, учет их возможного взаимодействия, расчет динамических нагрузок и оценка вероятности катастрофических явлений – это задача исключительной важности.

Развитие нефтегазового комплекса на шельфе о. Сахалин явилось мощным фактором роста промышленного потенциала области в последние годы, отодвинув на второй план традиционные сектора экономики. Соответственно, вопросам, связанным с освоением морских месторождений углеводородного сырья, уделяется большое внимание. Для безопасного проектирования промышленных объектов в прибрежной зоне необходимы расчеты экстремальных нагрузок, связанных с морскими опасными явлениями, а также возможным сочетанием нескольких неблагоприятных факторов. Для дальневосточных берегов России основная опасность традиционно связывается с катастрофическими волнами цунами. Об их колоссальной разрушительной силе напомнило унесшее более 220 тысяч человеческих жизней цунами 26 декабря 2004 г. в Индийском океане. Для северо-восточного шельфа о. Сахалин, помимо цунами, грозную опасность представляют штормовые нагоны, а также такой фактор, как ледовые нагрузки.

Начало изучения особенностей динамических процессов на шельфе было положено В. Манком [Munk, 1949; Munk et al., 1956, 1962, 1964]. В России аналогичные исследования, инициаторами которых были С. Л. Соловьев и С. С. Лаппо, успешно развивались в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН. Результаты анализа данных прибрежных экспериментов, а также двух специализированных советско-американских экспедиций по изучению длинных волн в диапазоне периодов цунами в открытом океане и на шельфе были обобщены в монографиях [Ефимов и др., 1985; Рабинович, 1993], а также в диссертационной работе [Рабинович, 1998]. Необходимо также отметить ряд обобщающих работ, сфокусированных на отдельных явлениях – цунами [Пелиновский, 1982; Куликов, 2005; Левин, Носов, 2005], приливах [Некрасов, 1975, 1990], сгонно-нагонных колебаниях [Герман, Левиков, 1988].

В работах [Ефимов и др., 1985; Рабинович, 1993, 1998] основное внимание уделялось цунами и в целом особенностям динамики длинных волн на шельфе в сравнительно высокочастотном диапазоне – шельфовый резонанс, краевые волны и их свойства, собственные колебания в заливах и



бухтах. Этим вопросам уделено значительное внимание и в настоящей работе. Помимо этого, возникли новые задачи, связанные с использованием для оперативного прогноза цунами данных, поступающих в реальном времени с удаленных регистраторов, установленных в Холмске, Северо-Курильске и Усть-Камчатске.

В силу специфики основной задачи, связанной с изучением динамических процессов на шельфе Сахалина, в данной работе больше внимания уделено существенно более низкочастотным явлениям – приливам, сгонно-нагонным колебаниям и сезонным вариациям. Значительно изменился и характер экспериментальных данных – если раньше это были преимущественно материалы измерений придонного гидростатического давления (уровня моря), то теперь на передний план вышли инструментальные измерения морских течений. Особого внимания заслуживают измерения скорости и направления дрейфа льда, которые производились в конце 1980-х – начале 1990-х годов при помощи береговых радиолокационных станций. В последние годы одним из важнейших источников информации об океанологических процессах в различных акваториях является спутниковая альтиметрия. Основной целью ее использования в данной работе было изучение сезонной изменчивости циркуляции на шельфе Сахалина – существенного элемента прогнозирования распространения загрязнений при аварийных ситуациях в районе нефтепромысла. Такое изменение характера материалов наблюдений потребовало развития новых подходов для их анализа и интерпретации полученных результатов.

Именно эти обстоятельства определили предмет настоящей работы как комплексное изучение колебаний уровня моря и скоростей морских течений на шельфе в широком диапазоне периодов: от нескольких десятков секунд до нескольких месяцев, охватывающее различные физические явления – инфрагравитационные волны, цунами, сейши в заливах и бухтах, приливы и приливные течения, сгонно-нагонные колебания и дрейфовые течения, сезонные вариации и сезонная изменчивость циркуляции.

Основной акцент в работе делается на исследовании волновых особенностей указанных явлений, а также их пространственной изменчивости, обусловленной вариациями прибрежного рельефа. В большинстве случаев океанский шельф достаточно близок к цилиндрическому, однако даже незначительные, на первый взгляд, вдольбереговые изменения могут быть причиной существенных различий в характере длинноволновых процессов.

Только точное понимание физических особенностей проявления опасных природных явлений позволяет надежно оценивать экстремальные и катастрофические воздействия на промышленные объекты и сооружения, расположенные на шельфе или в прибрежной зоне, что позволяет предпринять эффективные меры по повышению их безопасности. Важнейшим элементом берегозащитных мероприятий является *оценка риска цунами и штормовых нагонов* для различных районов и *долгосрочный прогноз* дан-

ных опасных явлений. Именно круг вопросов, связанных с этой проблематикой, занимает центральное место в данной работе, определяет ее **актуальность и практическую значимость**.

**Целью** исследования было: выявление физических механизмов проявления длинноволновых процессов на шельфе в широком диапазоне периодов (инфрагравитационные волны, цунами, приливы, сгонно-нагонные колебания, сезонные вариации), комплексное описание характера их пространственной изменчивости в зависимости от вариаций прибрежного рельефа, разработка надежных методов прогноза возможного воздействия на прибрежные объекты как отдельных факторов, так и их возможных сочетаний.

Для реализации данной цели были поставлены следующие конкретные **задачи**:

- изучить пространственную изменчивость проявления шельфового резонанса с учетом реальной топографии, а также степени захвата энергии цунами при источнике в пределах материкового склона;
- разработать методы расчета экстремальных колебаний уровня моря и скоростей течений, учитывающие волновую природу различных составляющих, их пространственную изменчивость, а также вероятность наложения нескольких неблагоприятных факторов;
- исследовать характер изменчивости спектра длинноволновых колебаний при различных погодных условиях и разработать адекватные модели, объясняющие механизмы генерации длинных волн на шельфе атмосферными процессами;
- разработать физически обоснованные модели, описывающие неизотропный отклик дрейфа льда на воздействие ветра в зависимости от расстояния от берега;
- разработать методы прямого расчета параметров приливных волн по данным спутниковой альтиметрии, позволяющие использовать их для исследования особенностей приливного режима в окраинных морях и зоне шельфа.

**Используемые материалы.** Работа основана на анализе обширного фактического материала измерений колебаний уровня, скоростей морских течений и дрейфа льда. Их источниками были:

- натурные эксперименты, проводившиеся лабораторией цунами ИМГиГ ДВО РАН в районе Южных Курильских островов, на юго-западном шельфе Камчатки и у побережья о. Сахалин;
- совместные с Центром цунами СахУГМС (Т. Н. Ивельская) работы по анализу передаваемых в режиме реального времени данных удаленных регистраторов (Холмск, Северо-Курильск, Усть-Камчатск);
- материалы наблюдений за уровнем моря, приземным атмосферным давлением и скоростью ветра на береговых гидрометеостанциях на Сахалине и Курильских островах с целью исследования характеристик сгонно-нагонных колебаний;



– материалы измерений колебаний уровня моря, скорости течений и дрейфа льда, полученные на северо-восточном шельфе о. Сахалин Дальневосточной морской инженерно-геологической экспедиции (ДМИГЭ, в настоящее время – Экологическая компания Сахалина);

– данные инструментальных наблюдений за течениями на шельфе Сахалина, выполненных Сахалинским НИИ рыбного хозяйства и океанографии;

– материалы наблюдений за уровнем Охотского моря и прилегающих акваторий, полученных при помощи альтиметра спутника Торех/Poseidon (1993–2002 гг.), предоставляемые на сайтах PO.DAAC.

В планировании и организации экспериментов ИМГиГ и СахНИРО автор принимал непосредственное участие.

**Научная новизна работы** связана в первую очередь со следующими результатами:

– применительно к широкому кругу явлений (цунами, приливы и приливные течения, сгонно-нагонные колебания) выявлен физический механизм формирования пространственной изменчивости волнового поля на шельфе, обусловленный вдольбереговыми вариациями прибрежного рельефа;

– получены оценки энергетической значимости отдельных процессов, и разработаны методы оценки экстремальных колебаний уровня и скоростей морских течений, позволяющие учитывать вероятность наложения различных опасных факторов, с учетом их изменчивости в различных точках исследуемой акватории по отношению к стационарному пункту наблюдений;

– раскрыт механизм формирования шельфовых волн на частотах нулевой групповой скорости, образующих стоячие колебания, видимое движение фазы связано со сменами знака в паре стационарных вихревых структур;

– предложена модель, адекватно отражающая неізотропный характер отклика дрейфа льда и течений на воздействие ветра в зависимости от расстояния от берега;

– разработан оригинальный, обладающий высокой точностью метод расчета амплитуд и фаз приливных волн из рядов альтиметрических данных в точках подспутникового трека.

**Практическая значимость работы.** Большинство результатов данной работы ориентированы на решение задачи оценки риска, связанного с воздействием опасных морских явлений на промышленные объекты в прибрежной зоне. Детальные оценки высот волн цунами и штормовых нагонов для побережья Сахалина были сделаны по заказу администрации Сахалинской области. Аналогичные расчеты Курильских островов выполнялись в рамках «Программы развития Курильских островов...». Цунамирайонирование побережья бухты Авачинская Губа проводилось по заказу администрации Камчатской области.

Метод композиции распределений различных составляющих использовался для расчета экстремальных колебаний уровня моря с учетом вероятности наложения цунами на прилив (отлив) или штормовой нагон (сгон) для районов планируемых водозаборных устройств Ногликской ГРЭС и АЭС в п. Синпхо, КНДР.

Расчеты экстремальных колебаний уровня моря и скоростей морских течений для морских нефтегазоносных площадей были выполнены в рамках предпроектных изысканий на морских месторождениях углеводородного сырья на северо-восточном шельфе о. Сахалин.

Оценки характеристик приливного дрейфа и матриц ветровых коэффициентов могут быть использованы с целью оперативного прогнозирования дрейфа заданного ледового объекта на определенный момент времени при ожидаемых скорости и направлении ветра в различных точках северо-восточного шельфа о. Сахалин.

**Положения, выносимые на защиту.** Обоснована принципиальная важность учета вдольбереговых вариаций прибрежного рельефа, изменчивости характеристик захваченных и излученных волн на шельфе, определяющих особенности динамических процессов на различных участках шельфа и оценки экстремальных колебаний уровня и скоростей течений.

Разработанный подход к оценке экстремальных колебаний уровня и скоростей течений, позволяющий учитывать вероятность наложения нескольких неблагоприятных факторов, принципиально важен для объектов повышенного риска, возможное повреждение которых может привести к тяжелым последствиям для экологических систем (АЭС, морские нефтяные промыслы и т. д.).

Обосновано и продемонстрировано на примере Охотского моря, что разработанный метод расчета параметров приливных волн на основе рядов альтиметрических данных открывает новые возможности для исследования пространственной изменчивости амплитуд и фаз приливных волн, а также мезомасштабных вихрей и сезонных вариаций циркуляции вод, в районах со сложным характером приливного режима (окраинные моря, области шельфа и материкового склона, проливы).

Метод модельного описания особенностей отклика дрейфа льда на шельфе и формирования прибрежных течений под воздействием ветра, адекватно отражающий существенные различия ветрового коэффициента и дрейфового угла в зависимости от направления ветра.

Обоснован для пунктов размещения регистраторов уровня сети Службы предупреждения о цунами трехэтапный метод изучения особенностей длинноволновой динамики, позволяющего наиболее эффективно использовать поступающую в реальном времени информацию о развитии волнового процесса.

**Достоверность полученных результатов.** Использованные в работе материалы натуральных наблюдений колебаний уровня моря (при дистанционных и контактных измерениях), скоростей морских течений и дрейфа



льда отличались надежностью и высоким качеством. Точность измерений, синхронная регистрация длинноволновых процессов в нескольких точках шельфа, большая длительность записей позволили получить надежные оценки. Достоверность полученных результатов анализа экспериментальных материалов подтверждается аналитическими расчетами и результатами численного моделирования, сопоставлением с другими опубликованными результатами.

**Структура работы.** Работа состоит из введения, шести основных глав, заключения и списка литературы, который включает 215 источников. Работа изложена на 277 страницах текста, содержит 98 рисунков и 14 таблиц.

**Апробация работы и научные публикации.** Результаты работы неоднократно докладывались на семинарах и заседаниях секции ученого совета ИМГиГ ДВО РАН (1983–2005 гг.); конференции по межведомственному проекту «Волна» (Севастополь, 1984, 1988); Всесоюзных совещаниях по цунами (Южно-Сахалинск, 1981; Новосибирск, 1982; Звенигород, 1983; Горький, 1984; Обнинск, 1985, 1988); совещании по природным катастрофам и стихийным бедствиям в Дальневосточном регионе (Южно-Сахалинск, 1990); международных симпозиумах по цунами (Новосибирск, 1989; Ханья, Греция, 1998, 2005; Москва, 2000, Петропавловск-Камчатский, 2004); Генеральных ассамблеях IUGG (Болдер, США, 1995; Бирмингем, Англия, 1999; Саппоро, Япония, 2005); международной конференции «Физические процессы на шельфе» (Светлогорск, 1996); международной конференции «Стихия, строительство, безопасность» (Владивосток, 1997); всероссийских научных конференциях «Физические проблемы экологии» (Москва, 1998–2000); международной конференции PACON (Москва, 1999); Всероссийском симпозиуме «Сейсмоакустика переходных зон» (Владивосток, 1999); международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических измерений» (Москва, 2000); международных совещаниях по Охотскому морю и проблеме льдов (Момбецу, Япония, 1996–2005); Международных конференциях PICES (Владивосток, 1995, 1999, 2005; Пусан, Корея, 1997; Немуро, Япония, 1998; Виктория, Канада, 2001; Хакодате, Япония, 2000; Циндао, Китай, 2002; Сеул, Корея, 2003; Гонолулу, США, 2004); международных конференциях ISOPE (Ставангер, Норвегия, 2001; Китаюсю, Япония, 2002; Тулон, Франция, 2004); международной конференции WESTPAC (Ханчжоу, Китай, 2004); международной конференции IANR (Санкт-Петербург, 2004).

Основные результаты представленных исследований опубликованы в 44 статьях, из них шесть лично, остальные – в соавторстве. Преимущественно коллективный характер исследований обусловлен их экспериментальной направленностью, получением и обработкой материалов инструментальных измерений – поэтому большая часть полученных результатов опубликована совместно с коллегами по работе. В большинстве работ научные идеи, анализ данных наблюдений и их физическая интерпретация с применением аналитических, эмпирических или численных моделей принадлежат автору.

**Содержание работы.** Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цели и задачи исследования, приведены основные результаты.

В первой главе приводятся основные уравнения, в рамках которых традиционно исследуются характеристики длинных волн на шельфе. Рассмотрены решения для нескольких известных моделей, используемых в дальнейшем для интерпретации результатов анализа материалов экспериментальных измерений.

1. Цилиндрический шельф с линейным наклоном дна. Эта модель достаточно хорошо отражает свойства волновых движений, масштаб которых мал по сравнению с шириной шельфа. Применялась при анализе структуры спектра на периодах менее 10 минут, а также при исследовании образования инфрагравитационных волн в результате трансформации ветрового волнения в прибрежной зоне.

2. Шельф постоянной глубины (шельф-ступенька). Эта модель позволяет проанализировать влияние ширины и глубины шельфа на особенности проявления волн цунами (шельфовый резонанс, образование захваченных волн), применялась при теоретических исследованиях различных механизмов генерации длинных волн.

3. Шельф с экспоненциальным профилем глубины. Эта модель достаточно хорошо описывает реальный рельеф в районе Южных и Северных Курильских островов, Юго-Западной Камчатки и северо-восточного побережья о. Сахалин. Она использовалась для расчета характеристик краевых и шельфовых волн и сравнения с результатами анализа данных натурных экспериментов, проводившихся в указанных районах.

**Вторая глава** посвящена исследованию влияния особенностей прибрежного рельефа на формирование волн цунами и оценки цунамиопасности прилегающих участков побережья – в первом параграфе дается общая характеристика данной проблемы, показана важность исследования шельфового резонанса, эффекта захвата океанским шельфом энергии цунами, учета собственных колебаний в заливах и бухтах.

Во втором параграфе производится оценка захватывающих свойств курило-камчатского шельфа в рамках лучевой теории. Для учета реальной топографии, близкой к цилиндрической, но имеющей некоторые отклонения от нее, производилась триангуляция исследуемого района. В каждой треугольной области глубина аппроксимировалась таким образом, чтобы функция  $\sqrt{h(x, y)}$  была линейной, в этом случае траектория луча имела особенно простой вид – дуга окружности.

Внутри каждого треугольника выбирался точечный изотропный источник. Лучи, пересекающие сразу или после отражения линию глубоководного желоба, считались ушедшими в открытый океан. Рассчитывался процент захваченных лучей. Полученное значение ставилось в соответствие данной точке. По характеристикам захвата Курило-Камчатский шельф делится на три части. Свойство захвата сильнее выражено в его южной и



северной части, слабее – в центральной. Наиболее сейсмоактивные зоны лежат в районах, где степень захвата колеблется в пределах от 0,3 до 0,7. Следовательно, эффект захвата энергии цунами, вызванных землетрясениями в пределах Курило-Камчатского материкового склона, не является малым. Показано также, что волны Шикотанского цунами (октябрь 1994 г.) в Северо-Курильске проявились прежде всего на частотах, отвечающих минимуму групповой скорости краевых волн.

В третьем параграфе исследуются особенности проявления шельфового резонанса. И. В. Файном [1984] было показано, что в районе Южных Курильских островов можно ожидать наибольшего усиления цунами (в шесть–семь раз) на периодах около 80 мин. Однако в спектрах исследовавшихся ранее цунами заметных колебаний с данными периодами не обнаруживалось. Это вполне объяснимо, поскольку данному периоду отвечает длина волны в открытом океане порядка 1000 км, а большинство источников цунами имеет существенно меньшие размеры. Для исследования данного эффекта были проанализированы мареограммы цунами, вызванного одним из сильнейших землетрясений в Тихом океане – Чилийским (май 1960 г.).

Вблизи источника, на станциях Чили, явно преобладали колебания с периодом 40–45 мин., и только на самой северной станции Арика проявились низкочастотные волны, игравшие заметную роль на побережье Эквадора, Калифорнии и островов в Тихом океане. Такое распределение энергии характерно для вытянутых вдоль берега очагов – низкочастотные волны распространяются в направлении его большей оси. Таким образом, низкочастотная составляющая в исходном сигнале присутствовала.

Чилийское цунами было зарегистрировано в Южно-Курильске и ряде станций тихоокеанского побережья Японии (рис. 1). На российской станции, а также в пунктах Ханасаки и особенно Хачинохе колебания с периодом около 80 мин. проявились очень мощно, причем на начальном отрезке записи, когда амплитуда достигала 3–5 м. Несколько южнее, в районе Мияко и Камаиси, основной пик в спектре смещен в сторону более высоких частот (период около 50 мин.), и амплитуда колебаний резко уменьшается. Это связано с тем, что в данном районе шельф более короткий и приглубый (аналогичный эффект наблюдается в районе Средних Курил). Далее на юг шельф несколько расширяется, и на станции Накаминато снова доминируют колебания с периодом 80 мин. Именно в тех районах, где в большей степени проявился шельфовый резонанс, наблюдались наибольшие разрушения, что указывает на важное значение учета особенностей топографии шельфа для оценки цунамиопасности побережья.

Низкочастотные волны цунами 1960 г. были зафиксированы и на побережье о. Сахалин (Корсаков, Катангли), и именно они были самыми высокими за всю историю наблюдений. Это указывает на более эффективное проникновение низкочастотных волн сквозь проливы Курильской гряды, и этот факт нужно учитывать при оценках риска цунами.

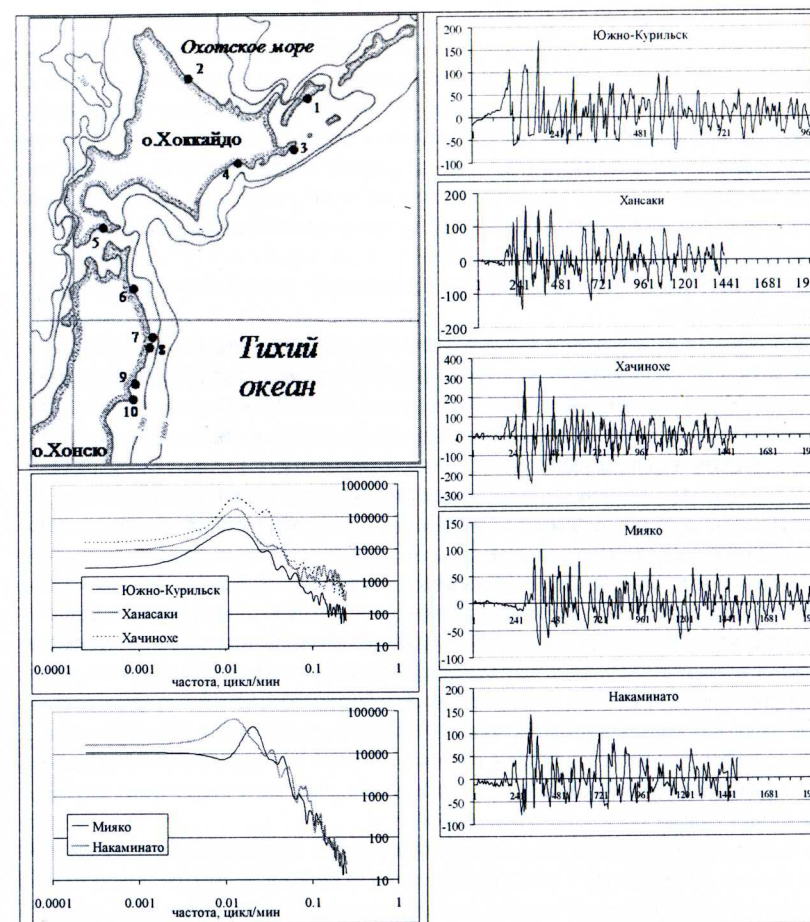


Рис. 1. Расположение уровневых постов на побережье России и Японии: Южно-Курильск (1), Ханасаки (3), Хачинохе (6), Мияко (7), Камаиси (8), Накаминато (9) и Чоши (10), записи Чилийского цунами (май 1960 г.) и их спектры (в см<sup>2</sup>/мин).

В четвертом параграфе рассматриваются вопросы влияния собственных колебаний в заливах и бухтах на характер проявления волн цунами. Рассматриваются два объекта – сравнительно небольшая Холмская бухта с относительно открытым входом и более обширная, с узкой горловиной, Авачинская Губа.

В порту г. Холмск осуществлялись пробные испытания системы по передаче данных о развитии волнового процесса в Службу предупреждения о волнах цунами в реальном времени по каналу электронной почты, в ходе



которых был разработан подход, примененный позднее к местам установки платформ сбора данных «Хандар» в Северо-Курильске и Усть-Камчатске. Он заключается в комплексном исследовании особенностей длинноволновых процессов в акватории, прилегающей к месту постановки прибора, и включает три основных этапа:

- 1) определение характеристик цунами, зарегистрированных в данном пункте в прошлом;
- 2) выявление характера зависимости спектра колебаний уровня от погодных условий;
- 3) численное моделирование распространения длинных волн в прилегающей акватории.

Были проанализированы записи пяти цунами – Камчатского (1952 г.), Чилийского (1960 г.), Ниигатского (1964 г.), Монеронского (1971 г.) и Аkitского (1983 г.). На спектрах всех цунами, исключая Чилийское, выделялся хорошо выраженный пик с периодом около 8 мин. Необходимо отметить, что колебания, вызванные удаленными тихоокеанскими цунами, проявляются существенно в более низкочастотной области спектра, чем япономорские.

Пик с периодом около 8 мин. присутствовал в спектрах колебаний уровня как в спокойную погоду, так и при прохождении циклонов, при этом энергия в штормовых ситуациях возрастала примерно на порядок. Численное моделирование распространения длинных волн в Холмской бухте показало, что данный период отвечает одноузловой продольной сейше водоема, пучности которой расположены вблизи входа и в ее удаленной части, где установлен мареограф. Одноузловая поперечная сейша имеет период около 2,5 мин., но она не проявляется в районе постановки регистратора и поэтому отсутствовала в записях цунами. Тем не менее, ее важно учитывать при оценке цунамиопасности отдельных участков акватории порта, где ее вклад может быть существенным.

Аналогичным образом были получены оценки цунамиопасности побережья бухты Авачинская Губа. Особенностью ее собственных колебаний является наличие нулевой моды с периодом около 4,8 ч., с которой могут быть связаны усиление штормовых нагонов и значительные течения в горловине бухты.

В пятом параграфе предложен метод детального цунамирайонирования побережья, основанный на сочетании численного моделирования и анализа сведений о характеристиках цунами, зарегистрированных на стационарном пункте наблюдений за уровнем моря. По имеющемуся ряду наблюдений за высотами волн цунами можно определить параметры функции распределения для опорной точки  $x_0$ . Для других пунктов на данном побережье  $x_j$  функцию повторяемости высот цунами будем представлять в виде:

$$F(h, x_j) = W_1(x_j)F_1(h, x_0) + \dots + W_n(x_j)F_n(h, x_0), \quad (1)$$

где  $W_m$  – передаточный коэффициент от опорной точки  $x_0$  к точкам  $x_j$ , описывающий вдольбереговую изменчивость высот цунами под влиянием изме-

нений рельефа дна и береговой черты, характерную для  $m$ -ой сейсмоактивной зоны. Передаточные коэффициенты в формуле (1) оценивались с использованием численного моделирования распространения волн цунами от различных очаговых зон с учетом реальной топографии исследуемого района. Основная идея метода связана с тем, что относительные высоты цунами определяются обычно существенно точнее, чем абсолютные, которые зависят от сложно определяемых параметров начального возмущения в очаге. Метод продемонстрирован на примере залива Анива и применялся также для всего побережья о. Сахалин и Южных Курил, района строительства АЭС в п. Синпхо (КНДР) и других ответственных объектов.

В третьей главе рассматриваются вопросы генерации длинных волн на шельфе атмосферными процессами. Основное внимание уделено диапазону периодов цунами в связи с важностью задачи его выделения на фоне естественного длинноволнового шума. Известно, что в данном диапазоне скорости атмосферных и океанских волн значительно отличаются, поэтому прямой (резонансный) механизм генерации маловероятен, что подтверждается низкой когерентностью между колебаниями уровня моря и микрофлуктуациями атмосферного давления по экспериментальным исследованиям на Южных Курильских островах и Юго-Западной Камчатке.

Один из непрямых механизмов передачи энергии атмосферных колебаний к океану связан с усилением на шельфе отраженных от берега вынужденных волн. Проанализирован случай нормального падения на шельф постоянной глубины  $h$  и ширины  $L$  волны вида  $e^{i\omega(x/U-t)}$ , где  $U = \omega/k$  – скорость вынужденной волны. Амплитуда волны, отраженной в открытый океан, имеет вид:

$$A = \frac{U/c}{1-U^2/c^2} \left\{ \left[ \cos \frac{\omega L}{c_1} + \left( \cos \frac{\omega L}{U} - \cos \frac{\omega L}{c_1} \right) \cdot \delta \right]^2 + \frac{h}{H} \left[ \left( \frac{U}{c_1} \sin \frac{\omega L}{c_1} - \frac{c}{c_1} \sin \frac{\omega L}{U} \right) \cdot \delta - \frac{U}{c} \sin \frac{\omega L}{c_1} \right]^2 \right\} / \left( \cos^2 \frac{\omega L}{c_1} + \frac{h}{H} \sin^2 \frac{\omega L}{c_1} \right)^{1/2} \quad (2)$$

где  $c^2 = gH$ ,  $c_1^2 = gh$ ,  $\delta = (1-U^2/c^2)/(1-U^2/c_1^2)$ .

Влияние топографии проявляется в том, что наблюдаются максимумы усиления на частотах, соответствующих четвертьволновому шельфовому резонансу.

Важность данного механизма подтверждается на примере эксперимента на юго-западном шельфе п-ова Камчатка, в котором, помимо двух датчиков придонного гидростатического давления, расположенных на разном удалении от берега (вибротрон – на 900 м и кварцевый – на 1700 м), использовался высокочувствительный микробарограф. Так, 28–30 сентября



1987 г. спектр колебаний атмосферного давления в диапазоне периодов от 5 мин. до 2 ч. возрос примерно на порядок. Аналогично увеличился уровень спектра длинных волн по измерениям на обеих станциях (сильнее на более мелководной), причем на частотах около 2 и 4 цикл/ч., близких к частотам шельфового резонанса, отмечено увеличение интенсивности отклика (рис. 2). Когерентность между атмосферным давлением и уровнем оставалась низкой, что указывает на непрямой механизм генерации, хорошо согласующийся с предложенной выше теоретической моделью.

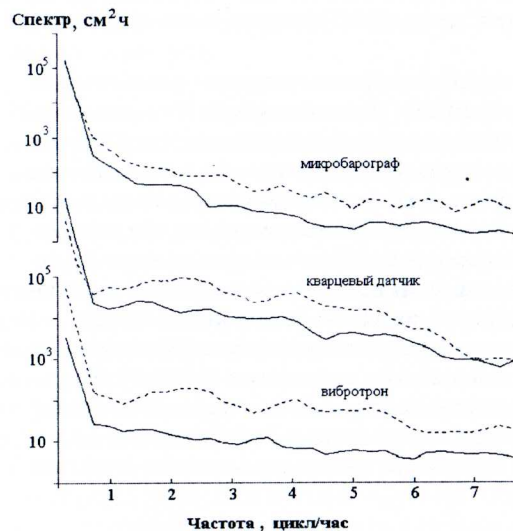


Рис. 2. Случай нарушения стационарности спектра длинных волн при увеличении интенсивности атмосферных колебаний в конце сентября 1987 г. (пунктирная линия)

Другой механизм генерации волн на шельфе связан с рассеянием вынужденной волны (например, метеоприлива) на неоднородностях линии берега. Коэффициент возбуждения захваченных краевых волн в рамках модели шельфа-ступеньки определяется в этом случае выражением:

$$a_j(\omega) = \frac{k_j(H+h)}{k_j^2 L(H+h) + \omega^2 / (g\lambda_{1j}^2)}, \quad (3)$$

где  $\lambda_1^2 = \frac{\omega^2}{gh} - k_j^2$ ,  $\lambda_2^2 = k_j^2 - \frac{\omega^2}{gH}$ , а  $k_j$  — соответствующий корень дисперсионного уравнения, причем положительный корень  $k_j > 0$  определяет краевую волну, фазовая скорость которой совпадает по направлению с движением циклона, а отрицательный корень  $k_j < 0$  определяет рассеяние «назад». Максимальный поток энергии в данную моду наблюдается на частотах, соответствующих максимумам в спектре неоднородностей, или на частотах, отвечающих минимуму групповой скорости (частота Эйри) кра-

вых волн. Причем на более мелководном и протяженном шельфе максимум эффективности на этих частотах выражен в большей степени. Очевидно, что и при иных нерезонансных воздействиях, связанных с атмосферными возмущениями (шквалы, грозы и т. д.) можно ожидать эффективной генерации краевых волн прежде всего на этих частотах.

Этот вывод подтверждается примерами аномальных колебаний, зарегистрированных одновременно на нескольких датчиках на шельфе Юго-Западной Камчатки, а также о. Шикотан. Запись, содержащая аномальные колебания, имеющие структуру, сходную с обычным цунами (резкое вступление, интенсивные вариации уровня в течение некоторого времени и затем достаточно быстрое затухание), представлена на рисунке 3. Отсутствие землетрясений в период наблюдений дает основание отнести их к флуктуациям, обусловленным воздействием атмосферных возмущений (метеоцунами).

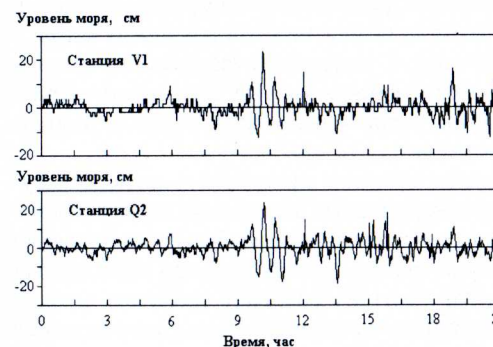


Рис. 3. Аномальные колебания типа метеоцунами на юго-западном шельфе п-ова Камчатка, зарегистрированные 9 октября 1987 г.

Структура спектра на обеих станциях имеет идентичный характер, что вместе с нулевым сдвигом фаз указывает на движущиеся вдоль берега краевые волны. Причем основные максимумы отмечены на периодах около 36 и 16 мин., что хорошо согласуется с оценками частот Эйри для первой и второй мод захваченных волн. В обычной ситуации спектры колебаний на станциях существенно различались, что связано с преобладанием стоячих колебаний, обусловленных излученными волнами.

На шельфе о. Шикотан метеоцунами также проявилось на периодах, отвечающих минимумам групповой скорости первых трех мод краевых волн (около 50, 25 и 12 мин.). Важное различие рассмотренных механизмов состоит в том, что в первом случае формируются преимущественно излученные, а во втором — захваченные волны.

Еще один механизм генерации длинных волн в высокочастотной части диапазона цунами связан с трансформацией ветровых волн в прибрежной зоне и образованием инфрагравитационных длинных волн. Для его исследования был проведен эксперимент у м. Острый на юго-восточном



побережье о. Сахалин. Два донных датчика придонного гидростатического давления устанавливались на различном расстоянии от берега (300 и 400 м в одном и 100 и 200 м в другом эксперименте). Для выделения групповой структуры волнения применялось преобразование Гильберта. В спектрах огибающих волнового процесса выделялось два максимума с периодами 50 и 200 с (рис. 4). Более низкочастотные волны распространялись в сторону берега и имели фазовую скорость около 7 м/с, что соответствует скорости длинных волн при глубине моря в районе постановки 5–6 м. Такие волны ответственны за явление так называемого волнового нагона, увеличивая высоту подъема уровня на подветренных участках побережья.

Периоду 50 с, напротив, отвечал нулевой сдвиг фаз, что указывает на формирование движущихся вдоль берега краевых волн (аналогичный сдвиг был характерен и для исходных рядов). В рамках модели с линейным профилем глубины получены оценки пространственной структуры колебаний, представляющие собой своеобразные ячейки, на границах между которыми формируются разрывные течения. С инфрагравитационными краевыми волнами традиционно связывают размывы берегов, формирование ритмических форм рельефа (фестоны, серповидные бары) и другие важные процессы прибрежной литодинамики.

В пятом параграфе рассмотрена генерация движущимся циклоном другого типа захваченных волн – субинерционных шельфовых волн градиентно-вихревой природы. Показано, что резонансное возбуждение этих волн на шельфе Сахалина и Курильской гряды маловероятно при характерных направлениях движения циклонов. Поэтому основное внимание уделено нерезонансному механизму, связанному с взаимодействием метеоприлива с береговой границей. Эффективность возбуждения исследовалась на модели с экспоненциальным профилем глубины, для каждой моды она характеризуется коэффициентом возбуждения:

$$b_j(\omega) = \frac{2(m_{1j}^2 + \beta_{1j}^2)\omega^2 m_{1j}^2}{\alpha f k (\beta_{1j} + L(m_{1j}^2 + \beta_{1j}^2)c_g^j)}, \quad \beta_{1j} = \alpha/2 + \kappa_{1j}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – показатель экспоненты,  $f$  – параметр Кориолиса,  $\beta_{1j} = \alpha/2 + \kappa_{1j}$ ,  $m_{1j}^2 = -\alpha f k / \omega - k^2 - \alpha^2/4$ ,  $\kappa_{1j} = (f^2/gH + k^2)^{1/2}$ ,  $c_g^j$  – групповая скорость. Аналогично краевым волнам, максимальные значения коэффициента возбуждения шельфовых волн отвечают частотам, на которых  $c_g^j$  обращается в ноль. Этот теоретический вывод подтверждается анализом колебаний уровня в Северо-Курильске – при прохождении глубоких циклонов в течение нескольких суток отмечались аномальные колебания на периодах, отвечающих нулевой групповой скорости первых трех захваченных мод.

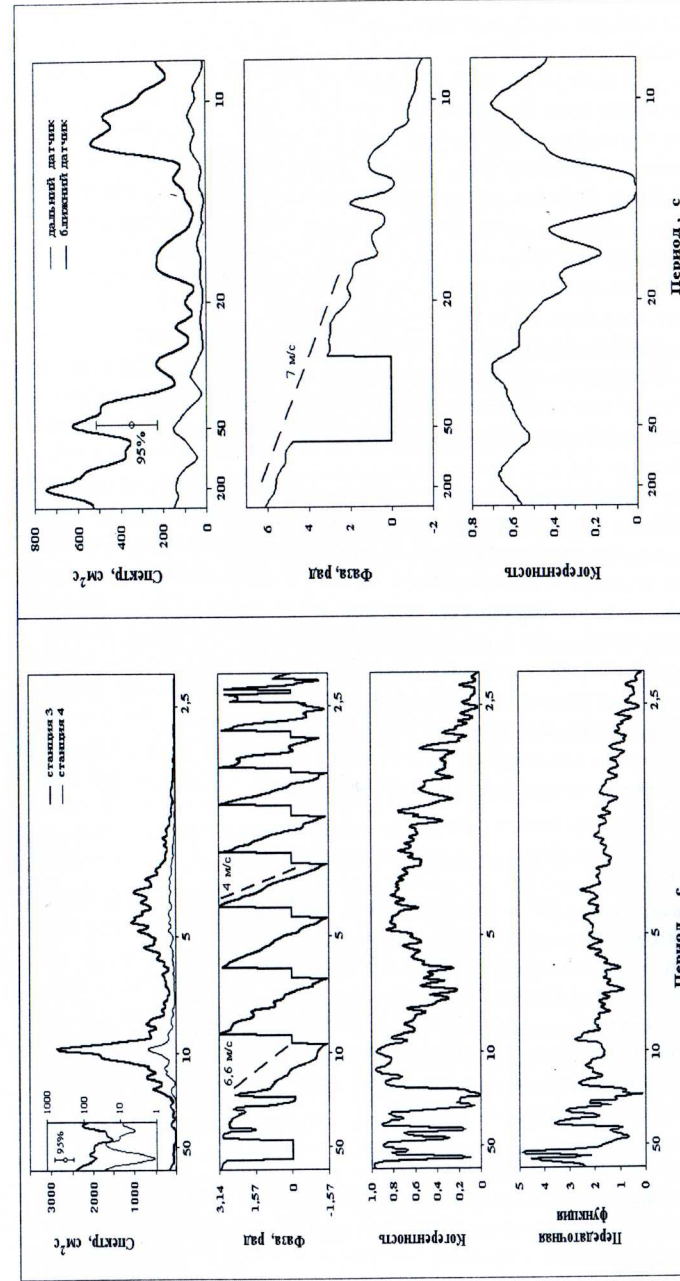


Рис. 4. Спектральные и взаимоспектральные характеристики ветрового волнения (слева) и его огибающей (справа) в районе м. Острый. Датчики – на расстоянии 100 и 200 м от берега



**Четвертая глава** посвящена исследованию пространственной изменчивости характера и величины приливов в районе морских месторождений нефти и газа на шельфе о. Сахалин. В первом параграфе приведены результаты анализа большого объема измерений, производившихся ДМИГЭ на береговых постах и морских станциях. Выявлен характер пространственной изменчивости гармонических постоянных суточных волн  $O_1$  и  $K_1$ , заключающийся в резком увеличении амплитуд на участке от м. Елизаветы до зал. Чайво и затем более плавном убывании в южном направлении; вариации фазы представляют ломаную линию. Такая картина обусловлена влиянием суточных шельфовых волн, что в большей степени проявляется в высоких скоростях приливных течений.

Амплитуда главной полусуточной волны  $M_2$  плавно убывает от северной оконечности острова в южном направлении, значительные изменения фазы, обусловленные наличием амфидромии у восточного берега о. Сахалин, проявляются южнее расположения основных нефтегазоносных площадей.

Во втором параграфе предложен оригинальный метод расчета гармонических постоянных приливных волн непосредственно на основе рядов спутниковых альтиметрических данных. Его необходимость связана с тем, что для областей шельфа – материкового склона и большинства окраинных морей приливные поправки, рекомендуемые моделью Global Ocean Tide, недостаточно точны, что ограничивает применение этого вида информации. Реализована модификация метода наименьших квадратов [Godin, 1972] для случая, когда данные регистрируются с низкой частотой или нерегулярно (имеются пропуски из-за влияния ледяного покрова).

Приливной уровень в некоторой точке моря в заданный момент времени  $t$  можно представить в виде комбинации набора из  $L$ -гармоник (приливных волн):

$$X(t) = S + \sum_j f_j(t) H_j \cos(\omega_j t - U_j(t) - g_j), \quad (5)$$

где  $S$  – средний уровень,  $f_j(t)$  – амплитудный множитель,  $U_j(t)$  – фазовая поправка, оба параметра для каждой волны определяются астрономическими условиями на момент проведения измерений,  $\omega_j$  – частота волны,  $H_j$  и  $g_j$  – гармонические постоянные амплитуды и фазы. Для каждого отсчета  $t_k$  можно заранее определить  $f_j(t_k)$  и  $U_j(t_k)$ . Пользуясь разложением косинуса по формуле разности углов и вводя  $A_j(k) = f_j(t_k) \cos(\omega_j t - U_j(t_k))$ ,  $B_j(k) = f_j(t_k) \sin(\omega_j t - U_j(t_k))$ , а также новые переменные, подлежащие определению  $Y_j = H_j \cos g_j$ ,  $Z_j = H_j \sin g_j$ , получаем:

$$X(t_k) = S + \sum_j A_j(k) Y_j + B_j(k) Z_j. \quad (6)$$

Алгоритм Холецкого применялся для обеспечения более высокой устойчивости при решении системы линейных уравнений, поскольку многие пары приливных волн имеют близкие частоты и система плохо обусловлена. Данный подход позволяет определять амплитуды и фазы 60 приливных

волн по ряду данных спутника Topex/Poseidon (TP) за 1993–2002 гг. при отсутствии пропусков. Здесь  $S$  – еще одна переменная, подлежащая определению. Это тоже существенный момент, так как вследствие нерегулярного характера измерений возможны искажения среднего уровня за счет приливов – для северной части Охотского моря они достигают 4 см.

Величина среднеквадратической амплитуды непериодических колебаний, изменявшаяся в различных точках от 4 до 16 см (что соответствует оценкам для сгонно-нагонных явлений по береговым станциям), подтверждает высокое качество оценки параметров приливных волн. Пространственное распределение амплитуд и фаз приливных волн хорошо согласуется с известными картами, построенными полуэмпирическими методами и на основе численного моделирования. В частности, для волны  $M_2$  получены все известные амфидромии, включая упомянутую выше у восточного побережья о. Сахалин, не выделяющуюся некоторыми численными моделями [Kowalik, Polyakov, 1998] (рис. 5).

Для суточных волн  $K_1$  и  $O_1$  выявлены характерные для амфидромии уменьшение амплитуд и значительные сдвиги фаз вдоль трека, пересекающего пролив Лаперуза. Значительные различия приливного уровня являются причиной аномально больших скоростей суточных течений в узкой части пролива (для каждой из волн амплитуда скорости составляет около 2 узлов).

**Пятая глава** посвящена анализу материалов наблюдений за дрейфом льда, полученных ДМИГЭ в результате наблюдений на трех береговых радиолокационных станциях (РЛС) – м. Левенштерна, Одопту и Комрво (рис. 6). Рядом с РЛС были установлены измерители скорости ветра, что позволило исследовать характер отклика дрейфа на воздействие ветра.

Дрейф льда является одной из важнейших характеристик, которые необходимо учитывать при безопасном проектировании объектов нефтегазового комплекса на северо-восточном шельфе о. Сахалин – ледяные поля могут иметь значительные размеры и массу, нередко движутся с большой скоростью и могут создавать большие нагрузки на буровые платформы и иные сооружения. Основными факторами, обуславливающими высокие скорости дрейфа, являются приливные течения и ветер. Скорости приливного дрейфа отличаются необычайно сильной пространственной изменчивостью – на северных станциях м. Левенштерна и Одопту они могут превышать 1 м/с, в то время как на РЛС Комрво они на порядок меньше. Высокие скорости суточных приливных течений обусловлены влиянием захваченных шельфовых волн [Рабинович, Жуков, 1984]. Для описания пространственной структуры суточных приливных течений были привлечены материалы инструментальных измерений течений в поверхностном слое, полученные на 32-х станциях в различных точках акватории. Это позволило построить карты распределения амплитуд и фаз основных приливных волн (см. рис. 6а–б).



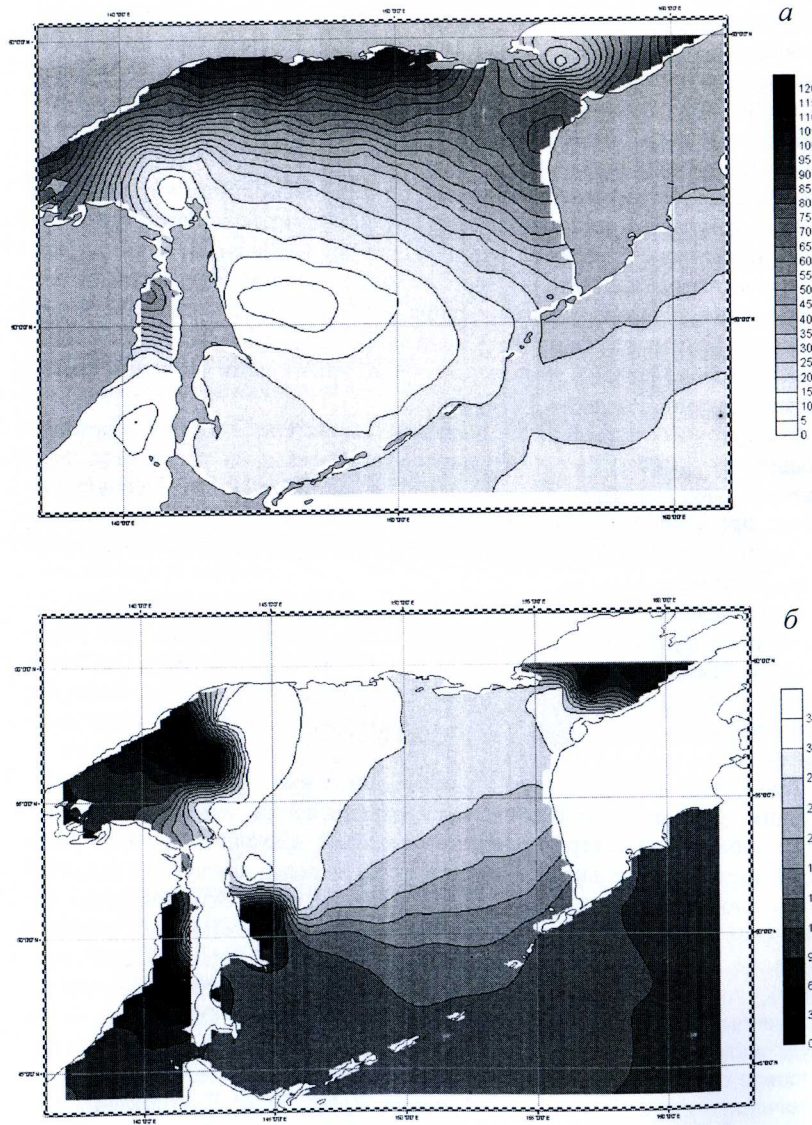


Рис. 5. Пространственное распределение амплитуд (а, см) и фаз (б, °) главной полусуточной волны  $M_2$  в Охотском море, рассчитанных по данным спутниковой альтиметрии

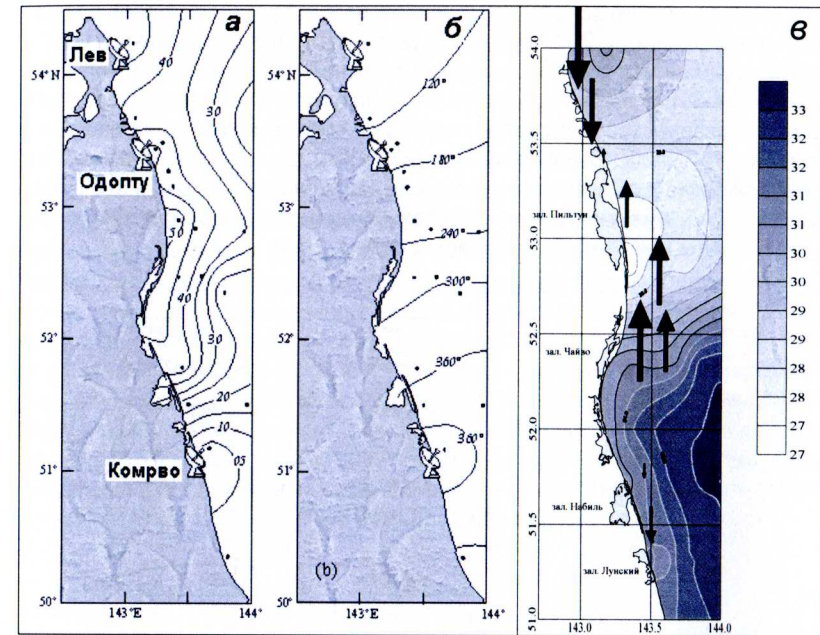


Рис. 6. Пространственное распределение гармонических постоянных меридиональной составляющей амплитуды скорости (а, см/с) и фазы (б, °) суточной волны  $K$ , на северо-восточном шельфе о. Сахалин по наблюдениям за дрейфом льда и морскими течениями. Распределение солёности по результатам океанологической съемки, выполненной в августе 1990 г. на одной фазе прилива (в, ‰)

Большие скорости течения наблюдаются в узкой прибрежной полосе от м. Елизаветы на севере острова до зал. Набиль. С увеличением глубины, а также на участке между зал. Набиль и Лунский, происходит их резкое уменьшение. Если убывание продольной составляющей по мере удаления от берега является известным свойством шельфовых волн, то такое изменение скорости в районе РЛС Комрво менее ясно. Чтобы определить его причину, были оцифрованы профили глубины по 15 поперечным разрезам (рис. 7), и по ним рассчитаны дисперсионные кривые шельфовых волн. Выявлено, что в северной части северо-восточного шельфа дисперсионные кривые первой моды шельфовых волн пересекают частоты суточных волн  $O_1$  и  $K_1$  (вблизи максимальной частоты, где групповая скорость обращается в ноль), а в южной, где шельф более приглубый и не имеет выраженной кромки, не достигают суточного диапазона.

Как видно из рисунка 6 б, на северном участке изменение фазы составляет около  $360^\circ$ , то есть укладывается практически ровно длина суточных шельфовых волн. Южнее условия их существования не выполняются, та-



ким образом, возникает эффект своеобразных стоячих колебаний, с узловой линией в районе РЛС Комрво. В результате дифракции крупномасштабных приливных волн на северной оконечности острова формируется шельфовая волна, представляющая собой пару квазистационарных вихрей, видимое распространение фазы связано со сменой знака в них во время приливного цикла. Выявленные особенности раскрывают физический смысл эффекта нулевой групповой скорости шельфовых волн – как отмечалось в §3.5, именно на этих частотах они генерируются при прохождении циклонов или иных атмосферных возмущений.

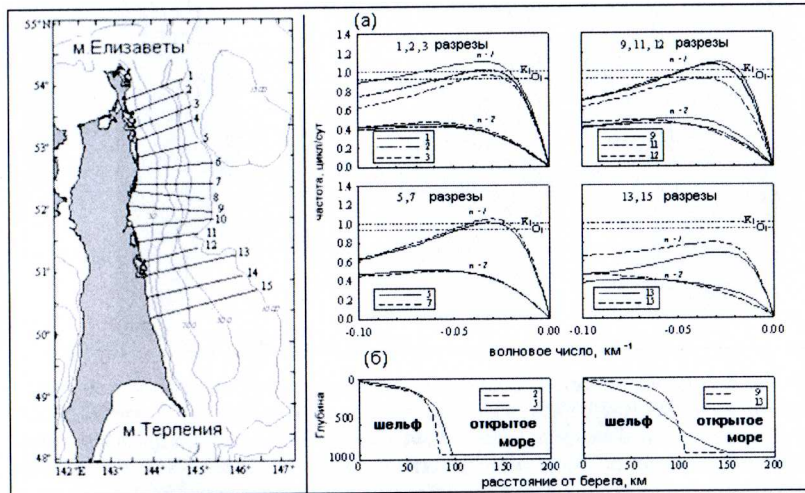


Рис. 7. Батиметрическая карта северо-восточного шельфа о. Сахалин. Показано положение 15 разрезов, для которых рассчитывались дисперсионные кривые шельфовых волн (а) по оцифрованным профилям глубины (б)

Необходимо отметить еще одну важную особенность – в точках на расстоянии половины длины волны (около 150 км) приливное течение ориентировано в противоположные стороны. В результате формируются локальные зоны дивергенции и конвергенции приливного происхождения, вызывающие явления приливного апвеллинга и даунвеллинга (см. рис. 6в), что проявилось по результатам океанологической съемки, выполненной в августе 1990 г. специализированно на одной фазе прилива (приливное течение показано стрелками).

В третьем параграфе рассматривается характер взаимосвязи между ветром и непериодической составляющей дрейфа льда. Известно, что в открытом океане характер отклика ледяного покрова на воздействие ветра хорошо описывается теорией Нансена–Экмана, однако в области шельфа из-за влияния береговой границы, он не может носить изотропный харак-

тер. Для изучения особенностей ветрового дрейфа в прибрежной зоне была применена регрессионная модель в матричной форме:

$$(u, v) = A(w_u, w_v) + (e_u, e_v), \quad A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где  $(u, v)$  – ряд измеренных векторов дрейфа, заданный набором значений проекций на параллель и на меридиан,  $(w_u, w_v)$  – соответственно синхронный ему ряд векторов ветра,  $(e_u, e_v)$  – остаточные вариации дрейфа, которые не описываются данной моделью. Ее применение дало очень хорошие результаты – доля объясненной дисперсии составляла 70–80%, матрицы, рассчитанные по данным разных лет, были близкими на каждой РЛС (но различались на разных станциях – таблица). Для физической интерпретации полученных результатов использовались эллипсы отклика, отвечающие ветру силой 1 м/с всех возможных направлений (рис. 8). Большая полуось характеризует максимальные значения скорости дрейфа, соответствующие направления ветра можно назвать «эффективными». Эти направления определяются через коэффициенты матрицы следующим выражением:

$$\varphi_m = \frac{1}{2} \arctg \left( \frac{2(a_{11}a_{12} + a_{21}a_{22})}{a_{21}^2 + a_{11}^2 - a_{22}^2 - a_{12}^2} \right) + (\pi), \quad (8)$$

«неэффективные» ортогональны им. Эллипсы отклика имеют приблизительно вдольбереговую ориентацию, максимальные значения ветровых коэффициентов для РЛС Одопту составляют около 4%, для Комрво – около 6% (при типичных величинах для открытого моря – 2–3%). Значения для неэффективных направлений для обеих станций были около 1%.

Таблица

Матрицы регрессии, их собственные числа ( $\lambda$ ) и доля объясненной дисперсии для вдольбереговой составляющей дрейфа (Р, %), рассчитанные по наблюдениям 1992 и 1993 гг. на РЛС Одопту и Комрво

Станция	Год	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{21}$	$a_{22}$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	Р
Одопту	1992	1,14	-0,36	-2,16	3,31	3,62	0,83	69
Одопту	1993	0,95	-0,15	-2,75	2,58	2,8	0,73	76
Комрво	1992	2,27	-0,67	-4,32	4,84	5,69	1,42	79
Комрво	1993	1,40	-0,64	-4,45	3,91	4,76	0,55	70



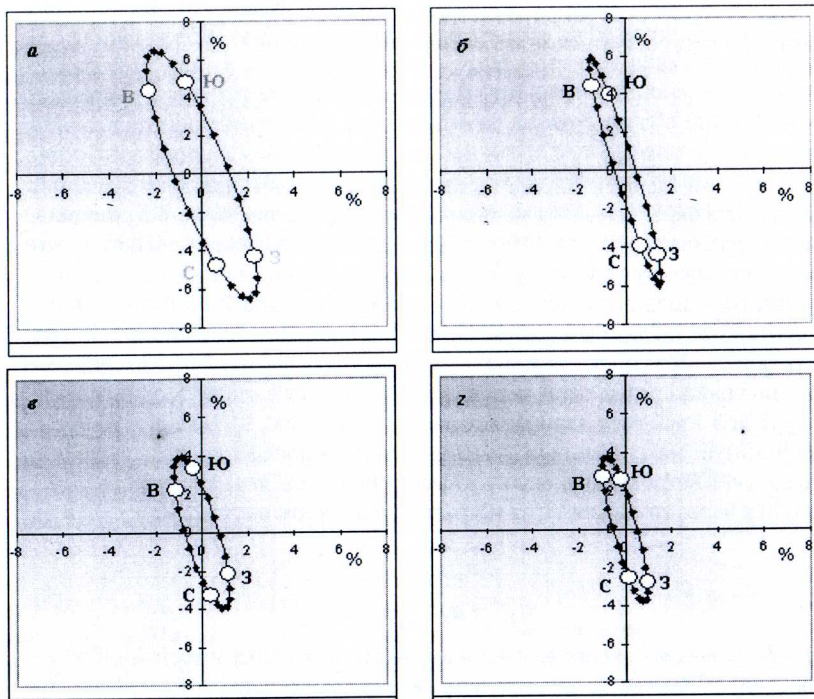


Рис. 8. Эллипсы ветрового отклика, рассчитанные для РЛС Комрво (а – 1992 г., б – 1993 г.) и Одопту (в – 1992 г., г – 1993 г.). Кружками отмечено положение конца вектора скорости дрейфа, соответствующего северному, южному, восточному и западному ветрам

Для выяснения физической природы такого существенного различия максимальных значений отклика применялось численное моделирование дрейфовых течений. Выяснилось, что особенностью прибрежного рельефа (более приглубый шельф с невыраженной кромкой), которые явились причиной резкого уменьшения приливных течений в районе РЛС Комрво, в то же время способствуют более эффективному отклику на воздействие ветра. Таким образом, даже незначительные вариации прибрежного рельефа вызывают существенные изменения характеристик длинноволновых процессов на шельфе и, соответственно, сказываются на расчетных величинах экстремального воздействия на объекты нефтегазового комплекса.

Еще одно существенное отличие ветрового дрейфа на шельфе, по сравнению с открытым океаном, связано со значительными вариациями дрейфового угла. Рассчитанные матрицы имеют собственные числа (см. табл.), следовательно, существуют направления, для которых направление ветра и дрейфа льда совпадают. Эти направления делают возможные направ-

ления ветра на четыре сектора, для двух из них дрейфовый угол имеет отклонение по часовой стрелке, как и в открытом море. Для других секторов отклонение дрейфа от направления ветра происходит против часовой стрелки.

Изменения концентрации льда оказывают существенное влияние на характеристики приливного и ветрового дрейфа. При ее увеличении эллипсы (как приливные, так и ветрового отклика) сжимаются и движения льда становятся почти реверсивными, при уменьшении, в особенности при разрушении ледяного покрова в мае, эллипсы менее сжатые.

Рассчитанные гармонические постоянные приливного дрейфа и матрицы ветровых коэффициентов позволяют прогнозировать движение ледовых объектов в оперативном режиме, а также оценивать экстремальные ледовые нагрузки на буровые платформы и иные конструкции в районе нефтепромысла.

**Шестая глава** посвящена расчету экстремальных колебаний уровня моря и скоростей течений методом композиции распределений. В первом параграфе на основе многолетних рядов колебаний уровня моря для различных станций рассчитаны статистические характеристики сгонно-нагонных явлений, изучен характер их сезонной неравномерности (минимум интенсивности летом и увеличение в осенне-зимний период) и возможные высоты штормовых нагонов и сгонов редкой повторяемости. Для характеристики частоты штормовых нагонов с различными пороговыми значениями предложена вероятностная модель с распределением Пуассона. Показано, что для большинства станций наблюдается хорошее согласие между эмпирическим и теоретическим распределениями по критерию  $\chi^2$ , начиная с порога 40 см (для некоторых – с 50 см).

Во втором параграфе предложен метод построения карт интенсивности штормовых нагонов редкой повторяемости, аналогичный расчету цунамиопасности побережья (§2.5), основанный на определении передаточных коэффициентов от опорной станции к различным пунктам на побережье. Построены соответствующие карты для побережья о. Сахалин.

Во втором разделе рассматриваются различные аспекты метода композиции распределений, в частности его модификация для определения экстремальных колебаний уровня для пунктов, где имеются только короткие ряды наблюдений. Для определения гармонических постоянных прилива и расчета распределения приливных колебаний путем предвычисления достаточно месячной серии. Непериодические колебания в заданной точке сравниваются с пунктом стационарных наблюдений, для северо-восточного шельфа это мареограф в зал. Набилъ. В отличие от приливной компоненты, для которой характерна значительная пространственная изменчивость, непериодические вариации практически идентичны во всем районе. Это позволило получить оценки экстремальных колебаний для различных морских месторождений нефти и газа с использованием многолетнего ряда.



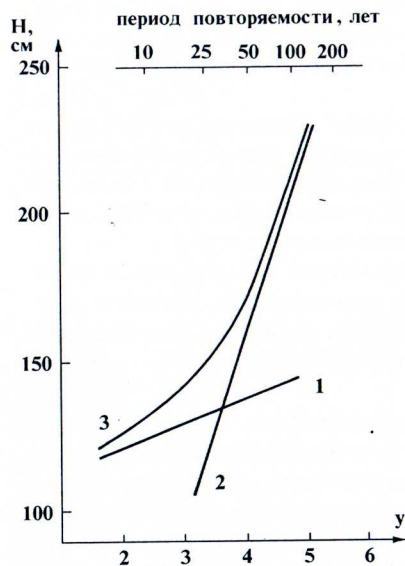


Рис. 9. Распределение суммарных уровней по схеме нагон+прилив (1), распределение высот волн цунами (2), а также общая оценка риска наводнений в порту г. Корсаков с учетом трех составляющих (3);  $y$  – приведенная переменная

зон, составляющий для Корсакова 10–100 лет, в котором учет всех составляющих существенен. Подобные оценки важны в тех случаях, когда высоты цунами сопоставимы с другими видами вариаций уровня и когда риск негативного воздействия на экосистему акватории в случае повреждения объекта достаточно велик (атомные электростанции, буровые установки, морские нефтепроводы и т. д.).

Проанализированы сезонные вариации уровня, отличительной чертой которых на шельфе о. Сахалин и других береговых станций Охотского моря является наличие хорошо выраженного максимума в зимнее время. В большинстве районов океана повышение уровня связано с уменьшением плотности в результате прогрева вод, и максимум наблюдается в теплый период года. Для выяснения пространственной структуры сезонных колебаний были проанализированы очищенные от приливов ряды ТР-альтиметрических данных (1993–2002 гг.), которые усреднялись помесечно. Рассчитанные аномалии уровня поверхности для различных сезонов года представлены на рисунке 10, сезонная изменчивость поверхностной циркуляции рассчитывалась в геострофическом приближении.

Для порта г. Корсаков проанализированы две ситуации – умеренного нагона 22 сентября 1986 г., пришедшегося на полную воду прилива, и аномального нагона 10–11 ноября 1990 г., попавшего на момент смены отлива на прилив. Показана принципиальная важность учета вероятности наложения сильного нагона на полную воду прилива. Также рассмотрены особенности расчета экстремальных высот уровня с учетом вероятности наложения цунами на приливоотливные и сгонно-нагонные колебания (рис. 9). При небольших периодах повторяемости цунами, как достаточно редкое событие, не оказывает существенного влияния на суммарную оценку. Для больших периодов повторяемости ситуация противоположная, и уже приливные и метеорологические вариации уровня дают сравнительно небольшую поправку к расчетным значениям высоты волн цунами. Существует при этом диапазон,

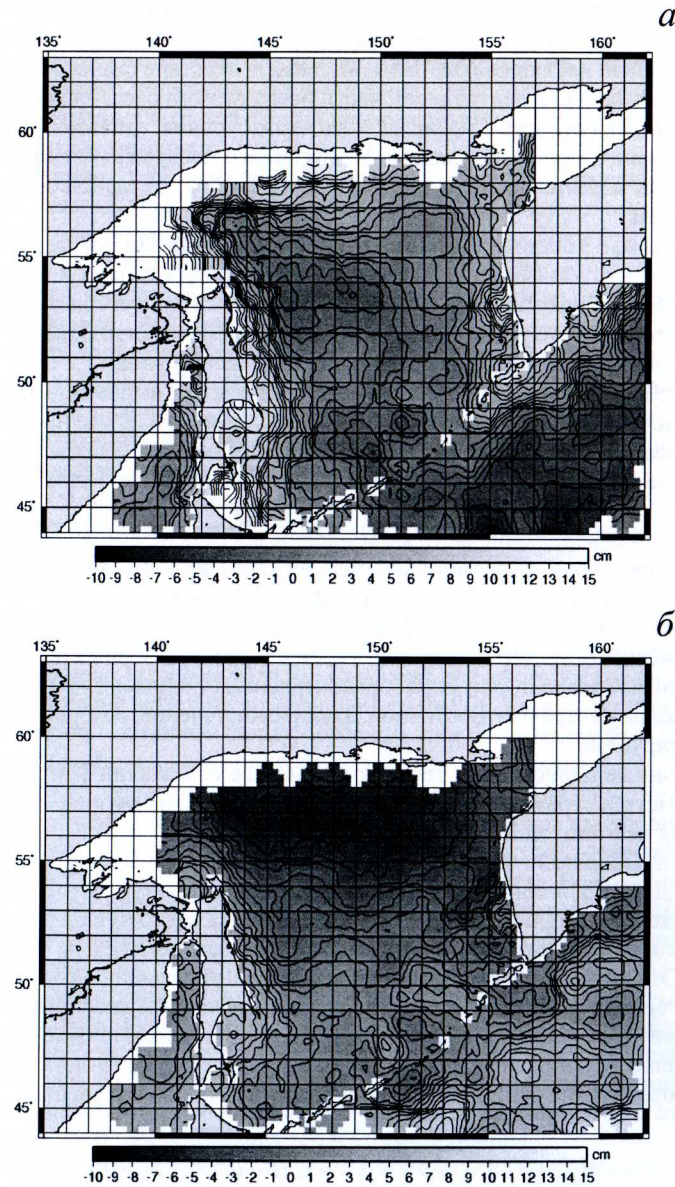


Рис. 10. Пространственное распределение аномалии уровня поверхности Охотского моря зимой (а – январь) и осенью (б – ноябрь)



Наиболее интересные распределения уровня на акватории Охотского моря отмечены в зимний период (см. рис. 10а). Так, в декабре (это самый обеспеченный наблюдениями зимний месяц вследствие слабого развития ледяного покрова) в центральной части исследуемого бассейна формируется обширная область с низкими значениями уровня, означающая мощную циклоническую циркуляцию. У восточного побережья Сахалина наблюдаются значительные градиенты, в особенности у северной оконечности острова.

На шельфе Западной Камчатки наклоны уровня также достаточно выраженные, что указывает на высокую интенсивность потока в северном направлении. Значительные градиенты отмечены и на северном шельфе Охотского моря, что указывает на зимнюю интенсификацию Северо-Охотского течения. В январе наблюдается аналогичная картина.

В апреле уровень моря повсеместно понижается, выраженный минимум отмечен и на большинстве мареографных станций. В мае начинается некоторое повышение уровня моря у северных берегов Охотского моря, связанное с началом действия преобладающих в теплый период ветров южных румбов.

Летом в центральной части моря наблюдаются положительные аномалии, что указывает на антициклонический характер циркуляции, хотя величина наблюдаемых градиентов слишком незначительна.

Осенью (см. рис. 10б) в северной части моря формируется область низких значений, обусловленная устойчивыми ветрами северных румбов. На основной части акватории моря горизонтальные течения незначительны — исключение составляет Восточно-Сахалинское течение, которое заметно активизируется.

Сезонные перестройки течения на шельфе о. Сахалин учитывались при расчете экстремальных скоростей течений редкой повторяемости. На морских нефтегазоносных площадях для навигационного сезона накоплен очень большой объем материалов инструментальных измерений течений (ДМИГЭ) — общая продолжительность для Пильтун-Астохского месторождения составила около 12 тыс. часов для каждого из слоев (поверхностного, промежуточного и придонного), для осеннего сезона — 7,5 тыс. часов. Это позволяет с высокой точностью оценить функцию распределения непериодических течений  $P_m(u, \varphi)$ , где  $u$  — величина скорости,  $\varphi$  — направление. Аналогичное распределение для приливных течений  $P_l(u, \varphi)$  получается на основе предвычислений, выполненных на 19-летний период. Распределение суммарных течений рассчитывается как свертка:

$$P_s(v, \theta) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{U\varphi} P_l(v-u, \theta-\varphi) P_m(u, \varphi) du, \quad (9)$$

где интегрирование производится по всем направлениям и допустимым значениям величины скорости.

Данным методом для морских месторождений углеводородного сырья получены важные оценки, которые позволяют не только рассчитывать возможные нагрузки на объекты нефтегазового комплекса, но и прогнозировать распространение загрязнений, в том числе оценивать максимальную дальность их проникновения за определенный период времени в зависимости от сезона.

#### Основные результаты работы.

1. Показано, что в северной части северо-восточного шельфа о. Сахалин (на участке от м. Елизаветы до зал. Лунский) дисперсионные кривые шельфовых волн пересекают линии частот суточных волн  $K_1$  и  $O_1$ . Напротив, к югу от данного залива шельф более приглубый и не имеет выраженной кромки, максимальные частоты шельфовых волн не достигают суточного диапазона. Это означает, что суточные шельфовые волны могут существовать только в северной части, где вызывают скорости приливных течений более 1 м/с. Они образуют стоячие колебания из двух ячеек противоположных знаков, с узловой линией южнее зал. Лунский. Такая картина связана с близостью суточного диапазона к частоте нулевой групповой скорости первой моды в данном районе.

2. Обосновано применение матричной регрессионной модели для объяснения физических особенностей формирования ветровых течений и дрейфа льда на шельфе в зависимости от расстояния от берега. Показан неизотропный характер отклика при различных направлениях ветра (наличие «эффективных» и «неэффективных» направлений, отвечающих максимальному и минимальному отклику, собственных векторов, возможность противоположных отклонений дрейфового угла). Выявлено значительное различие (в 1,5 раза) увеличение ветровых коэффициентов на РЛС Комрво по сравнению с более северной станцией Одопту, обусловленное более приглубым шельфом с менее выраженной кромкой (совместно с Е. А. Тихончук).

3. Разработан оригинальный метод определения гармонических постоянных приливных волн на основе альтиметрических рядов уровня в точках подспутниковых треков, учитывающий большую продолжительность, низкую частоту измерений и их нерегулярный характер. Высокая точность оценок позволила исследовать особенности пространственной структуры приливов в Охотском море, включая положение амфидромий (совместно с А. А. Романовым).

4. На основе данных альтиметра спутника Topex/Poseidon (1993–2002 гг.) дана характеристика сезонной изменчивости уровня в Охотском море, главной особенностью которой является наличие в зимний период отрицательной аномалии в его центральной части и высоких значений уровня по периферии, а также значительная интенсификация циклонической циркуляции (совместно с А. А. Романовым и О. С. Седаевой).

5. На примере Чилийского цунами (май 1960 г.) показана определяющая роль шельфового резонанса с периодом около 80 минут в формировании значительных высот волн на побережье Южных Курильских островов и Японии. При этом на небольшом участке в районе г. Мияко и Камаиси



наблюдается резкое снижение интенсивности цунами, обусловленное уменьшением резонансного периода и коэффициента усиления (провал частотной характеристики) в результате сокращения ширины шельфа (совместно с Т. Н. Ивельской).

6. Разработана методика расчета высот цунами и штормовых нагонов редкой повторяемости, основанная на расчете методом численного моделирования передаточных коэффициентов от стационарного пункта наблюдений к различным точкам побережья. Преимущество методики связано с большей точностью определения относительных высот по сравнению с абсолютными за счет уменьшения влияния сложно определяемых параметров начального возмущения в очаге цунами (скорости ветра над открытым морем).

7. По результатам синхронных измерений длинных волн на юго-западном шельфе Камчатки и микрофлуктуаций атмосферного давления выявлено, что при существенном повышении спектра колебаний давления в диапазоне периодов цунами возрастает и уровень спектра длинных волн (при низкой когерентности), что указывает на нерезонансный механизм передачи энергии от атмосферы к океану. Предложено теоретическое объяснение данного явления, связанное с усилением на шельфе отраженных от берега вынужденных волн.

8. На основе опыта работы с регистраторами уровня Службы предупреждения о цунами для максимально эффективного использования информации о развитии волнового процесса разработан подход, направленный на изучение физических особенностей длинноволновых процессов в районе измерений, включающий три основных этапа:

а) расчет характеристик волн цунами, наблюдавшихся в данном пункте в прошлом;

б) численное моделирование распространения длинных волн в защищаемом районе;

в) определение вариаций спектральных характеристик измеряемых колебаний при различных погодных условиях для надежного выделения цунами на фоне шума (совместно с Т. Н. Ивельской).

#### Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. Файн И. В., Шевченко Г. В., Куликов Е. А. Исследование лучевым методом эффекта захвата волн цунами Курильским шельфом // *Океанология*. – 1983. – Т. 23, вып. 1. – С. 23–26.

2. Куликов Е. А., Шевченко Г. В. Генерация длинных волн флуктуациями атмосферного давления в полуограниченном океане // *Нестационарные длинноволновые процессы на шельфе Курил. о-вов.* – Владивосток, 1984. – С. 15–18.

3. Куликов Е. А., Шевченко Г. В. Возбуждение краевых волн при взаимодействии движущего метеоприлива со статистически неоднородной береговой границей // *Теор. и эксперимент. исслед. длинноволновых процессов.* – Владивосток, 1985. – С. 20–27.

4. Шевченко Г. В., Файн А. В., Рабинович А. Б., Мансуров Р. Н. Оценка экстремальных колебаний уровня моря в районе устья реки Тымь // *Природ. катастрофы и стихийные бедствия в Дальневост. регионе.* – Владивосток, 1990. – Т. 1. – С. 253–276.

5. Куликов Е. А., Шевченко Г. В. Резонансное возбуждение шельфовых волн движущимся циклоном // *Мор. гидрофиз. журн.* – 1991. – № 5. – С. 8–16.

6. Путов В. Ф., Шевченко Г. В. Пространственно-временная изменчивость колебаний уровня моря и расчет экстремальных высот редкой повторяемости на северо-восточном шельфе острова Сахалин // *Метеорология и гидрология.* – 1991. – № 10. – С. 94–101.

7. Kovalev P. D., Rabinovich A. B., Shevchenko G. V. Investigation of long waves in the Tsunami frequency band on the southwestern shelf of Kamchatka // *Natural Hazards.* – 1991. – Vol. 4. No. 263. – P. 141–159.

8. Rabinovich A. B., Shevchenko G. V., Sokolova S. E. An estimation of extreme sea levels in the northern part of the Sea of Japan // *La mer.* – 1992. – Vol. 30. – P. 179–189.

9. Храмушин В. Н., Шевченко Г. В. Метод детального цунамирайонирования на примере побережья Анивского залива // *Океанология.* – 1994. – Т. 34. № 2. – С. 218–223.

10. Шевченко Г. В. О квазипериодической сезонной изменчивости гармонических постоянных приливов в северо-западной части Охотского моря // *Метеорология и гидрология.* – 1996. – № 8. – С. 90–99.

11. Шевченко Г. В. Вероятностные оценки риска морских наводнений в порту Корсакова // *Цунами и сопутствующие явления.* – Ю-Сах., 1997. – С. 91–105.

12. Шевченко Г. В. Штормовые нагоны на Курильских островах // *Цунами и сопутствующие явления.* – Ю-Сах., 1997. – С. 106–116.

13. Шевченко Г. В. Статистические характеристики штормовых нагонов в южной части о. Сахалин // *Изв. РГО.* – 1997. – Т. 129, № 3. – С. 94–107.

14. Поезжалова О. С., Шевченко Г. В. Вариации среднего уровня Охотского моря // *Цунами и сопутствующие явления.* – Ю-Сах., 1997. – С. 131–144.

15. Шевченко Г. В. Об усилении низкочастотной компоненты цунами на шельфе Курильской гряды // *Проявления конкретных цунами. Цунами 1993 и 1994 годов на побережье России.* – Ю-Сах., 1997. – С. 145–154.

16. Ивельская Т. Н., Шевченко Г. В. Спектральный анализ записей Шикотанского цунами 5 октября 1994 года // *Проявления конкретных цунами. Цунами 1993 и 1994 гг. на побережье России.* – Ю-Сах., 1997. – С. 105–118.

17. Попудричко К. К., Путов В. Ф., Шевченко Г. В. Оценка характеристик морских течений на Пильгун-Астохской нефтегазоносной площади (северо-восточный шельф о. Сахалин) // *Метеорология и гидрология.* – 1998. – № 4. – С. 82–97.

18. Путов В. Ф., Шевченко Г. В. Особенности приливного режима на северо-восточном шельфе о. Сахалин // *Гидромет. процессы на шельфе: оценка воздействия на мор. среду.* – Владивосток, 1998. – С. 61–82



19. Кочергин И. Е., Рыбалко С. И., Путов В. Ф., Шевченко Г. В. Некоторые результаты обработки инструментальных наблюдений за течениями на Пильтун-Астохской и Аркутун-Дагинской площадях северо-восточного шельфа Сахалина // Гидромет. и экол. условия дальневост. морей: оценка воздействия на мор. среду. – Владивосток : Дальнаука, 1999. – С. 96–113.
20. Тамбовский В. С., Шевченко Г. В. Характеристика скорости дрейфа льда у северо-восточного побережья о. Сахалин под влиянием приливов и ветра // Гидромет. и экол. условия дальневост. морей: оценка воздействия на мор. среду. – Владивосток : Дальнаука, 1999. – С. 114–137.
21. Shevchenko G. V., Putov V. F. On wind and tide induced sea-ice drift on the northeastern shelf of Sakhalin Island (analysis of radar data) // Proceedings of the Second PICES Workshop on the Okhotsk Sea and Adjacent Areas. – Sidney, B.C., Canada, 1999. – P. 11–17.
22. Литвин Е. Н., Показеев К. В., Тупоршин В. Н., Шевченко Г. В. Метеоцунами на шельфе острова Шикотан // Мор. гидрофиз. журн. – 2000. – № 1. – С. 38–49.
23. Ивельская Т. Н., Храмушин В. Н., Шевченко Г. В. Мониторинг морских опасных явлений в порту города Холмск // Динамические процессы на шельфе Сах. и Курил. о-вов. – Ю-Сах. : ИМГиГ ДВО РАН, 2001. – С. 146–159.
24. Като Э., Миськов О. А., Шевченко Г. В. Штормовые нагоны на побережье острова Сахалин в конце XX века // Динамические процессы на шельфе Сах. и Курил. о-вов. – Ю-Сах. : ИМГиГ ДВО РАН, 2001. – С. 160–176.
25. Тамбовский В. С., Путов В. Ф., Шевченко Г. В., Тихончук Е. А. Морфометрия и динамика льдов на акватории северо-восточного шельфа о. Сахалин // Охрана природы, мониторинг и обустройство сах. шельфа. – Ю-Сах. : Сах. книж. изд-во, 2001. – С. 123–142.
26. Ковалев П. Д., Шевченко Г. В., Ковалев Д. П. Исследование длинноволновых процессов в северо-западной части Охотского моря в диапазоне периодов цунами // Вестн. МАНЭБ. СПб – Ю-Сах., 2001. – № 11. – С. 64–68.
27. Путов В. Ф., Тамбовский В. С., Шевченко Г. В. Характеристика дрейфа льда у северо-восточного побережья о-ва Сахалин под влиянием приливов // Тр. ААНИИ. – СПб. : Гидрометеиздат, 2001. – Т. 443. – С. 124–137.
28. Дущенко П. В., Ивельская Т. Н., Шевченко Г. В. Опыт использования телеметрических регистраторов уровня моря в службе предупреждения о волнах цунами // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2003. – № 2. – С. 95–107.
29. Королев Ю. П., Шевченко Г. В. Особенности распространения волн цунами в районе Петропавловска-Камчатского // Вулканология и сейсмология. – 2003. – № 6. – С. 62–70.
30. Кайстренко В. М., Като Э., Кочергин И. Е., Шевченко Г. В. Нагоны, цунами, волнение // Атлас берегов Сахалина. – Владивосток : Дальпресс, 2002. – С. 16–17.
31. Шевченко Г. В., Романов А. А. Определение характеристик прилива в Охотском море по данным спутниковой альтиметрии // Исследование Земли из космоса. – 2004. – № 1. – С. 49–62.

32. Като Э., Любицкий Ю. В., Шевченко Г. В. Расчет экстремальных значений стонно-нагонных колебаний уровня моря на юго-восточном побережье о. Сахалин // Колебания уровня в морях. – СПб. : Гидрометеиздат, 2003. – С. 111–128.
33. Шевченко Г. В., Рыбалко С. И. Применение метода композиции распределений к расчету экстремальных скоростей течений (на примере северо-восточного шельфа о.Сахалин) // Гидрометеорология и экология Дальнего Востока. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – С. 34–48.
34. Като Э., Любицкий Ю. В., Шевченко Г. В. Расчет высот штормовых нагонов редкой повторяемости для побережья залива Анива // Гидрометеорология и экология Дальнего Востока. – Владивосток : Дальнаука, 2003. – С. 49–57.
35. Rybalko S. I., Shevchenko G. V. Seasonal and spatial variability of sea currents on the Sakhalin northeastern shelf // J. Pacific Oceanography. – 2003. – Vol. 1, No. 2. – P. 168–178.
36. Tikhonchuk E., Shevchenko G. Features of the ice drift response to the wind Influence on the Northeastern Shelf of Sakhalin // Proceedings of the 17th International Symposium on Ice. – Saint-Petersburg, 2004. – Vol. 2. – P. 154–162.
37. Шевченко Г. В. Расчет экстремальных скоростей течений методом композиции распределений (на примере Пильтун-Астохского месторождения нефти северо-восточного шельфа о.Сахалин) // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 1. – С. 53–73.
38. Романов А. А., Седаева О. С., Шевченко Г. В. Сезонные колебания уровня Охотского моря по данным береговых мареографных станций и спутниковой альтиметрии // Исслед. Земли из космоса. – 2004. – № 6. – С. 59–72.
39. Шевченко Г. В., Кантаков Г. А. Мониторинг состояния вод при разведочном бурении на Пильтун-Астохской площади в августе–сентябре 2000 г. // Вод. ресурсы. – 2004. – Т. 31. – № 2. – С. 247–256.
40. Шевченко Г. В., Частиков В. Н. Динамические процессы в заливе Анива (о. Сахалин) по результатам инструментальных измерений осенью 2000 г. // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 5. – С. 63–75.
41. Romanov A. A., Sedaeva O. S., Shevchenko G. V. Seasonal and tidal variations of the sea level between Hokkaido and Sakhalin Islands based on satellite altimetry and coastal tide gauge data // Pacific Oceanography. – 2004. Vol. 2, No. 1–2, pp. 117–125.
42. Shevchenko G., Rabinovich A., Thomson R. Sea-ice drift on the northeastern shelf of Sakhalin Island // Journal of Physical Oceanography. – 2004. – Vol. 34, No. 11. – P. 2470–2491.
43. Шевченко Г. В., Кантаков Г. А., Частиков В. Н. Анализ данных инструментальных измерений течений в проливе Лаперуза // Изв. ТИПРО. – 2005. – Т. 140. – С. 203–227.
44. Ивельская Т. Н., Шевченко Г. В. Усиление низкочастотной составляющей Чилийского цунами (май 1960 г.) в северо-западной части Тихого океана // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 2. – С. 69–81.



### Цитируемая литература

1. Ефимов В. В., Куликов Е. А., Рабинович А. Б., Файн И. В. Волны в пограничных областях океана. – Л. : Гидрометеоздат. 1985. – 280 с.
2. Герман В. Х., Левиков С. П. Вероятностный анализ и моделирование колебаний уровня моря. – Л. : Гидрометеоздат. 1988. – 231 с.
3. Куликов Е. А. Изучение цунами: измерение, анализ, моделирование : Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – М. : ИО РАН. 2005. – 36 с.
4. Левин Б. В., Носов М. А. Физика цунами. – М. : Янус-К. 2005. – 360 с.
5. Некрасов А. В. Приливные волны в окраинных морях. – Л. : Гидрометеоздат, 1975. – 247 с.
6. Некрасов А. В. Энергетика океанских приливов. – Л. : Гидрометеоздат, 1990. – 288 с.
7. Пелиновский Е. Н. Нелинейная динамика волн цунами. – Горький : ИПФ АН СССР, 1982. – 226 с.
8. Рабинович А. Б., Жуков А. Б. Приливные колебания на шельфе острова Сахалин // Океанология. – 1984. – Т. 24. № 2. – С. 238–244.
9. Рабинович А. Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. – Л. : Гидрометеоздат. 1993. – 240 с.
10. Рабинович А. Б. Длинные волны в океане: захват, резонанс и морские природные катастрофы : Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – М. : ИО РАН, 1998. – 38 с.
11. Файн И. В. Частотные свойства Курильского шельфа // Генерация цунами и выход волн на берег. – М. : Радио и связь. 1984. – С. 80–83.
12. Godin G. The analysis of tides. – Toronto, Canada : Toronto press. 1972. – 264 p.
13. Kowalik Z. and Polyakov I. Tides in the Sea of Okhotsk // J. Phys. Oceanogr. – 1998, 28 (7). – P. 1389–1409.
14. Miller G. R., Munk W. H., Snodgrass F. E. Long-period waves over California's borderland. Part II. Tsunamis // J. Marine Research. – 1962. – Vol. 20. No. 1. – P. 31–41.
15. Munk W. H. Surf beats // Trans. Amer. Geophys. Union. – 1949. – Vol. 30. – P. 849–854.
16. Munk W. H., Snodgrass F. E. and Carrier G. F. Edge waves on the continental shelf // Science. – 1956. – Vol. 123. – P. 127–132.
17. Munk W. H., Snodgrass F. E., Gilbert F. Long waves on the continental shelf // J. Fluid Mech. – 1964. – Vol. 20. No. 4. – P. 529–544.



Подписано в печать 18.05.2006. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Печать ризограф. Тираж 100 экз.

Отпечатано в Сахалинском научно-исследовательском институте  
рыбного хозяйства и океанографии  
г. Южно-Сахалинск, ул. Комсомольская, 196