

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 натурных 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.

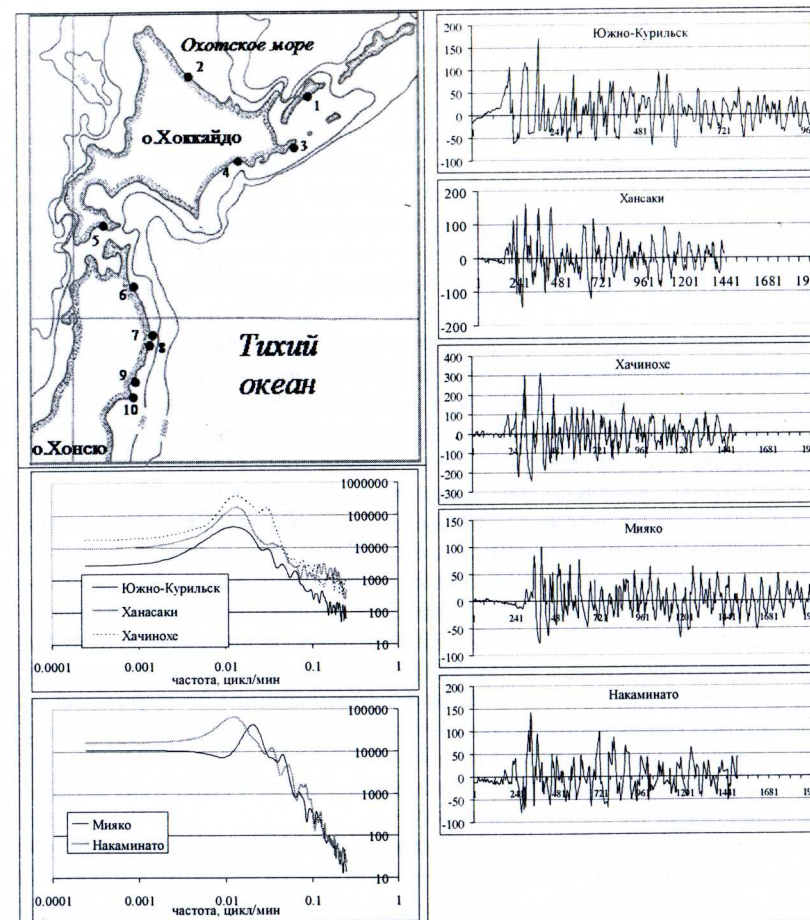


Рис. 1. Расположение уровневых постов на побережье России и Японии: Южно-Курильск (1), Ханасаки (3), Хачинохе (6), Мияко (7), Камаиси (8), Накаминато (9) и Чоши (10), записи Чилийского цунами (май 1960 г.) и их спектры (в $\text{см}^2/\text{мин}$).

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

