

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Иванова Анастасия Алексеевна**

**Оценка цунамиопасности северо-восточного побережья Сахалина  
и Центральных Курильских островов с учетом современных  
данных о рельефе дна**

25.00.28 – океанология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре океанологии географического факультета  
МГУ имени М.В.Ломоносова

- Научный руководитель** – *Сергей Анатольевич Добролюбов,  
член-корреспондент РАН, профессор*
- Научный консультант** – *Куликов Евгений Аркадьевич,  
доктор физико-математических наук*
- Официальные оппоненты** – *Игнатов Евгений Иванович,  
доктор географических наук, профессор,  
географический факультет МГУ имени  
М.В.Ломоносова, профессор кафедры  
геоморфологии и палеогеографии*
- Носов Михаил Александрович,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, физический факультет МГУ  
имени М.В.Ломоносова, заведующий  
отделением геофизики*
- Лоскутов Артём Владимирович,  
кандидат физико-математических наук,  
Институт морской геологии и геофизики  
ДВО РАН, заведующий лабораторией  
цунами*

Защита диссертации состоится «13» декабря 2018 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.11.02 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, географический факультет, 18 этаж, аудитория 1801.

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/152990814/>

Автореферат разослан «12» ноября 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор биологических наук

А.В. Ольчев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Дальневосточный регион России находится под влиянием обширной наиболее сейсмически активной зоны на планете, так называемого Тихоокеанского огненного кольца. В этом районе произошли около 90 % всех мировых землетрясений и 80 % самых мощных из них.

В современной истории жители полуострова Камчатка, острова Сахалин и Курильских о-вов не раз становились свидетелями разрушительной силы волн цунами. В 1952 г. под действием волн цунами, достигавших высоты 18 м, был практически полностью уничтожен посёлок Северо-Курильск. Только по официальным данным в результате цунами погибло 2336 человек.

Оценка цунамиопасности побережья необходима для разработки комплекса мер, направленных на предотвращение последствий цунами. Она проводится как на основе имеющихся исторических данных, так и на основании численного моделирования. Эффективность применения численных моделей для решения научно-практических задач проблемы цунами зависит не только от корректности используемых физико-математических моделей и реализующих их численных алгоритмов, но и от ряда других факторов, одним из которых является точность и детальность батиметрических данных, используемых для построения расчетных сеток.

Несмотря на большой прогресс, достигнутый в области моделирования цунами, при проведении локальной оценки цунамиопасности (для конкретного участка побережья или населенного пункта) по-прежнему возникают определенные сложности, связанные с отсутствием в открытом доступе необходимых для численного моделирования данных с разрешением порядка десятков и первых сотен метров. Помимо применения в качестве входных данных в моделях распространения цунами, батиметрические карты высокого разрешения могут использоваться для выявления потенциально опасных подводных оползневых масс, которые являются второй по частоте после землетрясений причиной возникновения цунами (около 7% всех событий).

**Цель работы** – исследование применимости современных данных о рельефе дна для оценки цунамиопасности побережий Дальневосточного региона России.

**Задачи:**

1. Численное моделирование распространения цунами 2006 и 2007 гг. с использованием разнородных данных о рельефе дна.
2. Исследование влияния качества батиметрических данных на способность численных моделей адекватно воспроизводить распределение максимальных высот волн вдоль северо-восточного побережья острова Сахалин и Центральных Курильских островов.
3. Оценка эффекта собственных колебаний уровня в бухте Двойная (о. Матуа).
4. Реконструкция начального состояния подводного склона до обрушения оползня, следы которого были обнаружены в ходе эхолотных съемок вблизи северо-восточного побережья Сахалина.
5. Численное моделирование процессов обрушения подводного оползня и распространения волн цунами.

**Методология исследования.** Для расчетов распространения волн цунами после землетрясения использовалась модель, являющаяся разновидностью хорошо известной программы TUNAMI для численного расчета распространения волн цунами (Imamura, 1995), в которой реализована конечно-разностная аппроксимация линейных уравнений мелкой воды в сферических координатах (Fine et al., 2013). Для расчета параметров источников цунами 2006 и 2007 гг. использовалась модель USGS (Hayes, 2015), в которой были рассчитаны смещения вдоль плоскости разрыва прямоугольной формы. Эти смещения в дальнейшем были пересчитаны в вертикальные деформации морского дна с помощью модели (Okada, 1985).

Для оценки характерных высот волн цунами, вызванных подводным оползнем на континентальном шельфе о. Сахалин, применялась численная гидродинамическая модель, первоначально предложенная в работе (Jiang,

Le Blond, 1992), в ней тело оползня представлено в виде тяжёлой вязкой жидкости. В настоящем исследовании используется расширенный вариант модели, учитывающий реальную топографию дна (Fine et al., 1998).

При генерации электронных карт батиметрии использовался математический аппарат интерполяции и создания регулярной сетки (приложение Surfer) на основе кригинга (Кошель, Мусин, 2000; Cressie, 1990).

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработана технология генерации сеточных массивов рельефа дна при использовании разнородных данных – GEBCO, оцифрованных навигационных карт и отдельных эхолотных промеров.

2. Оценка точности расчетов максимальных высот цунами вблизи берега показала, что использование в прибрежной зоне цифровой модели рельефа дна, основанной на общедоступных базах данных батиметрии типа GEBCO\_2014, приводит к заметным ошибкам.

3. Установлено, что для количественной оценки цунамиопасности на конкретных участках побережья Курильских островов необходимо использовать данные о рельефе дна с горизонтальным разрешением не менее 300 м, например, навигационные карты, данные промеров на мелководье и др.

4. Совместно с соавторами разработана концепция оценки цунамиопасности для волн, возникающих в результате подводных оползней. Показано, что для восточного побережья Сахалина опасность цунами оползневого происхождения может существенно превышать опасность сейсмических цунами.

#### **Научная новизна**

- Впервые в ходе численного моделирования удалось с достаточной точностью воспроизвести значения максимальных высот цунами 2006 и 2007 гг. и их распределение вдоль берега Курильских островов, что подтверждается сравнением вычисленных высот с данными полевых наблюдений;

- Впервые для Охотского моря использован метод восстановления исходного «дооползневого» рельефа дна с целью выделения тела оползня и

последующего использования этих данных при моделировании инициации цунами.

**Практическая значимость.** Полученные результаты подчеркивают необходимость разработки общедоступных батиметрических массивов данных высокого качества, что особенно важно для побережий Дальневосточного региона России, наиболее подверженных воздействию волн цунами: побережья Камчатки, Курильских островов, Сахалина, Приморья и Магаданской области. Цунамирайонирование отдельных участков побережья невозможно без привлечения качественных данных разрешением не ниже нескольких сотен метров. Завышение или занижение значений максимальных высот цунами при оценке цунамиопасности могут привести к негативным последствиям: излишним расходам при строительстве прибрежных инфраструктурных сооружений в случае преувеличенных оценок или к трагическим людским потерям и экономическому ущербу в случае занижения уровня опасности.

**Личный вклад автора.** Автором диссертации совместно с соавторами сформулирована постановка задачи по оценке распределения максимальных высот цунами и экстремальных значений скорости течений в районе центральных Курильских островов и в районе о. Сахалин. Личный вклад при разработке моделей распространения волн цунами заключается в создании электронных карт рельефа дна, использованных в расчетах. Лично автором проводились численные эксперименты, по оценке максимальных высот цунами и максимальных скоростей течений, а также анализ модельных результатов. Автором разработана технология реконструкции формы рельефа дна до момента схода оползня.

**Достоверность результатов** исследования подтверждается применением современных информационных и вычислительных ресурсов (для расчетов распространения волн цунами использовалась численная модель – разновидность хорошо известной программы TUNAMI, для расчета параметров источников цунами – модель Геологической службы США (USGS)), а также тщательной проверкой результатов моделирования с применением данных

инструментальных наблюдений.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на заседании Ученого совета Физического направления и научных семинарах лаборатории цунами Института океанологии им. П. П. Ширшова, на российских и международных конференциях: IUGG General Assembly, Прага, Чехия, 2015; молодежная научная конференция «Комплексные исследования Мирового океана», Москва, 2017; международные научно-практические конференции «Морские исследования и образование: MARESEDU», Москва, 2015, 2016; International Tsunami Symposium, Бали, Индонезия, 2017; Joint IAPSO-IAMAS-IAGA Assembly, Кейптаун, ЮАР, 2017.

**Научные публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных п. 2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 157 наименований работ отечественных и зарубежных авторов, и содержит 111 страниц текста, включая 29 рисунков и 2 таблицы.

Автор выражает благодарность научному руководителю С.А. Добролюбову и всему коллективу кафедры океанологии географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, а также сотрудникам лаборатории цунами Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН и лично Е.А. Куликову.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** изложена актуальность работы, ее цель и задачи, научная новизна и практическая значимость, личный вклад автора, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** приводятся общие сведения о цунамиопасности Дальневосточного побережья, представлен обзор, посвященный истории

развития численных моделей распространения цунами, и приведены принципы моделирования цунами от сейсмических источников. Представлена информация о современных численных моделях генерации и распространения цунами. Рассматриваются основные работы по моделированию цунами, в том числе в Дальневосточном регионе.

Цунамиопасность характеризуется целым рядом параметров, среди которых: повторяемость, высота подъема уровня моря на берегу, скорость течений при накате и откате и т. д. (Кайстренко, 2017). Практически все Дальневосточное побережье России в той или иной степени подвержено воздействию цунами и, следовательно, требует оценки цунамиопасности. С 1952 г. по 2013 г. на Дальневосточном побережье страны было зарегистрировано более 40 цунами, причем в 10-ти случаях высота волны была более 5 м, а в 1952, 1963, 1969, 1994 и 2006 гг. в отдельных пунктах отмечались волны высотой до 15 м и выше (Кайстренко, 2013).

Чаще всего для оценки цунамиопасности в этом регионе, а именно – для расчетов высот волн цунами редкой повторяемости, используют численное моделирование, причем в качестве источников цунами выступают как исторические события (Лобковский и др., 2009; Шевченко и др., 2018; Кайстренко и др., 2013), так и гипотетические землетрясения с заданными характерными для региона параметрами (Гусяков и др., 2015; Шевченко и др., 2011).

Необходимо отметить, что на настоящий момент практически не исследована цунамиопасность от подводных оползней, несмотря на то что в ходе батиметрических и сейсмических съемок в Охотском море выявлены обширные области дна, где существует реальная опасность оползания склонов депрессий (Баранов и др., 2015).

Развитие методов оперативного прогноза цунами и получение долгосрочных оценок цунами-риска в значительной степени основывается на использовании технологии компьютерного моделирования. В оперативном прогнозе численные модели необходимы для заблаговременной

оценки высот цунами на побережье по данным сейсмических наблюдений и расчетов параметров очага землетрясения. В задаче долгосрочного прогноза (цунамирайонирования побережья) компьютерное моделирование используется в сценарных расчетах для получения ожидаемых высот волн при землетрясениях различной магнитуды.

Численные методы для расчета распространения цунами на отдельных участках акватории океана начали использоваться с середины 1960-х гг., с момента появления в исследовательских центрах достаточно крупных ЭВМ (типа IBM-360, CDC 6400 и БЭСМ-6), пригодных для такого рода расчетов. Подробный анализ начального этапа развития численного моделирования цунами можно найти в работах (Shuto, 1991; Imamura, 1995). Хронологически первые работы в этой области были выполнены в Японии, в них были предприняты попытки промоделировать проявление Чилийского цунами 1960 г. в Токийском заливе (Isozaki, Unoki, 1964), а также воспроизвести основные особенности трансокеанского распространения этого цунами (Ueno, 1965).

В США первой работой по численному моделированию цунами была работа (Hwang, Divoky, 1970), в которой была построена численная модель разрушительного Аляскинского цунами 28.03.1964 г. и промоделировано распространение этого цунами в северо-восточной части Тихого океана.

В России первые работы по численному моделированию цунами были выполнены в Сибирском отделении РАН, в них исследовалось поведение сначала гипотетических, а потом и реальных исторических цунами в районе Южных Курил (Алексеев и др., 1978; Гусяков, Чубаров, 1982; Chubarov et al., 1984) в рамках нелинейной системы мелкой воды, записанной в декартовых координатах и поршневой модели возбуждения цунами.

Уже первые попытки применения численных методов для моделирования реальных цунами показали, насколько плодотворным является такой подход. В дальнейшем появилось большое число программных пакетов и комплексов для моделирования цунами, основанных на существенно более сложных моделях, включающих эффекты вращения Земли, амплитудной и

частотной дисперсии, донного трения. При этом достаточно рано (к началу 1990-х гг.) в международном цунами-сообществе была осознана необходимость верификации и валидации численных моделей и пакетов программ, используемых для расчетов цунами.

В течение первых двух десятилетий (60-е и 70-е гг. прошлого века) широкое использование компьютерных моделей для изучения цунами сдерживалось не только недостатком оперативной памяти и быстродействием имеющихся в распоряжении исследователей ЭВМ, но также и нехваткой информации о структуре очага цунами. Данные о косейсмических смещениях дна в очаговой области, полученные путем повторных батиметрических промеров, были доступны лишь для очень немногих цунамигенных землетрясений. Первой и достаточно знаковой работой в этом отношении была работа И. Аиды (Aida, 1978), в которой оценивалась надежность получения информации об очаге цунами на основе данных о механизме очага подводного землетрясения. В дальнейшем использование расчетных смещений дна в очаговой области в качестве аппроксимации очага цунами (так называемая «поршневая модель» возбуждения цунами) стало стандартной схемой для построения компьютерных моделей исторических и гипотетических цунами. Такие смещения обычно рассчитываются по формулам, выведенным И. Окадой в работе (Okada, 1985).

В настоящее время качество численного моделирования процессов генерации и распространения цунами достигло весьма хорошего уровня. Глубоководные записи цунами, получаемые датчиками системы DART (Gonzalez et al., 2005), как правило, воспроизводятся в расчетах с очень хорошей точностью с различиями по амплитуде первой волны в пределах 5–10 % (Titov et al., 2005; Wei et al., 2008). Также обычно не составляет особых проблем воспроизвести в расчетах (вплоть до выполняемых в режиме реального времени) приборные записи головной волны цунами, полученные в отдельных бухтах, в особенности расположенных в дальней от очага зоне (Titov, 2009).

Однако адекватное воспроизведение в расчетах мареографных записей

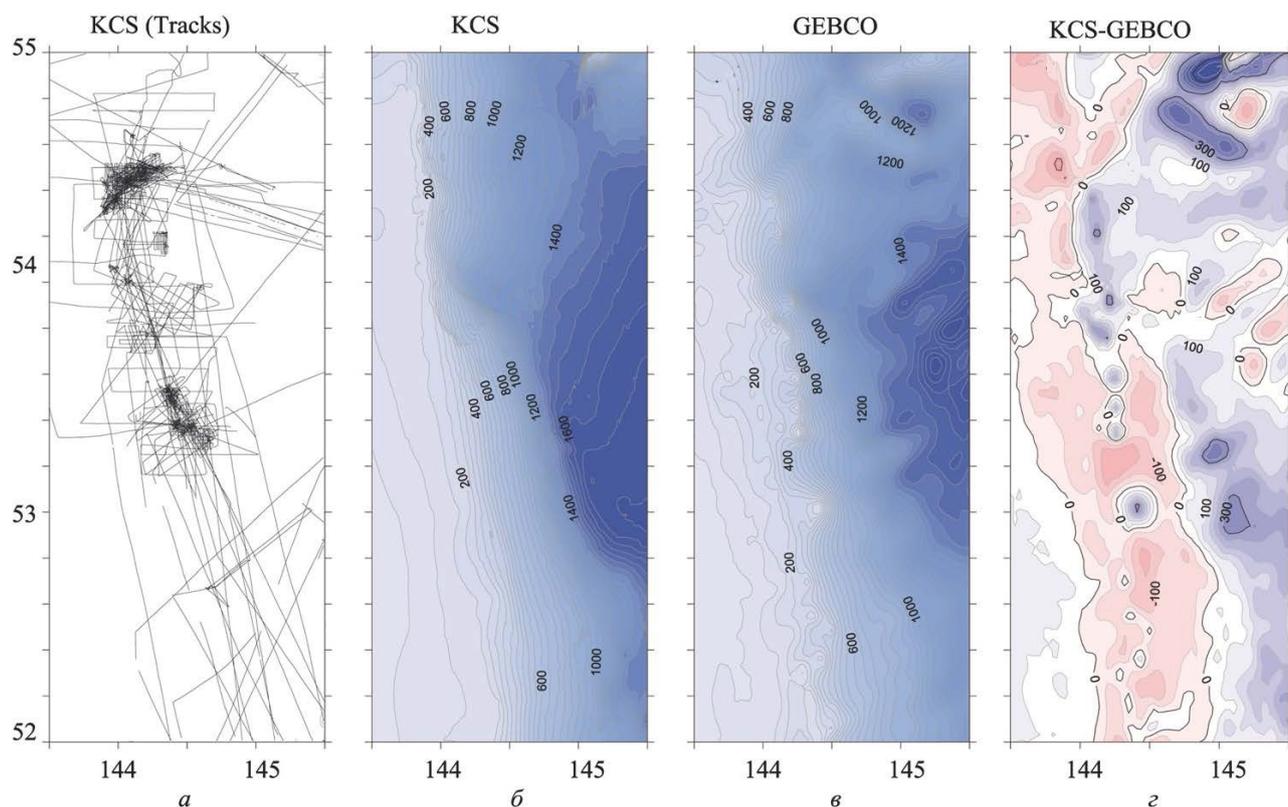
и заплесков на берегу в ближней от очага зоне по-прежнему является большой проблемой, возникающей даже в тех случаях, когда расчетные мареограммы хорошо воспроизводят записи глубоководных датчиков. Естественно, что моделирование процесса распространения цунами на мелководье и выхода волны на берег является существенно более сложной задачей по сравнению с моделированием распространения на глубокой воде.

В главе 2 описаны используемые в работе данные и методы. Особое внимание уделено моделям рельефа дна Мирового океана. Приведено описание данных о рельефе дна в районе северо-восточного побережья Сахалина (рис. 1, 3) и Центральных Курил (рис. 2). Описаны используемые данные о параметрах источников цунами 2006 и 2007 гг. и данные полевых наблюдений на Курильских островах летом 2007 г. и в последние годы. Приведена информация об используемых в работе численных моделях.

Прогресс в развитии численного моделирования процесса распространения цунами в глубоком океане и на шельфе в настоящее время достиг того уровня, когда отдельные научные вопросы становятся в большей степени проблемами технологии и инженерии. Современные возможности вычислительной техники (объемы памяти, быстродействие) позволяют использовать в моделях сеточные массивы батиметрии с разрешением, заведомо превосходящем доступные картографические данные. И именно поэтому в последние годы все большее внимание при изучении цунами стало уделяться качеству данных батиметрии. Существенное (на десятки, а иногда на сотни процентов) различие расчетных высот от измеренных может быть связано не только с упомянутыми выше проблемами задания очага цунами, эффективностью численного алгоритма и детальностью используемой сетки, но также и с точностью аппроксимации реальной батиметрии морского дна.

В ранних работах по моделированию цунами, выполненных в 60-е и 70-е гг. прошлого века, сеточные массивы батиметрии создавались, как правило, самими исследователями путем ручной оцифровки морских навигационных карт (Mogi, 1964). Первым широкодоступным массивом глобальной

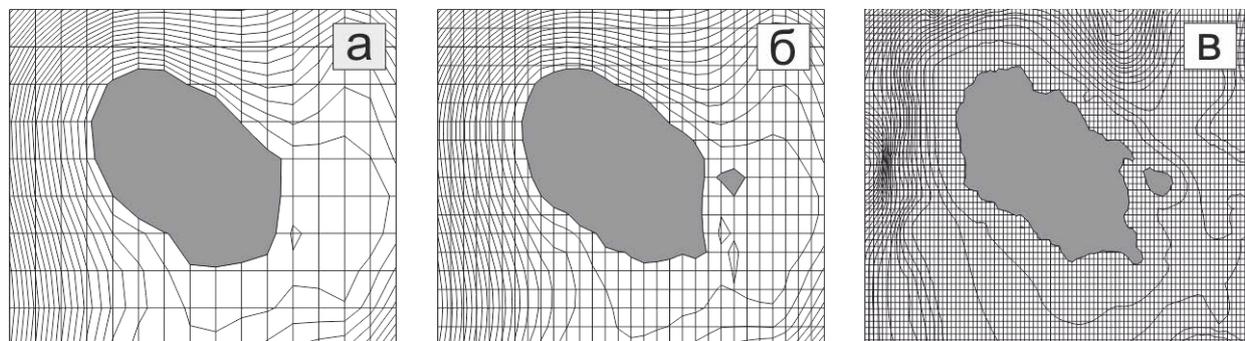
батиметрии стал появившийся в 1988 г. массив ETOPO5, содержащий округленные до целых метров высоты суши и глубины Мирового океана на сетке с шагом 5 угловых минут. Массив был создан в США путем интеграции топографических и батиметрических данных из различных источников. Фактическая точность значений глубин варьировалась от нескольких метров до 100–150 м в областях со слабым покрытием судовыми треками (Data...,1988).



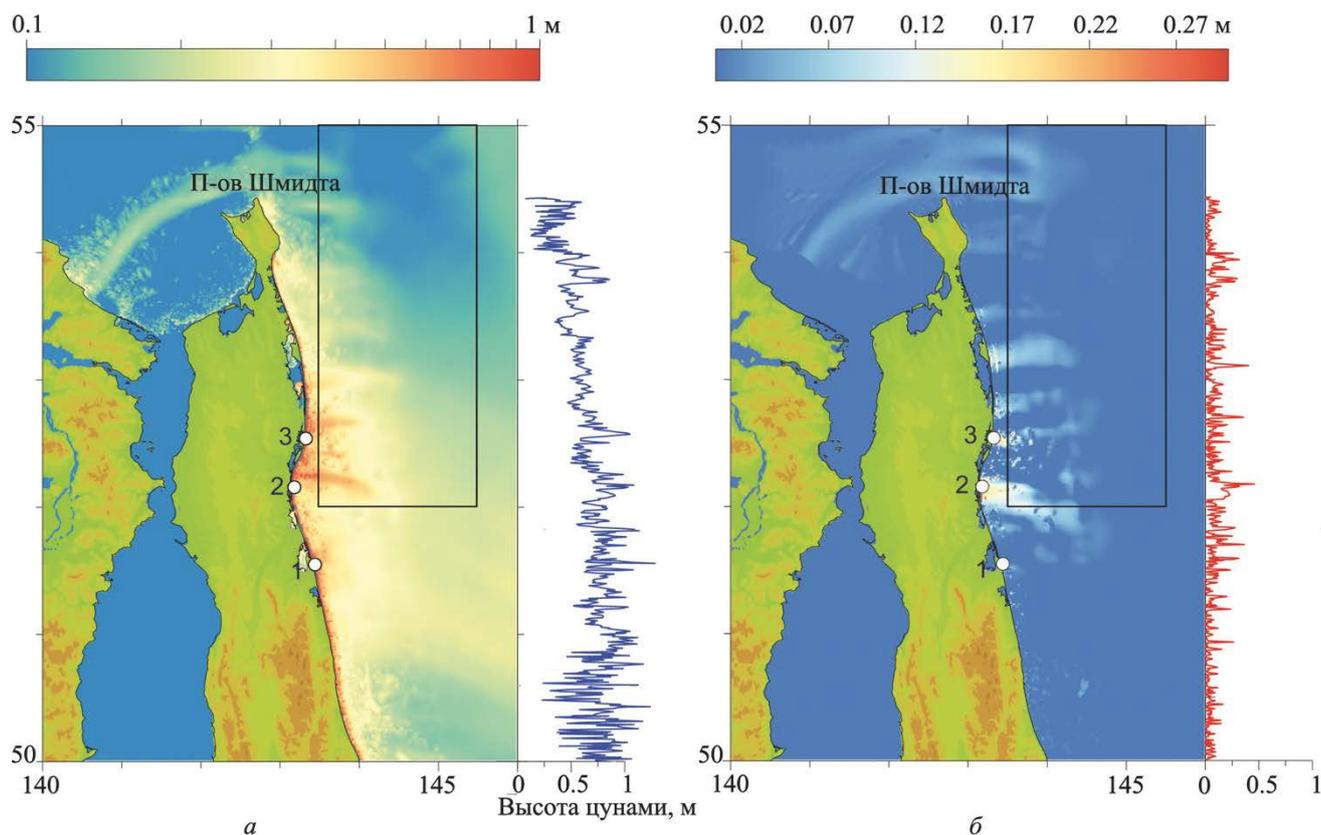
**Рис. 1.** а – карта-схема эхолотных промеров, выполненная в рамках проектов KCS; б – карта-схема рельефа шельфа и склона северо-восточной части о. Сахалин по данным батиметрической съемки KCS; в – карта-схема рельефа дна, построенная по данным GEBCO; г – разница глубин между картами б и в. Все значения глубины приведены в метрах.

В марте 2015 г. был выпущен глобальный сеточный массив GEBCO\_2014, содержащий высоты суши и глубины дна в узлах 30-секундной сетки. Традиционно данные и карты GEBCO содержали в себе лишь батиметрию наиболее глубоких акваторий Мирового океана, начиная с глубин 200 м и более, недостаточно детально представленных на морских навигационных картах. Сейчас основная работа ведется над повышением качества данных в мелководных районах океана. Для этого используются

электронные морские карты (ENCs), коллективно подготовленные государствами-членами Международной гидрографической организации (ИГО). Благодаря этим данным GEBCO обеспечивает более полную батиметрическую модель всего Мирового океана (British..., 2016).



**Рис. 2.** Цифровые карты рельефа дна в районе о. Матуа. Изобаты проведены с шагом 50 м. - а) по данным GEBCO\_08 – разрешение 1 угловая мин; б) по данным GEBCO\_2014, разрешение 30 угловых секунд; в) модель рельефа, использующая данные GEBCO\_2014 и карты ГУНИО, разрешение 10 угловых секунд.



**Рис. 3.** Карты-схемы распределения максимальных высот волны цунами, рассчитанных по модели батиметрии GEBCO\_2014 (а), и модуля разницы максимальных высот волны цунами, рассчитанных по модели батиметрии GEBCO\_2014 и комбинированной батиметрии с учетом данных KCS. Кривые справа – распределение максимальных высот цунами (а) и модуля разницы высот цунами (б) вдоль побережья на глубине 10 м. Прямоугольником отмечен полигон KCS, пунсоны – положения точек, для которых рассчитывались модельные мареограммы.

Для построения расчетной сетки для эксперимента по вычислению высот волн цунами у побережья Сахалина использовались данные, полученные в ходе батиметрической съемки на шельфе и склоне северо-восточной части о. Сахалин (рис. 1, а). Она проводилась в рамках трех международных проектов: Kurile–Okhotsk Marine Experiment (KOMEX), Hydro-Carbon Hydrate Accumulations in the Okhotsk Sea (CHAOS), Sakhalin Slope Gas Hydrates (SSGH) (Matveeva et al., 2005; Shoji et al., 2012; Cruise..., 2003), сокращенно – KCS. Полученные данные промеров были использованы для составления батиметрической карты с разрешением 0.5 угловых минут (шаг по долготе  $\Delta x \approx 600$  м, шаг по меридиану  $\Delta y \approx 920$  м), представленной на рис. 1, б, а также для сопоставления с картой, построенной по данным GEBCO (рис. 1, в).

Для района близ центральных Курильских островов была создана расчетная сетка на основе комбинации данных ГУНИО (Каталог..., 2016) в шельфовой области, прилегающей к Курильским островам, а также 30-секундных данных GEBCO\_2014 в глубоководной части расчетной области. Полученная цифровая модель рельефа дна имеет пространственное разрешение 10 угловых секунд, что составляет около 300 м. Такое высокое разрешение позволяет учитывать относительно мелкомасштабные особенности батиметрии и линии берега (см. рис. 2).

Что касается сейсмических событий 2006 и 2007 гг., высокая вероятность возникновения мощного подводного землетрясения и цунами в районе Средних Курил обсуждалась в работах (Лаверов и др., 2006; Лобковский, 2005) задолго до первого землетрясения, при этом возможные сценарии генерации и распространения волн цунами были промоделированы (Лаверов и др., 2006; Лобковский и др., 2006; Lobkovsky, Kulikov, 2006). Фактически это был первый случай, когда случившееся катастрофическое событие цунами было не только спрогнозировано, но и заранее выполнена оценка его последствий.

15 ноября 2006 г. в 11:14 UTC в районе Средних Курил произошло сильнейшее подводное землетрясение с магнитудой  $M_w = 8.3$ . Очаг располагался на континентальном склоне Курило-Камчатского

глубоководного желоба к юго- востоку от острова Симушир. В результате этого землетрясения возникли значительные волны цунами, проявившиеся практически по всей акватории Тихого океана.

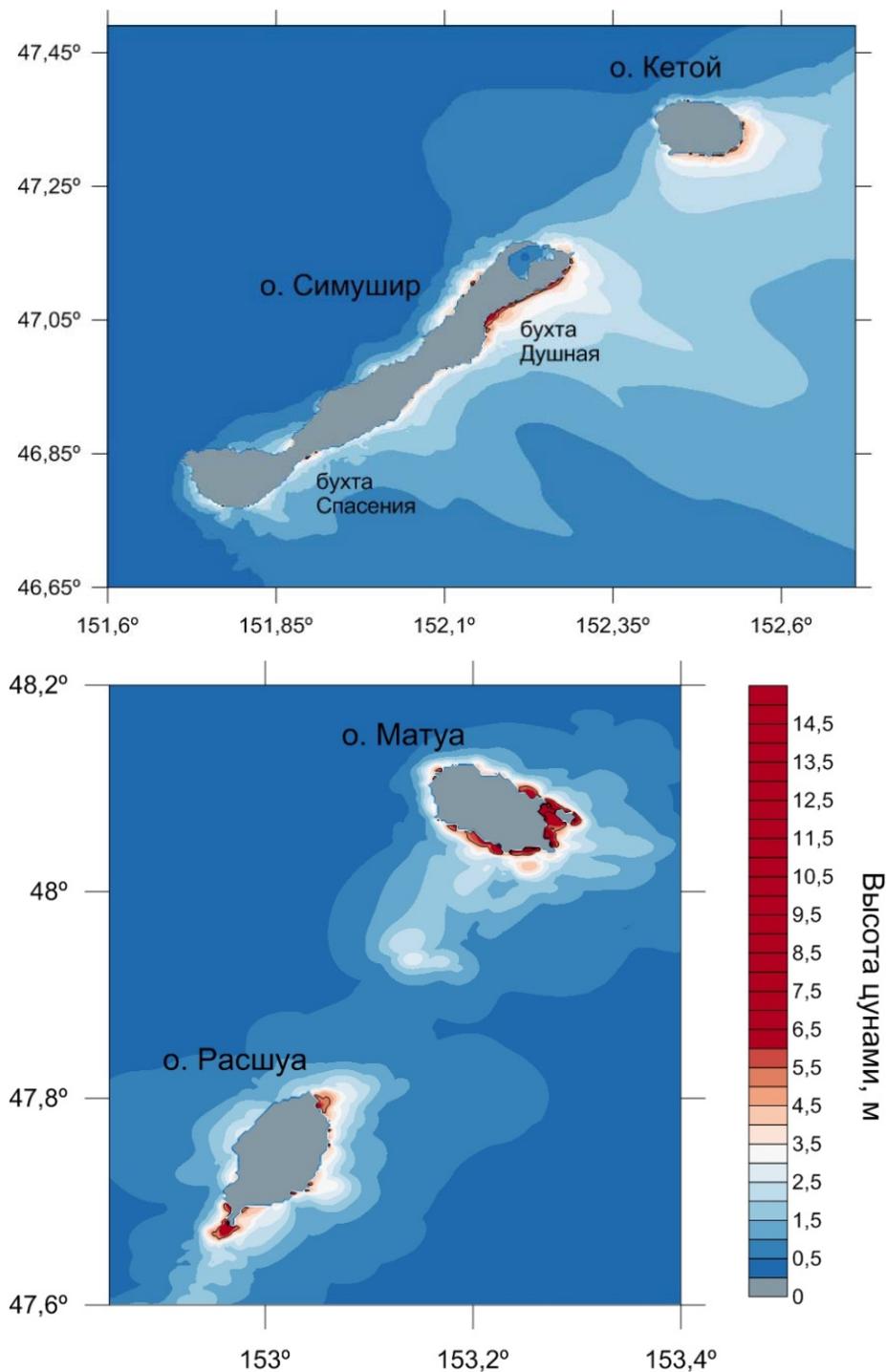
Спустя два месяца, 13 января 2007 г., в районе Средних Курил произошло второе землетрясение, имевшее близкую магнитуду ( $M_w = 8.1$ ). Эпицентр его главного толчка располагался на океанической стороне Курило-Камчатского желоба примерно в 100 км к востоку от эпицентра землетрясения 15 ноября 2006 г., в пределах океанической литосферной плиты. Несмотря на близость очаговых зон и несомненную связанность этих двух событий, сеймотектонический механизм второго землетрясения существенно отличался от первого.

Согласно данным СМТ-решений, полученным в Гарвардском университете США (Global..., 2017), энергия первого события превышала энергию второго приблизительно в два раза.

Спустя полгода после второго землетрясения в районе Средних Курил были проведены две морские комплексные экспедиции, одной из задач которых было обследование побережья островов Уруп, Симушир, Кетой, Янкича и Рыпонкича, Расшуа и Матуа с целью выявления сохранившихся следов цунами (Левин и др., 2008; MacInnes et al., 2009). Наибольшие высоты цунами (до 22 м) были выявлены на о. Матуа, при этом средняя высота волн превышала 10 м. К сожалению, полученные данные представляют собой только максимальные значения высот волн и заплесков для обоих событий, и определить, проявления какого именно цунами наблюдались в конкретном месте побережья, невозможно. При этом известно, что данные наблюдений вдали от источника показали, что первое событие 2006 г. вызвало существенно большие волны цунами.

В **главе 3** описаны результаты численного моделирования цунами 2006 и 2007 гг. на расчетных сетках разного разрешения для побережья Сахалина и Центральных Курил (рис. 4, 5). Приведено распределение рассчитанных максимальных высот цунами вдоль северо-восточного побережья Сахалина и

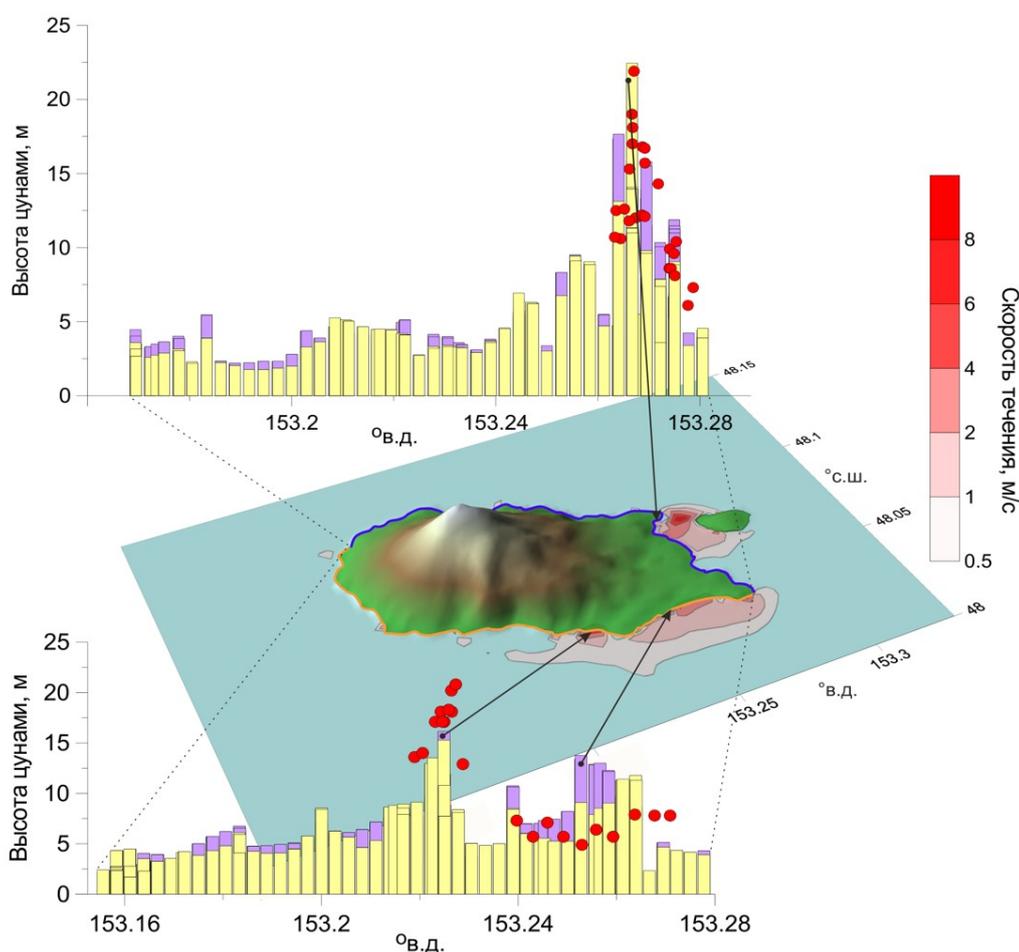
центральных Курильских островов. Проведена оценка влияния качества батиметрии на качество моделирования, в том числе путем сравнения рассчитанных высот с данными полевых наблюдений.



**Рис. 4.** Карты-схемы цунамиопасности согласно расчетам высот цунами 2006 г. (вверху) и 2007 г. (внизу).

Оценить влияние ошибок в задании рельефа дна на результаты модельных расчетов довольно сложно. Общепринятой методики для таких оценок не существует. Фактически искажение волнового поля, рассчитанного

с использованием неточных батиметрических данных, можно интерпретировать как эффект *рассеяния* волн цунами на неоднородностях дна, заданных в виде массива разниц глубин модельного и истинного рельефа. Очевидно, что влияние рассеяния носит интегральный («накопительный») характер – чем дальше от источника расположен наблюдатель, тем сильнее искажение волнового поля. Наибольший интерес представляет оценка точности расчетов максимальных высот цунами вблизи берега. Именно эти величины обычно используются при построении карт цунамирайонирования.



**Рис. 5.** Максимальные высоты цунами вдоль побережья о. Матуа в 2006 г. (желтые) и 2007г. (сиреневые) и пространственное распределение максимальных скоростей течения в 2006 г. Красные точки - из наблюдений.

В ходе выполнения данного исследования предпринята попытка оценить неопределенности, вносимые неточным знанием рельефа дна, сравнив волновое поле цунами 15 ноября 2006 г., полученное в расчетах только по

данным GEBCO и по данным со «вставкой» данных батиметрии KCS.

Было проведено сравнение наблюдаемых и рассчитанных по модели колебаний уровня океана в точке расположения глубоководного датчика DART 21414. Приход волны цунами на записи глубоководного датчика, расположенного на расстоянии от источника примерно 1600 км, отмечается через 2 ч после землетрясения. Модель неплохо воспроизводит как время вступления сигнала, так и максимальную высоту первого гребня. Прибор расположен на глубине 5375 м приблизительно в 270 км к югу от о. Амчитка (Алеутские о-ва). Такое соответствие между зарегистрированной и модельной волнами говорит о хорошем качестве заданных в модели начальных условиях (очага цунами).

Были построены графики колебаний уровня моря, полученные в результате расчета волнового поля цунами 15 ноября 2006 г. за 5-часовой промежуток времени в трех точках на побережье Сахалина для двух моделей батиметрии – GEBCO\_2014 и комбинированного рельефа, включающего данные GEBCO\_2014 и KCS. Записи колебаний уровня в самой южной точке №1 для этих двух моделей оказываются весьма близки. Отличие становится заметным для точек 2 и 3, расположенных непосредственно напротив полигона KCS. Наиболее очевидно расхождение записей колебаний уровня для точки 3. Обращает внимание, что, если для комбинированного рельефа дна (включающего батиметрию KCS) максимальная высота цунами проявляется для первой волны, для модели GEBCO\_2014 максимум достигается примерно через 1.5 ч после прихода первой волны.

На рис. 3, *a* представлена карта распределения максимальных значений высоты цунами. Хорошо видно, что наибольших значений высота волн достигает в окрестности северо-восточной части сахалинского побережья. Следует подчеркнуть, что именно в этом районе сосредоточены объекты топливно- энергетического комплекса (ТЭК). Справа на рис. 3, *a* показан профиль распределения высот цунами вдоль побережья Сахалина (на изобате 10 м). Характерные высоты цунами колеблются в пределах от 0.5 до 1 м,

достигая минимальных значений на восточном побережье п-ова Шмидта.

На рис. 3, б показано распределение модуля разницы высот цунами, полученных при расчете волнового поля по модели GEBCO и комбинированной модели батиметрии. Справа на рис. 3, б показан профиль распределения модуля разницы высот цунами вдоль побережья Сахалина (на изобате 10 м), полученных по упомянутым моделям. Среднеквадратическая величина «рассогласования» составляет более 10 см для участка побережья от 51.5 до 54° с.ш. и около 5 см для более южного участка от 54 до 51.5° с. ш. Причем отдельные выбросы могут достигать значений 0.4 м. То есть непосредственно напротив полигона KCS ошибка в задании глубин внутри прямоугольника KCS приводят к расхождению оценок высоты цунами в 15–20 %, а в отдельных точках до 40–50 %.

Исследование влияния качества данных о рельефе морского дна на способность численных моделей распространения цунами адекватно воспроизводить распределение максимальных высот волн вдоль побережья продолжено для Центральных Курил. Численные эксперименты были выполнены для двух Симуширских цунами 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. в центральной части Курильских островов. Вычисления проводились на полигоне 2521×1801 узлов, что составляет прямоугольник 7×5°. Были выполнены расчеты с использованием двух цифровых моделей рельефа дна: *Модель 1* – создана по данным GEBCO\_2014 с разрешением 30 угловых секунд и *Модель 2* – создана на основе комбинации данных батиметрии ГУНИО и GEBCO\_2014 с разрешением 10 угловых секунд. Использование данных GEBCO\_2014 в Модели 2 связано с тем, что в этом массиве более подробно представлена батиметрия в глубоководной впадине.

Время расчета было выбрано равным 3 ч, что достаточно для оценки максимальных высот цунами в центральной части Курил.

В таблице 1 представлены данные наблюдаемых максимальных значений высот цунами на побережье островов Кетой и Расшуа, а также для отдельных участков побережья островов Симушир и Матуа из статьи (MacInnes

et al., 2009). Последние четыре столбца таблицы содержат значения максимальных высот цунами, полученных в результате модельных расчетов (Rabinovich et al., 2008; Левин и др., 2008) и по Моделям 1 и 2. Как следует из таблицы, в количественном отношении максимальные наблюдавшиеся высот волн находятся в хорошем соответствии с результатами вычислений по Модели 2 для всех локаций, кроме бухты Душной на северо-восточном побережье о. Симушир (рис. 4). Интересно отметить, что, согласно расчетам по сетке с разрешением 10 с, максимальные высоты цунами в б. Айну (о. Матуа), на о-вах Кетой и Расшуа в 2007 г. превышали значения 2006 г.

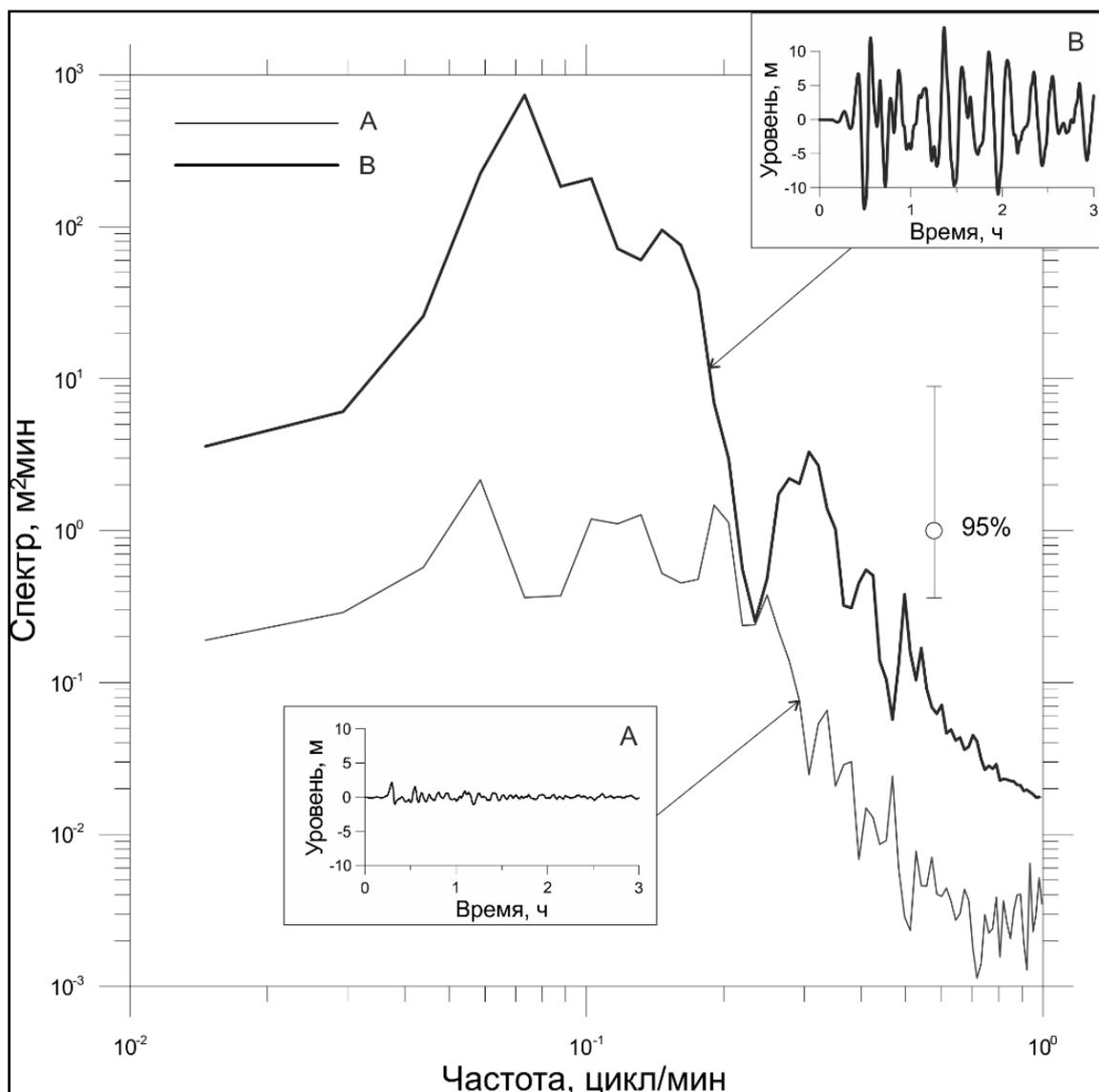
*Таблица 1. Сравнение измеренных и рассчитанных максимальных высот цунами 2006, 2007 гг. Жирным шрифтом выделены значения высот цунами, рассчитанные для события 2006 г., числом, отмеченным обычным шрифтом, относятся к событию 2007 г. Наблюденные максимумы отмечены курсивом, без указания к какому событию - 2006 или 2007 гг. - они относятся.*

Место наблюдения	Набл. макс. высота цунами (м)	Максимальные значения высот цунами, полученные в результате модельных расчетов (м)			
		(Rabinovich et al., 2008)	(Левин и др., 2008)*	Модель 1	Модель 2
<b>о. Матуа:</b> б. Двойная б. Айну	<i>21,9</i>	<b>3</b>	<b>5</b>	13	<b>22,5</b>
	<i>20,8</i>	-	-	8	16,5
<b>о. Симушир:</b> б. Душная б. Спасения	<i>20</i>	4	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>10</b>
	<i>7,2</i>	-	-	<b>3</b>	<b>6</b>
<b>о. Кетой</b>	<i>10,6</i>	6	<b>6</b>	<b>5</b>	9
<b>о. Расшуа</b>	<i>9,4</i>	4	<b>4</b>	<b>7,5</b>	11

\* В статье вычислялись максимальные высоты только цунами 2006 г.

Для о. Матуа проведен подробный анализ распределения высот цунами 2006 и 2007 гг. вдоль берега. В среднем для о. Матуа значения высот цунами около 5-7 м, однако в бухтах Айну, Южная и, особенно, в бухте Двойная волны в 3-4 раза превышали среднее значение. При этом в бухтах Айну и Южная, а также в южной части бухты Двойная волны в 2007 г. были выше, чем в 2006 г. (см. рис. 5).

Для оценки эффекта собственных колебаний уровня вблизи с о. Матуа были выбраны 2 пункта - на глубоководье южнее острова и внутри бухты Двойная вблизи мыса Клюв. В этих точках были рассчитаны колебания уровня моря в течении 3-х часов и вычислены спектры цунами в рамках модели источника 2006 г. В бухте возникают собственные колебания с периодом около 15 мин, при этом максимального размаха (амплитуда до 14 м) они достигают примерно через час после прихода головной волны с глубоководья. Сравнение двух спектров модельных мареограмм цунами 2006 г. подтверждает предположение о резонансном отклике бухты Двойная на воздействие «внешней» волны (рис. 6).



**Рис. 6.** Графики колебаний уровня моря в пунктах А и В, рассчитанные по модели для источника 2006 г., а также соответствующие спектры уровня.

Можно предположить, что именно резонансный характер отклика внутри бухты Двойная объясняет наблюдаемый абсолютный максимум высоты цунами не только на побережье о. Матуа, но и на всем побережье Курильских островов. То есть приход волны цунами вызвал «раскачивание» собственных колебаний в бухте с периодом 15 мин.

В главе 4 представлен обзор, посвященный моделированию оползневых цунами. Приведены результаты моделирования процессов обрушения возможного подводного оползня, следы которого были обнаружены вблизи северо-восточного побережья Сахалина. Описана технология реконструкции рельефа дна до схода оползня и выделения тела оползня с учетом данных сейсмопрофилирования. В рамках гидродинамической модели воспроизведен эффект генерации волн цунами, вызванных сходом оползневых масс.

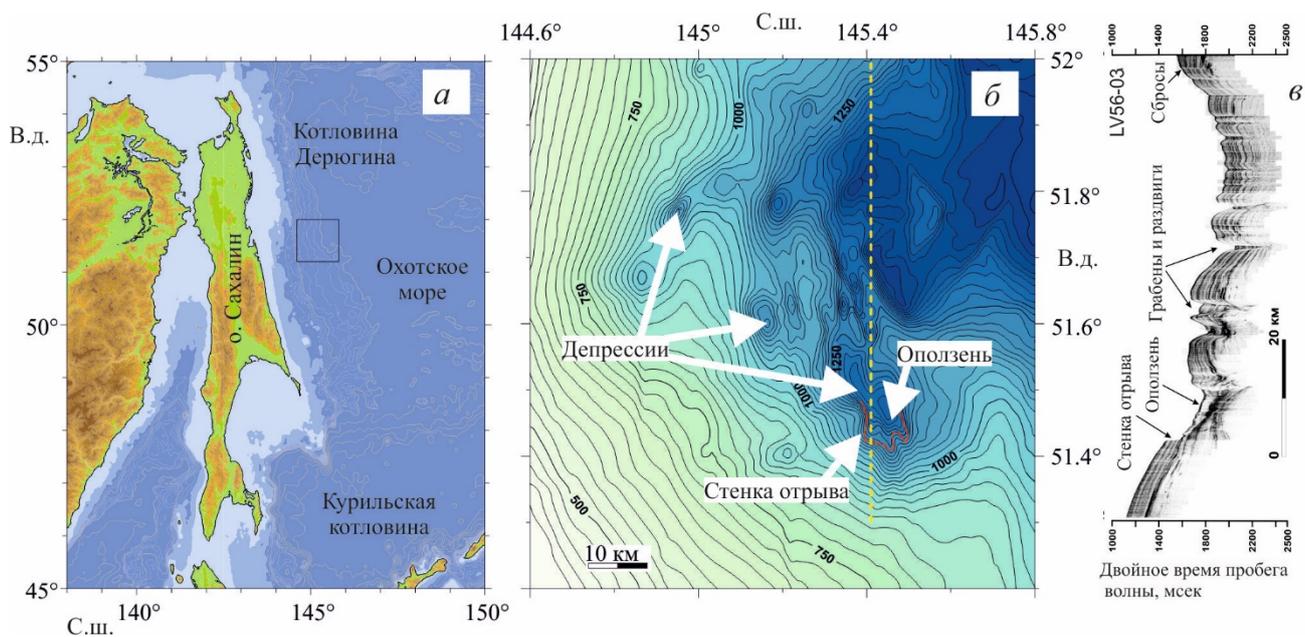
Подводные оползни, падение скал в воду, обвал берега и возникающие при этом мутьевые потоки могут генерировать значительные волны цунами в прибрежных зонах океана. Известно, что в отличие от цунами чисто сейсмического происхождения, «оползневые» цунами носят обычно локальный характер. Морские волны, спровоцированные оползнями, обычно имеют существенно меньший период и длину по сравнению с волнами, генерируемыми землетрясениями, и достаточно быстро затухают. Однако по своей разрушительной силе они ни в чем не уступают «сейсмическим» волнам. Цунами такого типа представляют действительно серьезную опасность еще и потому, что в некоторых случаях волна обрушивается на побережье спустя всего несколько минут после схода оползня.

Одной из задач исследования было моделирование схода подводного оползня и распространения вызванного им цунами. Подводный оползень был обнаружен в центральной части восточного склона о. Сахалин, на шельфе которого производится разработка месторождений нефти и газа в рамках проекта Сахалин-2 (рис. 7). Оползень был выделен по данным батиметрической и сейсмической съемок, проведенных в 50-м и 56-м рейсах НИС «Академик М.А.Лаврентьев» (2010, 2011 г.) в рамках корейско-российско-японского проекта

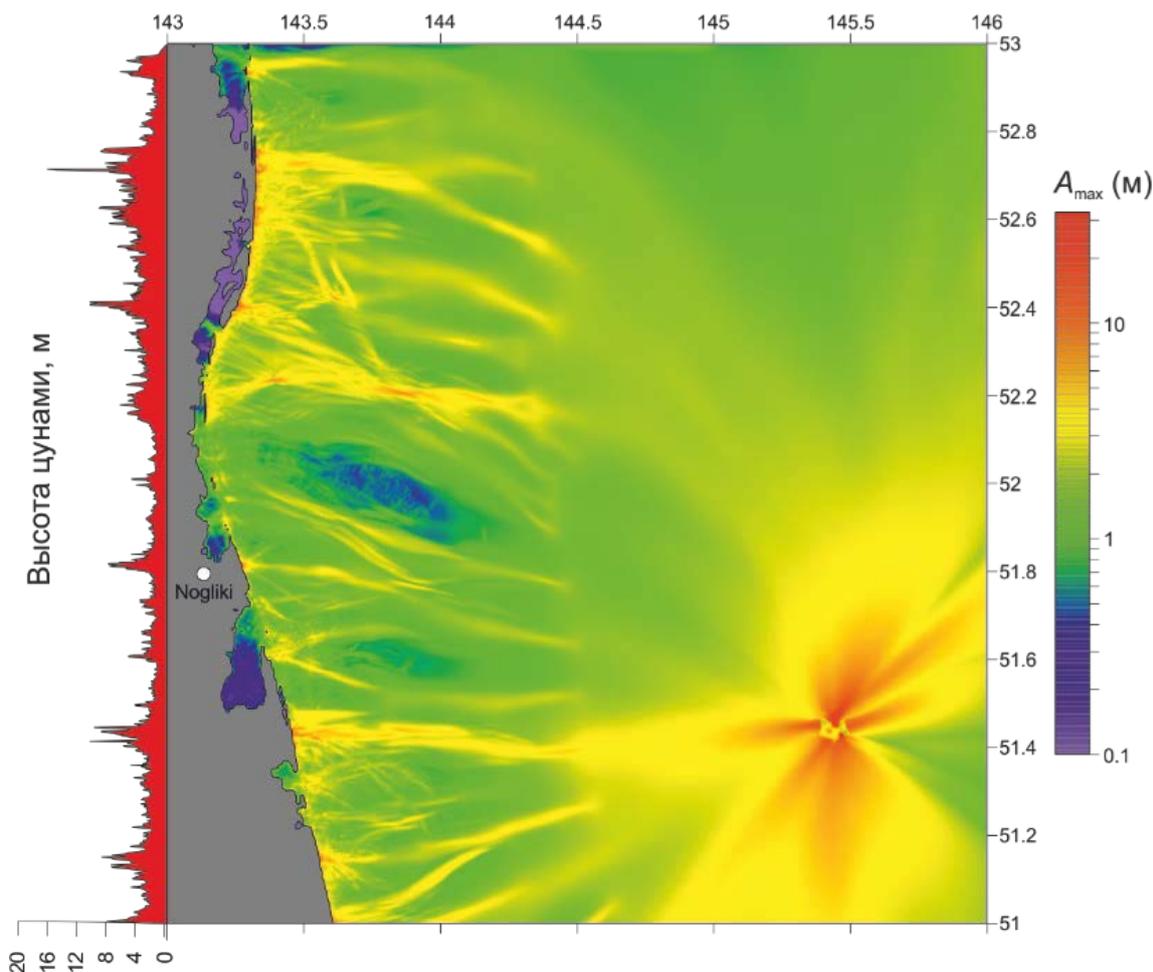
SSGH (Sakhalin Slope Gas Hydrates). Сейсмический профиль, (см. рис. 7, в) иллюстрирует строение верхней части осадочного чехла района исследований; вертикальный масштаб дан в миллисекундах двойного времени пробега волны, в воде  $1000 \text{ мс} = 750 \text{ м}$ , в верхней части осадков  $1000 \text{ мс} \approx 900 \text{ м}$ . Оценка возраста оползня, выполненная с учетом мощности осадков, перекрывающих оползень, и скорости осадконакопления дает основание предполагать, что оползень является современным и обрушение склона произошло несколько сотен лет назад (Баранов и др., 2013). С учетом данных сейсмопрофилирования выделено тело оползня, включая его нижнюю границу. С учетом его объема (примерно  $4 \text{ км}^3$ ) был реконструирован исходный рельеф дна.

Для оценки характерных высот волн цунами, вызванных подводным оползнем, была использована численная гидродинамическая модель, в которой тело оползня представляется в виде тяжёлой вязкой жидкости, стекающей по склону (Fine et al., 1998). В отличие от известной модели (Jiang, LeBlond, 1992), в ней используется реальная (произвольная) форма рельефа дна. Длинноволновое приближение применяется как для воды, так и для жидкости, составляющей оползень. Это означает, что горизонтальные масштабы поверхностных волн значительно превосходят глубину бассейна, а толщина оползня намного меньше, чем его ширина и длина. Для моделирования динамики оползня и изменения его формы в процессе движения по склону использовались нелинейные уравнения движения, записанные в длинноволновом приближении. В свою очередь образование волн на поверхности моря вследствие изменений формы рельефа дна воспроизводилось в рамках линейных уравнений мелкой воды с учетом квадратичного трения. Расчет набегания волны цунами на берег с учетом нелинейности не выполнялся в виду отсутствия адекватных данных о рельефе дна в этом районе. Фактически эти расчеты следует рассматривать как «оценочные».

Плотность осадочных масс принималась равной  $1.8 \cdot 10^3 \text{ кг м}^{-3}$ , а кинематическая вязкость  $\nu = 0.3 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ . Расчет выполнялся на сетке с разрешением 0.1 угловых минут (линейные размеры ячейки  $110 \text{ м} * 180 \text{ м}$ ).



**Рис. 7.** (а) Батиметрическая карта-схема восточного склона о. Сахалин и положение района исследований (прямоугольник); (б) батиметрическая карта района исследований, изобаты проведены через 25 метров, желтой штриховой линией обозначено положение сейсмического профиля; (в) - сейсмический профиль.



**Рис. 8.** Результат модельного расчета максимальных высот цунами ( $A_{max}$ ) в акватории Охотского моря и на северо-восточном побережье Сахалина, вызванного предполагаемым подводным оползнем.

В результате такого численного эксперимента удалось построить карту максимальных значений высоты цунами во всей области расчета, включая линию берега (рис. 8). Видно, что распределение высот волн вдоль побережья весьма неоднородно – от 2 до 18 м. Самые большие значения высот волн на берегу наблюдаются не напротив источника, а к северу от п. Ноглики. Интересно отметить особенности пространственного распределения максимальных амплитуд цунами по акватории. Непосредственно над источником заметна анизотропность излучения волн. Основной поток энергии был направлен на северо-восток, что совпадает с направлением движения оползня. Меньшая часть энергии излучена на юго-запад. На мелководье проявляется «полосчатая структура» распределения амплитуд. Согласно работе (Fine et al., 2013) такого рода неоднородная направленность цунами обусловлена фокусировкой волнового поля при рассеянии на случайно неоднородном рельефе дна.

В **заключении** сформулированы основные выводы диссертации и намечены дальнейшие перспективы развития этой работы.

1. Выполненные численные эксперименты по моделированию сейсмогенных цунами 2006 и 2007 гг. показали, что использование в расчетах сеточного массива, созданного на основе только общедоступных данных о рельефе морского дна с разрешением 30 угловых секунд, может приводить к ошибкам в максимальной высоте цунами примерно на 15–20% (с отдельными выбросами до 50 %) для северо-восточного побережья о. Сахалин и к занижению максимальной высоты цунами (более чем в 2 раза) для центральных Курильских островов. Для выполнения качественного цунамирайонирования побережья Дальнего Востока необходимо создание базы данных рельефа дна в областях, прилегающих к побережью, с разрешением не менее 300 м.

2. Сравнение распределения амплитуд цунами 2006 и 2007 гг. показывает, что несмотря на значительное отличие по размеру этих двух источников цунами, значения максимальных высот, а также характер распределения вдоль побережья центральных Курил оказались близки.

3. Высоты волн цунами 2006 и 2007 гг. являются наибольшими за всю

историю наблюдений на Курильских островах. Эти два события можно считать «тестовыми очагами» (*proxu tsunami*), а измеренные и рассчитанные значения высот волн, по-видимому, близки к максимально возможным в данном регионе.

4. Вероятно, именно резонансный характер отклика внутри бухты Двойная объясняет наблюдаемый абсолютный максимум высоты цунами не только на побережье о. Матуа, но и на всем побережье Курильских островов.

5. Обрушение подводных оползней и оползневые цунами представляют реальную опасность для побережья острова Сахалин, высота волн у берега может достигать десятков метров. Повторение события, аналогичного исследованному, может привести к значительным разрушениям береговой инфраструктуры и нанести огромный ущерб окружающей среде.

## РАБОТЫ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности

1. Куликов Е. А., Гусяков В. К., Иванова А. А., Баранов Б. В. Численное моделирование цунами и рельеф дна // Вестник Моск. ун-та. Серия 3: Физика, астрономия. – 2016. – № 6. – С. 3–14.

2. Иванова А. А., Куликов Е. А., Файн И. В. О моделировании Симуширских цунами 2006 и 2007 гг. в районе Средних Курил // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2017. – Т. 10, № 3, с. 56-64.

3. Иванова А. А., Куликов Е. А., Файн И. В., Баранов Б. В. Генерация цунами подводным оползнем вблизи восточного побережья о. Сахалин // Вестник Моск. ун-та. Серия 3: Физика, астрономия. – 2018. – № 2. – С. 111–116.

Опубликованные тезисы докладов на конференциях

1. Kulikov E., Ivanova A., Fine I., Baranov B. Landslide on the eastern slope of sakhalin island as a possible tsunami source // IUGG 2015 General Assembly. Book of abstracts. – Prague, Czech Republic, 2015. – P. 3593.

2. Куликов Е. А., Иванова А. А., Баранов Б. В. Генерация цунами подводными оползнями // Труды IV Международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование (MARESEDU)", 19-24 октября 2015 г., Москва, МГУ. – Феория Москва, 2015. – С. 40–43.

3. *Иванова А. А., Куликов Е. А.* Механизм возникновения и последствия крупнейших оползневых цунами // Морские исследования и образование (V Международная научно-практическая конференция морские исследования и образование: MARESEDU-2016. Сборник тезисов). – 2016. – С. 120-122.
4. *Иванова А. А., Куликов Е. А.* Влияние качества данных о рельефе дна на расчет распространения и заплеска цунами на побережье о. Матуа // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Москва, 10-14 апреля 2017 г. – Москва: ИО РАН, 2017. – С. 95–96.
5. *Ivanova A., Kulikov E., Fine I.* High-resolution numerical simulation of the 2006-2007 Central Kuril Islands tsunamis // Abstract book of 2017 Joint IAPSO-IAMAS-IAGA Assembly in Cape Town, South Africa. – 2017. – P. 1207.