



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра ПО и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

«Моделирование цунами»

Исполнитель: Жаворонкова Виктория Сергеевна

Руководитель: к. г. н., доцент, Чанцев Валерий Юрьевич

К защите допускаю»

И.о. заведующего кафедрой _____

(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«10» 16 2025г.

г. Санкт-Петербург

2025

Содержание

Введение	3
Глава 1 Общая характеристика цунами и особенности географического расположения района исследования	5
1.1 Цунами: общие характеристики.....	5
1.2 Генетические механизмы цунами.....	6
1.3 Сейсмические цунами.....	8
1.4 Географическое положение.....	11
1.5 Сейсмотектонические особенности Курило-Камчатского района.....	14
1.6 Исторические цунамигенные землетрясения.....	16
1.7 Современные методы изучения сейсмичности.....	20
1.8 Историческое цунами-районирование.....	22
Глава 2 Материалы и методы	25
2.1 Батиметрические особенности региона.....	26
2.2 Зоны риска возникновения цунами.....	29
2.3 Интенсивность сейсмической тряски.....	31
2.4 Выбор математической модели.....	32
Глава 3 Вычислительные эксперименты по расчету распространения волны Цунами	35
3.1 Анализ уравнений и численной схемы.....	36
3.2 Обоснование выбора явной схемы и ограничений.....	36
3.3 Анализ полученных результатов.....	37
Заключение.....	46
Список литературы.....	48

Введение

Цунами – разрушительные природные явления, представляющие серьёзную угрозу для прибрежных районов по всему миру. Их непредсказуемость и огромная разрушительная сила требуют постоянного совершенствования методов прогнозирования и оценки рисков. Ключевую роль в этом играет численное моделирование распространения и трансформации волн цунами, позволяющее учитывать сложную морфологию дна, особенности береговой линии и другие факторы, влияющие на поведение волны. Существующие модели позволяют с различной степенью точности прогнозировать параметры цунами, такие как высота волны, скорость распространения и время достижения береговой линии. Однако, постоянное совершенствование моделей необходимо для повышения точности прогнозов и адекватной оценки рисков в конкретных регионах.

В данной выпускной квалификационной работе рассматриваются вопросы численного моделирования волн цунами с использованием модели COMCOT. Особое внимание уделяется моделированию волн цунами в Тихом океане. Полученные результаты могут быть использованы для повышения точности прогнозирования цунами и разработки более эффективных стратегий по снижению рисков для населения прибрежных районов.

Цели работы:

Основной целью данной выпускной квалификационной работы является изучение и применение численной модели для исследования распространения и трансформации волн цунами. В рамках достижения этой цели решаются задачи, перечисленные ниже.

Задачи работы:

- Изучение физики генерации и распространения волн цунами;
- Проведение численных экспериментов по моделированию распространения цунами;

- Анализ полученных результатов моделирования, включая определение ключевых параметров цунами (высота волны, скорость, время достижения береговой линии) в различных точках исследуемой акватории;
- Оценка точности и достоверности разработанной модели;
- Формулирование выводов и рекомендаций по использованию разработанной модели для оценки риска цунами.

Глава 1 Общая характеристика цунами и особенности географического расположения района исследования

1.1 Цунами: общие характеристики

Цунами – волны очень длинной серии, возникающие в водном бассейне из-за быстрого вертикального смещения огромного объема воды. Они принципиально отличаются от таких обычных волн, создаваемых ветром, большей длиной волны, скоростью распространения и разрушительной силой. Подводные землетрясения очень часто являются наиболее обычной причиной цунами, но существует и ряд других факторов, например, подводные оползни, извержения вулканов и метеоритные падения. В этом разделе говорится о общих признаках цунами и особенно рассматривается сейсмическое цунами как самого частого и опасного вида этого явления. [1]

В числе наиболее выдающихся черт цунами – их огромная длина волны (λ), достигающая десятков и даже сотен километров на открытом океане. Это объясняет их значительную скорость разнесения и сравнительно маленькую потерю энергии на большом расстоянии.

Скорость цунами (c) определяется глубиной моря (h) и равна приблизительно $\sqrt{gh}$, где g – значение ускорения свободного падения. На океанической глубине скорость может составлять 700-800 км/ч. При движении приближения к берегу при уменьшении глубины оно приводит к уменьшению скорости и увеличению высоты волны вместе с тем.

В океане высота цунами (H) составляет несколько дециметров или метров, переводящие их в почти незаметные для судов размеры. Но приближаясь к берегу, из-за мелководности и фактор многослойности энергии высота волны вдруг набирает в высоте десятки метров и больше.

Время между повторами последовательных гребней волн — от минутной пары до получаса. Долгий период волны (T) является одной из причин разрушительного воздействия цунами на прибрежные сооружения.

В открытом море цунами сохраняются в виде сравнительно пологих волн. При приближении к берегу, в результате взаимодействия с морским дном, контура волны меняется, становится круче. Результатом этого является резкое увеличение высоты волны и её разрушительной власти. [1]

1.2 Генетические механизмы цунами

Цунами могут быть вызваны различным фактором, в числе наиболее значимых из которых следует отметить:

- сейсмические цунами (подводные землетрясения): самая частая причина их возникновения сдвиг тектонических плит на морском дне вызывает вертикальный сдвиг колоссального объёма воды и дальнейшее образование цунами. Магнитуда землетрясения, глубина гипоцентра и механизм очага устанавливают решающее значение генерируемого цунами;
- оползни по склонам континентального шельфа или по склонам подводных изверженных гор могут образовывать значительное смещение воды и цунами. Местные такие цунами обладают большей буквальной разрушительной силой из-за близости к береговой линии.;
- сильные подводные вулканические извержения могут образовывать цунами, как по причине взрыва, так и по причине выбрасывания части вулкана в море;
- падение метеоритов на поверхности океана может создавать мощное цунами, хотя это явление обычно очень редкое;
- глетчерная прорва (мегацунами). Крупные прорвы ледников в океан могут создавать локальные, но очень сильные цунами с высотой нескольких сот метров. [2]

Морское пространственное распространение цунами характеризуется сложными гидродинамическими уравнениями с вычетом следующих факторов:

Глубина моря: уже выше было упомянуто, что глубина океана является основным фактором, определяющим скорость распространения. Вопросы являются связанными с подводными хребтами, желобами и другими неровностями рельефа донного котловина, что приводит к преломлению и отражению волн и вариации их траектории и интенсивности.

Эффект рефракции: уменьшение скорости цунами при спуске в зоны разной глубины воды воспринимается как явление рефракции — размягчение направления распространения волн. Это может вторгаться в восполнение энергии цунами в отдельных прибрежных зонах.

Эффект дифракции: цунами огибают острова и распространяются в защищенную от прямого удара волны зону. Дифракция уменьшает интенсивность цунами, но все равно может восприниматься как препятствие.

Взаимодействие с береговой линией: на приближении к побережью форма береговой линии, уклон дна и другие условия оказывают серьезное влияние на распространение и трансформацию цунами. В узких бухтах и заливах энергия цунами может концентрироваться, что вызывает серьезное увеличение высоты волны.[2]

Несмотря на высокое скоростное распространение цунами медленно уменьшаются в процессе распространения.

Основные затухающие механизмы:

Трение о дно: трение волны о дно океана приводит к диссипации энергии. Эффект проявляется особенно на мелководном участке.

Внутреннее трение: Вязкость воды также способствует диссипации энергии цунами.

Распространение энергии: по мере распространения, энергия цунами распределяется на большую площадь, что приводит к уменьшению интенсивности волны.

Рассеяние энергии: взаимодействие цунами с неровностями морского дна, островами и другими препятствиями приводит к рассеянию энергии и уменьшению амплитуды волны.

Важно отметить, что, несмотря на затухание, цунами могут сохранять значительную энергию и представлять опасность на протяжении многих часов и даже суток после своего возникновения. Степень затухания зависит от многих факторов и является предметом активных исследований. Точное моделирование распространения и затухания цунами является сложной задачей, требующей использования современных численных методов и детальных данных о морфологии дна и параметрах источника цунами.

Влияние береговой линии на цунами:

Форма береговой линии, глубина и рельеф морского дна играют ключевую роль в усилении или ослаблении цунами. Узкие заливы, эстуарии и другие подобные геоморфологические особенности могут фокусировать энергию цунами, приводя к значительному увеличению высоты волны в определенных точках.[3]

1.3 Сейсмические цунами

Сейсмические цунами, представляющие абсолютное большинство всех разрушительных цунами, генерируются в ходе стремительного смещения дна океана под влиянием подводных землетрясений. Эта глава посвящена детальному рассмотрению генерационных процессов сейсмических цунами, факторов, влияющих на их интенсивность и распространение, а также методам оценки сейсмической опасности, связанной с цунами.[4]

Подводные землетрясения генерируют цунами при вертикальном смещении морского грунта. Этот процесс можно представить следующими механизмами:

- Вертикальное смещение: основным процессом формирования цунами является подъем или опускание значительного

участка морского дна в результате разрыва земной коры вдоль тектонического разлома. Амплитуда вертикального смещения напрямую коррелирует с энергией, высвобождаемой при землетрясении, и определяет начальную амплитуду цунами.

- Разрыв разлома: геометрия разлома, его размер и ориентация имеют существенное влияние на формирование цунами. Перпендикулярные береговой линии длинные разломы, как правило, порождают более мощные цунами.

- Глубина гипоцентра: землетрясения с мелкофокусным гипоцентром (недалекими очагами, расположенными неглубоко) вызывают более сильные цунами, чем землетрясения с глубоководным гипоцентром. Это объясняется меньшим затуханием энергии при распространении океанских волн в толще воды.

- Магнитуда землетрясения: магнитуда землетрясения по шкале моментов (M_w) является важнейшим параметром, определяющим высвобождаемую энергию и, таким образом, потенциальную силу генерируемого цунами. Землетрясения магнитудой $M_w \geq 7,0$ в большинстве случаев вызывают повышенную опасность цунами.

- Морфология морского дна: рельеф морского дна играет решающую роль в фокусировке и рефракции цунами волн. Подводные каньоны и другие неровности могут усиливать амплитуду цунами в некоторых районах. [4]

Влияющие факторы на интенсивность сейсмических цунами:

- Абсолютное расстояние до эпицентра: амплитуда цунами уменьшается при увеличении расстояния от эпицентра землетрясения, но затухание происходит менее быстро, чем у обычных волн.

- Глубина воды: глубина воды по траектории распространения цунами определяет скорость распространения и амплитуду волны. Мелководные области ведут к увеличению амплитуд.

- Форма береговой линии: геометрия берега, наличие заливов, бухт и других рельефных деталей может существенно усилить влияние цунами на побережье.

- Приливные эффекты: в зависимости от приливной фазы амплитуда цунами может изменяться. Высокий прилив увеличивает разрушительное воздействие.[5]

Оценка сейсмической опасности, связанной с цунами, включает:

- Сейсмическое районирование: на основе исторических событий определение зон высокого сейсмического воздействия и потенциальной опасности проявления цунами.

- Оценка вероятности землетрясений: с использованием статистических методов и исторических наблюдений проводится оценка вероятности землетрясений различных магнитуд в определённых областях.

- Численное моделирование: применение гидродинамических моделей для прогнозирования распространения и затухания цунами при разных землетрясениях.

- Картирование зон затопления: создание карт зон, которые могут быть затоплены цунами различной высоты.

- Оценка риска: сочетание информации о вероятности землетрясений, распространении цунами и уязвимости прибрежных зон для определения уровня риска.

Сейсмические цунами представляют серьёзную опасность для прибрежных сообществ по всей планете. Разработка представлений о механизмах генерации, факторах, определяющих интенсивность, и эффективных методах оценки сейсмической опасности является решающей для минимизации рисков и защиты населения. Местные исследования в этой области, включая совершенствование моделей распространения цунами и

улучшение систем раннего предупреждения, имеют приоритетное значение.[6]

1.4 Географическое положение

Курильские острова — это длинная цепь вулканических островов, протянувшаяся примерно на 1200 километров от японского острова Хоккайдо на юге до Камчатского полуострова на севере. Архипелаг расположен на границе между Тихим океаном и Охотским морем, разделяя эти водные пространства.[7]

Географические координаты Курильских островов примерно 46 градусов 30 минут северной широты и 151 градус 30 минут восточной долготы. Курилы образуют дугу из более чем пятидесяти островов разного размера. Четыре крупнейших острова — Кунашир, Итуруп, Уруп и Парамушир — входят в Большую Курильскую гряду. Также есть Малая Курильская гряда, включающая остров Шикотан и несколько мелких южных островов.[7]

Архипелаг находится в зоне высокой сейсмической активности и вулканизма. На островах насчитывается около ста вулканов, из которых около тридцати активны. Это объясняет наличие множества горячих минеральных источников. Самая высокая точка — вулкан на острове Итуруп, его высота достигает 2339 метров над уровнем моря.

Территориально Курильские острова входят в состав Сахалинской области Российской Федерации. Административно они делятся на три района: Северо-Курильский, Курильский и Южно-Курильский. Население архипелага составляет около двадцати тысяч человек, которые проживают преимущественно на четырёх крупных островах.[7]

Анализ географического положения Курильских островов необходимо начать с учёта его островного характера. Остров Парамушир, являющийся частью Курильской островной дуги, представляет собой вулканическое

образование с сложным рельефом, активной вулканической деятельностью (например, вулкан Алаид — один из самых высоких на Курилах) и сейсмической активностью. В связи с этой геологической нестабильностью особое внимание уделяется сейсмической безопасности при проектировании и строительстве зданий и инфраструктурных объектов, а также при разработке планов по обеспечению безопасности населения. Горный островной рельеф затрудняет доступ к территории для застройки, а сельское хозяйство ограничено, сосредотачиваясь преимущественно в прибрежной зоне. Крутые склоны, обрывы и скалистые берега усложняют транспортное сообщение внутри острова и ограничивают развитие туризма и рекреационной базы, несмотря на уникальную природную красоту окружающих ландшафтов.[8]

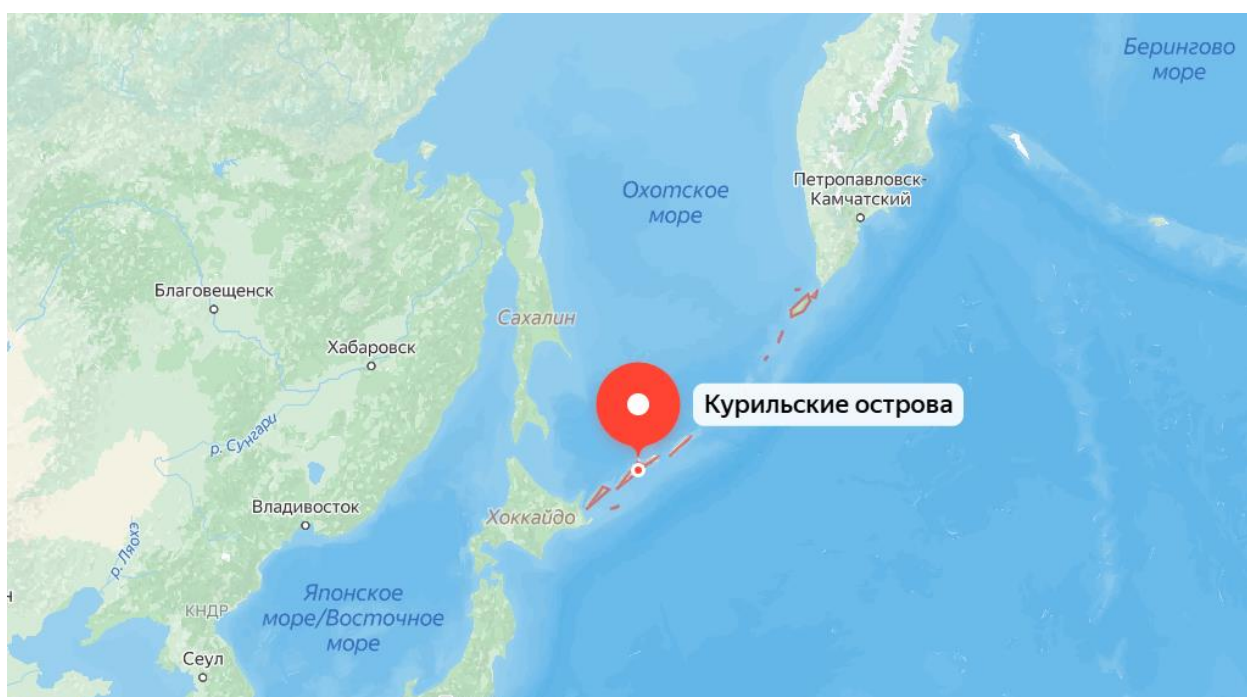


Рисунок 1 - Схема расположения Курильских островов

Морская среда Курильских островов также оказывает решающее влияние. Географическое положение на стыке Охотского моря и Тихого океана определяет суровый климат, характеризующийся сильными ветрами, туманами, частыми циклонами и большой сезонной изменчивостью температуры. Зимы отличаются обильными снегопадами и сильными

морозами, лето — сравнительно короткое и прохладное. Эти погодные условия напрямую влияют на надёжность морского сообщения, являющегося основным транспортным путём связи с внешним миром. Неблагоприятные погодные явления периодически прерывают паромное сообщение, что приводит к задержкам в транспортировке грузов и ограничению доступа к внешним рынкам. Кроме того, расположение между Охотским морем и Тихим океаном создаёт благоприятные условия для рыболовства — одной из ведущих отраслей экономики этого района. Однако сложные гидрометеорологические условия вызывают значительные трудности для рыболовного промысла, требуя применения специализированного флота и оборудования.[8]

В итоге Курильские острова занимают важное стратегическое положение, служа естественной границей между Охотским морем и Тихим океаном. Этот архипелаг не только представляет собой уникальный природный уголок с богатой флорой и фауной, но и играет значимую роль в жизни местных жителей и в геополитике региона. Курилы продолжают привлекать внимание учёных, туристов и специалистов, интересующихся их природными особенностями и историей.[8]

1.5 Сейсмотектонические особенности Курило-Камчатского района

Курильские острова и прилегающая Камчатка расположены в одной из самых активных сейсмотектонических зон мира, где происходит интенсивное взаимодействие двух крупных литосферных плит — Тихоокеанской и Охотоморской. В этом регионе происходит процесс субдукции, при котором океаническая Тихоокеанская плита погружается под материковую Охотоморскую плиту с высокой скоростью порядка 8–9 сантиметров в год. Это погружение создает значительные напряжения в земной коре, которые накапливаются в течение длительного времени и периодически разряжаются в виде мощных землетрясений. [9]

Основные структурные элементы региона

Курило-Камчатский желоб — это глубоководный океанический желоб, протяжённостью около 2200 километров и глубиной до 10,5 километров. Он является зоной субдукции, где океаническая плита погружается под континентальную. В этой зоне регистрируются самые мощные землетрясения региона с магнитудой 8 и выше. Желоб играет ключевую роль в формировании сейсмической активности, поскольку именно здесь накапливаются и высвобождаются колоссальные энергетические запасы, вызывая землетрясения и цунами. [9]

Вулканическая дуга — расположена параллельно Курило-Камчатскому желобу и включает в себя 68 действующих вулканов. Эти вулканы являются поверхностным проявлением субдукционного процесса: при погружении океанической плиты происходит плавление горных пород, что приводит к формированию магмы и последующим извержениям. Среди вулканов, наиболее близких к Северо-Курильску, выделяются Эбеко и Чикурачки, которые входят в число самых активных и изученных вулканов региона. Вулканическая активность тесно связана с сейсмичностью, так как движение магмы и изменение давления в земной коре могут провоцировать землетрясения. [9]

Глубинные разломы — в Курило-Камчатском районе выделяются крупные разломы, такие как разлом Шмидта. Эти разломы представляют собой зоны разрыва и смещения земной коры, способные генерировать сильные землетрясения с магнитудой 7,5 и выше. Разломы играют важную роль в перераспределении напряжений в земной коре и могут быть источниками как отдельных крупных толчков, так и серии повторяющихся сейсмических событий. [9]

Сейсмическая активность и особенности региона

Курило-Камчатский район характеризуется очень высокой сейсмической активностью. В среднем здесь происходит до 300 землетрясений в год с магнитудой 4 и выше, что свидетельствует о постоянном

движении и перераспределении напряжений в земной коре. При этом регион известен наличием так называемых «сейсмических брешей» — участков, где в течение длительного времени не фиксировались крупные землетрясения. Такие зоны считаются потенциальными очагами будущих мегаземлетрясений, поскольку накопленные в них напряжения могут высвободиться одномоментно, вызывая особенно разрушительные события. [10]

Высокая скорость субдукции и сложная структура земной коры создают условия для возникновения не только сильных землетрясений, но и связанных с ними цунами, которые представляют серьезную угрозу для прибрежных населённых пунктов и инфраструктуры. Для изучения и прогнозирования сейсмической активности в регионе применяются современные методы, включая вычислительное моделирование распространения сейсмических волн и цунами, что позволяет повысить точность предупреждений и снизить риски для населения. [10]

Поэтому Курило-Камчатский район можно назвать одной из ключевых зон сейсмической опасности в России и на Дальнем Востоке, требующей постоянного мониторинга и комплексного изучения для обеспечения безопасности и устойчивого развития региона.

1.6 Исторические цунамигенные землетрясения

Катастрофические события XX–XXI веков

Село Малокурильское на острове Шикотан находится вблизи одного из наиболее активных участков Курило-Камчатской сейсмической зоны, где за последние полвека произошло пять землетрясений с магнитудой более 8.0. При этом разрушительных цунами в селе не наблюдалось. Это обусловлено физико-географическими условиями: село с одной стороны расположено на стороне острова, удалённой от очага землетрясения, а с другой — находится в бухте с узким входом, что снижает цунамиопасность по сравнению с другими населёнными пунктами Курильских островов. Исторические данные,

преимущественно советского периода, подтверждают низкую цунамиопасность Малокурильского. Волны высотой 2,5 и 3,0 метра в 1893 и 1894 годах зафиксированы в каталогах, однако точное место на острове не определено.[11]

В близлежащем Корсакове, расположенном на правом расстоянии от очага, колебания уровня моря достигали 1,2 метра, что позволяет предполагать, что в бухте Малокурильска колебания могли составлять 1,0–1,5 метра.

Первое мощное цунами на Шикотане произошло после Итурупского землетрясения магнитудой 8,3 в ноябре 1958 года. Высота волн на восточном побережье острова достигала 5 метров, в Малокурильской бухте колебания составили 3,5 метра, а в близлежащей Крабозаводской бухте — 4–5 метров. Эпицентр располагался примерно в 160 км от Малокурильского. После этого события впервые была объявлена цунами-тревога для Дальневосточного региона СССР.[11]

Следующее значительное наводнение вызвало Чилийское цунами 22 мая 1960 года. В Малокурильской бухте наблюдались сильные колебания уровня с максимальным подъёмом до 3,5–4 метров, что привело к затоплению пирсов, срыву судов с якорей и уносу деревянного моста на 200 метров вверх по реке. Жертв не было, но материальный ущерб был значительным.[10]

Два землетрясения у острова Уруп в октябре 1963 года вызвали в Малокурильской бухте колебания уровня воды до 1,5 и 0,8 метра, сопровождавшиеся осушением причалов и смывом пиломатериалов. Интересно, что на побережье Урупа максимальные высоты цунами при этих событиях были обратными по величине.[13]

Транстихоокеанское цунами после Аляскинского землетрясения 1964 года магнитудой 9,0 не вызвало заметных колебаний в Малокурильской бухте и не нанесло ущерба.

В августе 1969 года у острова Шикотан, в 80 км юго-западнее Малокурильского, произошло сильное землетрясение магнитудой 8,2. Подъём

волн на восточной стороне острова достигал 5 метров, а в бухте максимальный подъём уровня составил около 1 метра.[13]

В октябре 1994 года произошло мощное землетрясение силой 8,1 в одноимённом районе, вызвавшее массовые оползни, трещины и значительные разрушения в Малокурильском и Крабозаводском. Максимальная приливная волна в бухте Димитрова достигала 10,4 метра, а в Малокурильской бухте — 3,4 метра. Площадь затопления в низкогорной части бухты составляла около 70 метров в ширину, вода протекала далеко по речной долине.[14]

Сейсмические волны магнитудой 8,3 в ноябре 2006 года в районе острова Симушир вызвали колебания в Малокурильской бухте до 1,5 метра, которые последовали примерно через четыре часа после первой волны. Территория около выброшенных островов была малозаселённой, поэтому существенных материальных потерь не зафиксировано, хотя высота волн достигала 20–22 метров.[13]

Следующее крупное цунами, вызванное землетрясением магнитудой 9,0 у Тохоку (Япония) в марте 2011 года, вызвало подъём воды в Малокурильской бухте на 2,3 метра, а в Крабозаводской — на 3,5 метра. Наиболее разрушительными были эффекты разрушения ледяного покрова бухт и выноса тяжёлого льда на побережье.[14]

Таким образом, несмотря на близость к сейсмически активной зоне, Малокурильское благодаря географическим условиям и особенностям рельефа острова испытывает сравнительно низкую угрозу разрушительных цунами, хотя отдельные сильные землетрясения всё же вызывают значительные колебания уровня воды и локальные подтопления.[14]

Город Северо-Курильск расположен на северо-восточном краю острова Парамушир, на склоне Второго Курильского пролива. Является административным центром района и насчитывает около 2400 жителей по состоянию на 2010 год. Район характеризуется высоким риском цунами, особенно при сильных подводных землетрясениях магнитудой около 9,0, которые здесь происходят примерно дважды за 270 лет.[12]

Первое задокументированное разрушительное цунами произошло 17 октября 1737 года и сопровождалось мощным землетрясением. По рассказам местных жителей, высота волн достигала 63 метров в районе мыса Лопатка и острова Шумшу. Хотя точность этой цифры вызывает сомнения, известно, что землетрясение было очень сильным, вызвав полное опустошение восточного побережья Камчатки и северных Курил, а также жертвы среди населения.[8]

Второе сильное землетрясение произошло 4 ноября 1952 года, всего через 215 лет после первого, что является самой короткой повторяемостью таких мощных событий в регионе. В 4 часа утра по местному времени произошло землетрясение магнитудой около 9,0, признанное одним из крупнейших в истории России, вызвавшее разрушительное цунами, которое практически уничтожило город Северо-Курильск на острове Парамушир. Эпицентр землетрясения находился на глубине 20–30 км в зоне субдукции, где Тихоокеанская плита погружается под Охотоморскую плиту вдоль Курило-Камчатского желоба.[8]

Фокус очага представлял собой типичное для мегаземлетрясений в субдукционных поясах мегатрастовое событие — резкий разрыв и сдвиг в контактной зоне литосферных плит. Длинный разрыв протяжённостью приблизительно 700 км и шириной 150–200 км охватил участок от северной части острова Онекотан до мыса Шипунский на Камчатке. Сдвиг был перпендикулярен линии желоба и вызвал мощное вертикальное смещение морского дна с образованием гигантской волны цунами.

За два года до основного толчка в эпицентральной зоне началась цепочка предвестников (форшок), а затем после главного события была отмечена интенсивная серия афтершоков, чётко обозначившая границы зоны разрыва.[8]

Сильные толчки продолжались около 30 минут, вызывая разрушения в Северо-Курильске: повреждение домов, разрушение печей, осыпание штукатурки с потолков, падение мебели и посуды по полу, как на качающемся корабле. Через 30–40 минут после землетрясения с океана начала

приближаться первая волна цунами высотой 5–7 метров. Первая волна затопила прибрежные дома, но многие жители успели подняться на сопки. Однако спустя 15–20 минут пришла вторая, более высокая волна — около 15–18 метров, которая смела почти все постройки в городе, оставив лишь фундаменты. Волна была настолько мощной, что сносила тяжёлую технику и создавала гигантские водовороты в долинах. Общий ущерб составил более 2300 человек из немногим более 6000 жителей.[8]

Это событие стало первым значительным цунами, получившим международную известность и послужившим стартовым импульсом к тестированию системы предупреждения цунами в Тихоокеанском регионе. Оно также подтвердило, что мегаземлетрясения и вызываемые ими цунами могут проявляться в субдукционных областях при определённых геотектонических условиях — относительно молодой океанической коре, высокой скорости субдукции (более 5 см/год) и определённом угле погружения плиты.[8]

В целом, землетрясение 1952 года демонстрирует классический механизм мегатрастового разрыва в зоне субдукции, сопровождающегося мощным вертикальным смещением морского дна и образованием разрушительного цунами, что делает этот случай ключевым для изучения сейсмической опасности Курило-Камчатского региона.[14]

В марте 1953 года произошло землетрясение магнитудой 6,2 возле восточного побережья Парамушира, вызвавшее локальное цунами высотой около 3 метров, вероятно связанное с подводным оползнем или обвалом.[12]

Транстихоокеанское Чилийское цунами 22 мая 1960 года достигло Северо-Курильска волнами высотой до 4,7 метра, что привело к затоплению жилых домов в прибрежной зоне и разрушению складов.[10]

Цунами, вызванное Аляскинским землетрясением 1964 года, было здесь значительно слабее, с волнами до одного метра и фактически не причинило ущерба, что объясняется направленностью излучения энергии очага.

В последующие почти 50 лет сильных цунами в Северо-Курильске не отмечалось. Волны, вызванные землетрясениями 1963, 1969, 1994, 1997 и 2006 годов, были в сто раз ниже приливных колебаний и не причиняли вреда. Исключением стало цунами 11 марта 2011 года, вызванное землетрясением у Тохоку, которое вызвало колебания уровня воды с амплитудой до 1,5 метра и волны на склонах берегов до 2,5 метров.[21]

Таким образом, Северо-Курильск находится в зоне повышенной цунамиопасности, особенно при сильных подводных землетрясениях, что подтверждается историческими данными о значительных разрушениях и больших потерях среди населения.[8]

1.7 Современные методы изучения сейсмичности

Современные методы изучения сейсмичности представляют собой комплексный подход, включающий в себя различные технологии и научные дисциплины, направленные на мониторинг, анализ и прогнозирование сейсмических процессов. Эти методы позволяют не только фиксировать и описывать землетрясения, но и понимать механизмы их возникновения, а также оценивать потенциальные риски для населения и инфраструктуры.

Геофизический мониторинг является основой для оперативного наблюдения за сейсмической активностью. В регионе функционирует разветвленная сеть сейсмических станций, которые принадлежат крупным научным организациям, таким как Геофизический сервис Российской академии наук и международной сети IRIS. В Курило-Камчатском районе насчитывается более 50 таких станций, что обеспечивает высокую плотность наблюдений и точное определение параметров землетрясений — их магнитуды, глубины и эпицентров.

Кроме того, для раннего обнаружения опасных явлений применяются донные обсерватории, такие как системы DART и DONET. Эти установки расположены на морском дне и способны фиксировать предаварийные

сигналы, связанные с подводными землетрясениями и цунами. Благодаря им можно получить важную информацию о начале сейсмического события значительно раньше, чем волны достигнут берега, что критично для своевременного оповещения и эвакуации населения.[11]

Геодезические методы позволяют отслеживать малейшие движения литосферных плит и деформации земной коры, которые предшествуют или сопровождают сейсмические события. Одним из ключевых инструментов являются GPS и GNSS-наблюдения, обеспечивающие точность измерений порядка 1–2 миллиметров в год. Такие данные позволяют выявлять накопление напряжений в земной коре и прогнозировать вероятность землетрясений.[11]

Спутниковая радарная интерферометрия (InSAR) — еще один современный метод, который используется для выявления деформаций поверхности Земли с помощью спутниковых снимков. InSAR позволяет создавать детализированные карты изменений рельефа, фиксируя даже незначительные смещения, что важно для понимания процессов накопления и высвобождения напряжений в зоне субдукции и на разломах.[12]

Палеосейсмология занимается изучением следов древних землетрясений и цунами, оставшихся в геологических разрезах. В частности, исследуются торфяники, песчаные клинья и другие осадочные образования, которые могут содержать признаки сильных сейсмических событий, произошедших сотни и тысячи лет назад. Анализ таких следов помогает восстановить историю сейсмичности региона, определить циклы активности и оценить вероятность повторения крупных землетрясений в будущем.[13]

Математическое моделирование играет важную роль в прогнозировании и анализе сейсмических процессов. Одним из основных инструментов является метод конечных элементов (FEM), который позволяет рассчитывать распределение напряжений в земной коре с учетом сложной геометрии и физических свойств горных пород. Эти расчеты помогают понять, где и как

накапливаются напряжения, а также предсказывать возможные места разломов и очаги будущих землетрясений.[14]

На основе моделирования создаются прогнозные карты сейсмической опасности, которые включают оценку вероятности возникновения землетрясений определенной магнитуды в течение ближайших 50 лет. Такие карты являются важным инструментом для градостроительного планирования, разработки мер по снижению рисков и подготовки систем гражданской защиты. [14]

В целом, современные методы изучения сейсмичности представляют собой комплекс взаимодополняющих технологий, которые в совокупности обеспечивают глубокое понимание сейсмических процессов и позволяют значительно повысить уровень безопасности в сейсмоопасных регионах.[15]

1.8 Историческое цунами-районирование

Историческое цунами-районирование — это систематический анализ и картографирование прибрежных зон с учётом данных о прошлых цунами, их частоте, высотах волн и последствиях. Вспомогательной целью такого районирования является выявление наиболее уязвимых участков побережья и оценка уровня цунамиопасности для различных территорий. Это позволяет повысить эффективность мер по предупреждению и снижению ущерба от будущих цунами.[16]

Для проведения районирования используются первичные данные из исторических хроник, геологических свидетельств и результатов инструментальных измерений.

Классификация берегов проводится по степени воздействия цунами: от зон с высокой частотой и большой высотой волн до сравнительно безопасных участков с редкими и слабыми проявлениями.

В расчёты включаются географические и геоморфологические факторы, влияющие на распространение и амплитуду цунами, такие как конфигурация

береговой линии, наличие бухт, глубина прибрежной зоны и подводный рельеф.[16]

Методология и методы составления карт цунами-районирования

Современные методики включают вероятностный подход к оценке цунамиопасности (РТНА — Probabilistic Tsunami Hazard Assessment), основанный на статистическом анализе исторических данных и моделировании потенциальных сценариев цунами. Этот метод позволяет оценить вероятность проявления цунами заданной высоты с учётом вариативности очагов землетрясений и параметров волн.[17]

На картах отображаются:

- Исторические события землетрясений и цунами с указанием даты, магнитуды, высоты волн и зон затопления;
- Геофизические модели очагов землетрясений и механизмов генерации цунами, учитывающие вертикальные и горизонтальные смещения морского дна;
- Результаты численного моделирования распространения волн и их взаимодействия с береговой линией для прогноза местных амплитуд и зон затопления.[17]

Роль географических параметров в цунами-районировании

Географические особенности существенно влияют на уровень цунамиопасности:

- Побережья с открытым выходом в море и пологим рельефом предрасположены к более высоким и разрушительным волнам;
- Закрытые бухты и заливы с узкими входами, как правило, уменьшают амплитуду цунами, обеспечивая естественную защиту;
- Подводный рельеф, включая склоны и возвышенности, влияет на генерацию и усиление волн.[18]

Исторические случаи и региональная специфика

Анализ истории цунами в Курило-Камчатском бассейне и на Дальнем Востоке России выявил зоны с повышенной цунамиопасностью, где

зафиксированы волны высотой более нескольких метров и значительные разрушения. Эти данные используются для уточнения границ зон цунамиопасности и разработки рекомендаций по планированию и защите.[18]

Роль исторического цунами-районирования в предупреждении и управлении рисками:

Обеспечивает основу для создания эффективных систем раннего предупреждения, оптимального размещения датчиков и мариграфов для своевременного обнаружения цунами;

Служит базой для разработки планов эвакуации и оповещения населения;

Является научной основой для оценки потенциального ущерба и планирования инженерных защитных сооружений.[18]

Глава 2 Материалы и методы

2.1 Батиметрические особенности региона

Район Северо-Курильска, расположенный на стыке Тихоокеанской и Охотоморской плит, представляет собой геологически и геоморфологически сложную зону, где батиметрические особенности играют ключевую роль в формировании природных процессов, особенно связанных с цунами и сейсмической активностью. Глубоководный Курило-Камчатский желоб, континентальные склоны и подводные структуры создают уникальный подводный ландшафт, который требует детального изучения для понимания динамики волн и оценки рисков. [7]

Глубина Курило-Камчатского желоба достигает 8000–9000 метров, что делает его одним из самых глубоких в мире океанических желобов. Это не просто географическая особенность, а важный фактор, определяющий гидродинамические процессы в регионе. В таких глубинах скапливается огромное количество энергии, которая может высвободиться в результате подводных землетрясений и смещений литосферных плит. Именно эти процессы приводят к образованию мегацунами — волн, высота и энергия которых значительно превосходят обычные морские волны. Глубокий желоб способствует не только генерации сильных волн, но и влияет на их начальную скорость и направление распространения.

Континентальный склон острова Парамушир, с крутизной до 15–20°, играет важную роль в трансформации морских волн при их приближении к берегу. Такой крутой склон способствует резкому увеличению высоты волн, что значительно усиливает их разрушительный потенциал. При подходе к береговой линии волны, проходя по наклонному рельефу, замедляются, но при

этом их высота возрастает, что приводит к усилению штормовых и цунами волн. Этот процесс особенно опасен для прибрежных населённых пунктов, так как увеличивает вероятность затопления и разрушения инфраструктуры.

Подводные хребты и каньоны, расположенные в районе Северо-Курильска, формируют сложную сеть, которая направляет и фокусирует энергию волн в определённые участки побережья. Эти структуры действуют как своеобразные каналы и отражатели, изменяя траекторию распространения цунами и усиливая локальные высоты волн в бухтах и заливах. В некоторых местах энергия волн может концентрироваться, создавая эффект усиления, что приводит к резкому росту высоты волны в ограниченном пространстве. Это явление требует особого внимания при оценке риска и планировании мер по защите населения и объектов инфраструктуры.

Кроме того, батиметрический рельеф влияет на скорость распространения волн. Глубокие участки способствуют более быстрому движению цунами, тогда как мелководные зоны и континентальные склоны замедляют их, вызывая перераспределение энергии и изменение формы волны. Эти особенности необходимо учитывать при моделировании распространения волн и разработке систем раннего предупреждения. Современные вычислительные модели, такие как COMCOT, позволяют с высокой точностью прогнозировать поведение волн с учётом детального батиметрического рельефа, что значительно повышает эффективность мер по снижению рисков.

Особое значение имеет изучение изохронов минимального времени добегания волн до различных участков побережья. Эти данные позволяют оперативно оценивать, сколько времени есть у населения для эвакуации после возникновения подводного землетрясения. Батиметрический рельеф, влияя на скорость и направление распространения волн, определяет зоны с различным уровнем риска и временем реакции. В районах с крутыми склонами и узкими

заливами время прибытия волн может быть значительно меньше, что требует особой готовности и быстрого реагирования служб спасения.

Важным аспектом является также влияние батиметрических особенностей на формирование локальных морских течений и гидродинамических условий. Подводные хребты и каньоны создают зоны турбулентности и изменяют направление течений, что влияет на распределение осадков, биологическую продуктивность и экосистемы региона. Эти процессы имеют значение не только для природных условий, но и для хозяйственной деятельности, включая рыболовство и судоходство.[7]

Таким образом, батиметрические особенности района Северо-Курильска — глубокий Курило-Камчатский желоб, крутые континентальные склоны, сложная сеть подводных хребтов и каньонов — формируют уникальный подводный рельеф, который оказывает комплексное влияние на природные процессы и безопасность региона. Детальное изучение и моделирование этих особенностей является ключевым для прогнозирования и предупреждения природных катастроф, а также для планирования устойчивого развития прибрежных территорий.

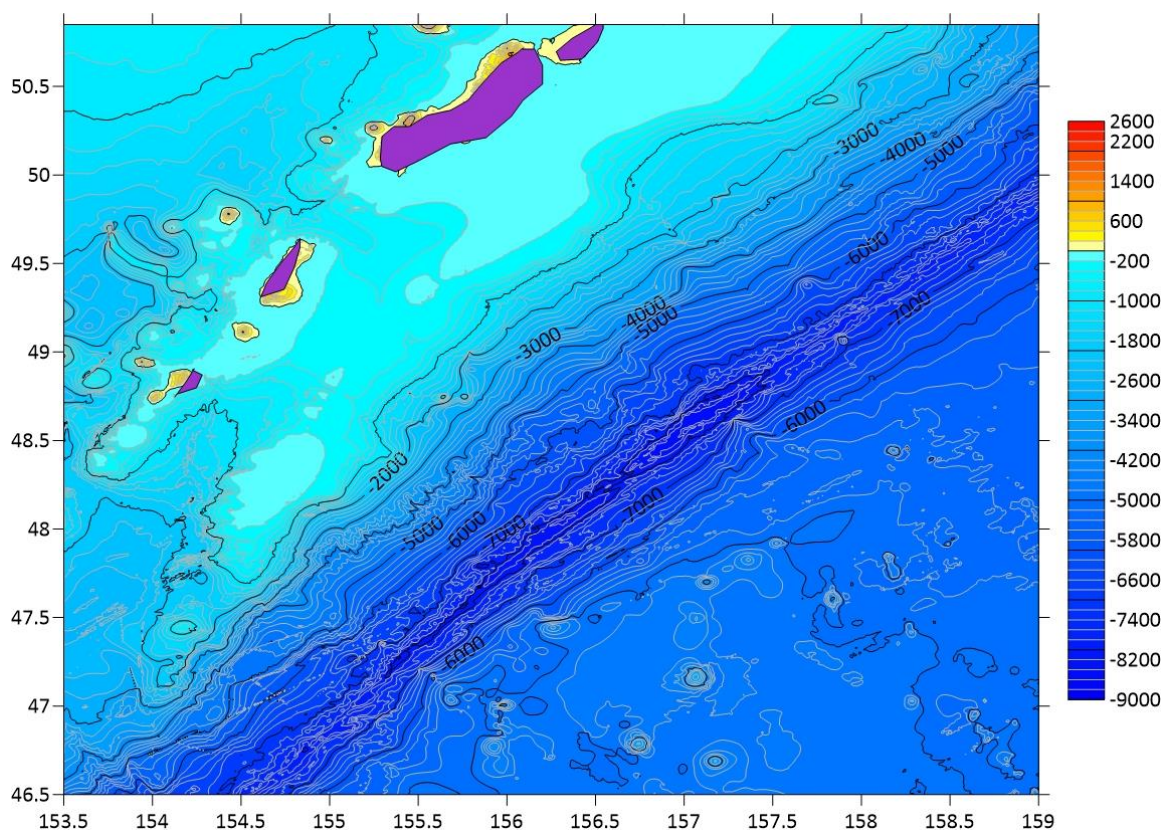


Рисунок 2. - Батиметрическая карта района Курильских островов

2.2 Зоны риска возникновения цунами

Бухта Вторая Курильская (Северо-Курильск)

Северо-Курильск, расположенный в бухте Вторая на острове Парамушир, является одной из самых уязвимых точек Курильской гряды по отношению к цунами. Это связано с открытым положением бухты, что позволяет волнам беспрепятственно набирать силу при подходе к берегу. Во время катастрофического Северо-Курильского цунами 1952 года наибольший ущерб и количество жертв пришлось именно на этот город. Первая волна высотой 8–10 метров достигла города через 35–40 минут после землетрясения, однако самой разрушительной оказалась вторая волна, пришедшая спустя еще 20 минут и достигшая 12–15 метров по свидетельствам очевидцев. Третья волна была слабее, но окончательно разрушила уцелевшие постройки и выбросила на берег множество обломков. Большинство зданий, расположенных в низинах, было полностью уничтожено, а выжили только те,

кто забрался на возвышенности. После трагедии город был практически стерт с лица земли, уцелела лишь небольшая часть построек на возвышенности, а единственный сохранившийся рыбокомбинат находился в заливе Шелехова на западном побережье Парамушира. По разным оценкам, погибло от 1200 до 2300 человек, а всего на Северных Курилах число жертв могло превышать 8000, включая военнослужащих и детей.[10]

Острова Шумшу и Парамушир

Острова Шумшу и Парамушир также подверглись сильнейшему воздействию цунами 1952 года. На этих островах, особенно в районах, где произошёл резкий подъём морского дна у берега, высота волн достигала 20–23 метров. Это объясняется не только мощностью землетрясения, но и особенностями подводного рельефа и тектонической активности региона. По воспоминаниям очевидцев и данным геодезических съёмок, волны на Парамушире в некоторых бухтах достигали 18–20 метров. Здесь располагались многочисленные воинские части и укрепления, часть которых также была уничтожена стихией. После катастрофы выживших жителей и военнослужащих с островов Шумшу и Парамушир эвакуировали к началу 1953 года, а последствия разрушений устранялись еще долгое время.[11]

Пролив между островами (Шумшу и Парамушир)

Особую опасность представляет пролив между Шумшу и Парамуширом. Географические особенности пролива — его сужение и извилистость береговой линии — создают эффект воронки, что приводит к резкому увеличению скорости течений и высоты волн. Волны, проходя через узкие участки, концентрируются, что усиливает их разрушительное действие на прибрежные поселения. Подобный эффект был отмечен не только во время цунами 1952 года, но и в 1960 году, когда волны, усилившись в проливе, нанесли значительный ущерб инфраструктуре и поселениям региона. Сейсмологи отмечают, что такая конфигурация береговой линии и рельефа способствует дополнительному усилению разрушительной силы цунами.

Геологические и тектонические особенности региона

Курильские острова располагаются вдоль Тихоокеанского пояса — одной из самых сейсмоактивных зон мира. Здесь проходит область субдукции, где Тихоокеанская плита погружается под Евразийскую, вызывая частые и мощные землетрясения, которые способны порождать цунами. Скорость движения плит достигает 10 сантиметров в год, что приводит к накоплению напряжений и последующим разрядам в виде сильных толчков и подводных оползней — дополнительных источников цунами. Для возникновения опасных волн магнитуда землетрясения должна быть не ниже 7 баллов, а глубина очага — незначительной. Именно сочетание этих факторов и особенностей рельефа делает Курильские острова уникальной по уровню риска территорией.

Современные методы прогнозирования и предупреждения

Исторически на Курильских островах отсутствовали системы оповещения о цунами, что во многом объясняет высокое число жертв в 1952 году. Сегодня ведутся работы по созданию и совершенствованию систем экспресс-прогноза, основанных на оперативном получении данных о цунами в открытом океане. Современные численные модели позволяют прогнозировать распространение волн и их максимальные амплитуды с достаточной заблаговременностью для эвакуации населения. Однако для повышения точности прогноза требуется развитие сети глубоководных станций измерения уровня океана, что особенно актуально для Курильских островов, где ложные тревоги и недостаток времени на эвакуацию могут стоить жизни тысячам людей.[11]

Исторические и социальные последствия

Цунами 1952 года стало одной из крупнейших природных катастроф в истории СССР. Помимо разрушения городов и поселков, стихия привела к эвакуации населения, массовым жертвам среди гражданских и военных, а также к мародерству и социальным потрясениям. Информация о трагедии долгое время оставалась засекреченной, а точные данные о погибших до сих пор уточняются. Курильские острова остаются единственной территорией

России, где риск возникновения цунами столь высок и требует постоянного внимания со стороны специалистов и служб гражданской защиты.

Зоны риска цунами на Курильских островах определяются не только географией и рельефом, но и высокой тектонической активностью региона. Наиболее опасными считаются открытые бухты, узкие проливы и районы с резким подъёмом морского дна. Современные методы прогнозирования способны снизить ущерб, однако только развитие систем мониторинга и своевременное оповещение могут обеспечить безопасность населения в будущем.

2.3 Интенсивность сейсмической тряски

Район Курильских островов характеризуется высокой сейсмической активностью из-за его расположения на границе Тихоокеанской и Евразийской литосферных плит. Здесь часто происходят землетрясения, интенсивность которых может варьироваться. Например, в последнее время отмечались сейсмические события с магнитудой от 4.3 до 5.6. Эпицентры этих землетрясений располагались вблизи различных островов архипелага, включая Итуруп, Парамушир и Шикотан.[12]

Средняя амплитуда волн цунами в районе Курильских островов обычно составляет от одного до трёх метров. Например, при Северо-Курильском цунами 1952 года высота волн достигала 9–15 метров в районе города Северо-Курильск и отдельных бухт островов Парамушир и Онекотан, однако в большинстве прибрежных зон амплитуда была значительно ниже — около 1–3 метров.[12]

Глубина, на которой возникают эти землетрясения, также различна — от 20 до 77 километров. Это влияет на то, насколько сильно ощущаются толчки на поверхности земли. В некоторых случаях интенсивность сейсмических событий достигает 4–5 баллов, что приводит к ощутимым колебаниям, однако обычно не требует объявления тревоги цунами.[19]

Важно отметить, что такая сейсмическая активность является типичной для данного региона. В связи с этим ведётся постоянный мониторинг, чтобы своевременно предупреждать население и минимизировать возможные риски. Регулярные наблюдения за сейсмической обстановкой позволяют оперативно реагировать на любые изменения и обеспечивать безопасность жителей Курильских островов. [19]

2.4 Выбор математической модели

Математическое моделирование цунами представляет собой процесс создания компьютерных моделей, которые помогают понять, как распространяются длинные волны в океане после подводных землетрясений или других изменений морского дна. В основе таких моделей лежат уравнения, описывающие движение воды, особенно учитывая, что длина волны цунами намного больше глубины океана.[21]

Для моделирования возникновения цунами учитывается смещение дна — оно может рассматриваться как мгновенное поднятие или опускание, либо как более сложное движение, связанное с деформацией земной коры. При расчётах распространения волн обязательно принимается во внимание форма дна и береговой линии, поскольку они сильно влияют на высоту и скорость цунами.[21]

Для решения этих задач применяются специальные численные методы, которые позволяют проследить, как волны движутся и изменяются по мере приближения к берегу. Современные модели также включают вероятностные оценки, что помогает учитывать разные варианты развития событий и создавать более точные прогнозы опасности.[22]

Кроме того, в моделях учитываются дополнительные факторы, такие как изменение формы волн, их взаимодействие с подводными возвышенностями и островами, что делает прогнозы более реалистичными и полезными для предупреждения возможных последствий цунами.[22]

Наиболее распространённой для моделирования цунами является система уравнений мелкой воды (Shallow Water Equations, SWE):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \right\} = - \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - fQ = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + fP = 0 \quad (3)$$

где $P = hu$, $Q = hv$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \right\} = - \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{P^2}{H} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + F_x = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{Q^2}{H} \right\} + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + F_y = 0 \quad (6)$$

где $H = \eta + h$, F_x и F_y – сила трения в направлениях x и y

COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model) — численная модель, разработанная в Корнеллском университете для симуляции цунами и распространения волн в океане. Модель широко применяется для прогнозирования последствий цунами и изучения волновых процессов. COMCOT решает уравнения мелкой воды методом конечных разностей.[20]

Ключевые особенности COMCOT:

Многоуровневый подход (Multi-grid): модель содержит вложенные сетки с разным разрешением, что позволяет эффективно моделировать волновые процессы как в открытом океане, так и в прибрежных зонах.

Полевая сетка применяется для моделирования распространения цунами в океане, а локальные сетки с высоким разрешением — для детального изучения прибрежных участков.[21]

Уравнения мелкой воды: COMCOT моделирует нелинейные уравнения мелкой воды, учитывающие изменение глубины, скорость течения и влияние рельефа морского дна. Модель включает члены, описывающие дисперсию волн, что позволяет моделировать как короткие волны (цунами), так и более длинные.

Суперпозиция: модель обеспечивает несколько уровней вложенных сеток, что важно для моделирования цунами, поскольку волны распространяются на большие расстояния в океане, но требуют высокого разрешения у береговой линии.

Гибкость и адаптивность: COMCOT предлагает различные конфигурации сеток, начальные и граничные условия, что позволяет адаптировать модель под конкретные области и сценарии.[20]

Применение:

COMCOT используется для моделирования исторических цунами, оценки рисков и прогнозирования последствий. Модель также применяется для изучения волновых процессов, таких как отражение, дифракция и взаимодействие волн с береговой линией.[20]

Пример использования:

Для запуска COMCOT необходимо задать начальные условия (например, деформацию морского дна, вызванную землетрясением), граничные условия и параметры сетки.

Реализация:

COMCOT реализован на языке Fortran. Для работы модели требуются входные данные:

- Батиметрия (рельеф морского дна);
- Начальные условия (смещение дна);
- Параметры сетки и временного шага.[20]

Глава 3 Вычислительные эксперименты по расчету распространения волны Цунами

В данной главе представлены расчеты максимальных отклонений поверхности воды, выполненные на основе системы уравнений мелкой воды, которая лежит в основе модели COMCOT. Для численного решения использовалась упрощённая модель с явной разностной схемой, реализованной в виде конечных разностей по пространству и времени.

3.1 Анализ уравнений и численной схемы

В основе расчетов лежат уравнения мелкой воды, описывающие динамику горизонтальных скоростей течения u и v , а также отклонения поверхности η . В коде реализована явная схема с использованием центральных разностей для пространственных производных и явного шага по времени Δt .

Обновление скоростей u и v происходит по формулам, учитывающим градиенты поверхности η и влияние силы Кориолиса f . Обновление поверхности η реализовано через решение тридиагональной системы уравнений, полученной из дискретизации уравнения сохранения массы с учетом потоков, зависящих от глубины h и скоростей u, v . При этом используется метод прогонки с коэффициентами α и β , что обеспечивает эффективное решение системы.

Важным моментом является использование аппроксимаций для расчета потоков $d(Hu)/dx$ и $d(Hv)/dy$, где выбор направления разностной схемы зависит от знака скорости, что повышает численную стабильность и уменьшает численные дисперсии.

3.2 Обоснование численной схемы и параметров расчетной сетки

Для моделирования распространения цунами была использована комбинированная численная схема: явная схема применялась для вычисления скоростей, а неявная — для уровня воды. Временной шаг составил 1 секунду, что соответствует условию устойчивости Куранта-Фридрихса-Леви (CFL).

Выбор явной схемы для скоростей обусловлен ее простотой реализации и эффективностью при решении уравнений мелкой воды, используемых в модели COMCOT, которая, несмотря на упрощения (например, не учитывает дисперсию волн и взаимодействие с ветром), обеспечивает базовую и достаточно точную оценку распространения цунами. Использование неявной схемы для уровня позволяет ослабить жесткие ограничения по времени шага, характерные для полностью явных схем, и повысить численную устойчивость расчетов. Тем не менее, явные схемы требуют соблюдения ограничения по времени шага, связанного с пространственным разрешением и максимальной глубиной, чтобы избежать численной неустойчивости. Это приводит к необходимости выбора малого временного шага, что увеличивает вычислительные затраты, но обеспечивает стабильность и точность расчетов.

Таким образом, комбинированный подход с явной схемой для скоростей и неявной — для уровня воды обеспечивает баланс между точностью, устойчивостью и вычислительной эффективностью, что особенно важно при моделировании распространения малых цунами в районе Курильских островов.

3.3 Анализ полученных результатов

Перейдем к рассмотрению полученных результатов расчетов максимальных отклонений поверхности (рис. 3-14). В первую очередь, необходимо отметить, что численные эксперименты проводились с использованием описанной выше совмещенной схемы, при этом временной шаг составлял 1 секунду, что обеспечивало выполнение условия устойчивости Куранта-Фридрихса-Леви (CFL). Размер расчетной области был выбран

равным 500×500 км, что обеспечивало достаточный охват территории для моделирования распространения волны, исходящей из эпицентра с координатами 46.5° с.ш., 152° в.д., расположенного в 213 км от береговой линии Курильских островов.

Начальная амплитуда уровня в источнике задавалась равной 1.5 метра, что соответствовало моделированию малого цунами для тестирования схемы.

Полученные данные позволяют проанализировать пространственное распределение максимальных отклонений и оценить влияние различных параметров модели на конечный результат. Соблюдение ограничений по шагу по времени и скорости течения обеспечило численную устойчивость расчетов и достоверность полученных результатов, что особенно важно при моделировании волн цунами с учетом реального рельефа дна и особенностей распространения волн в рассматриваемом регионе.

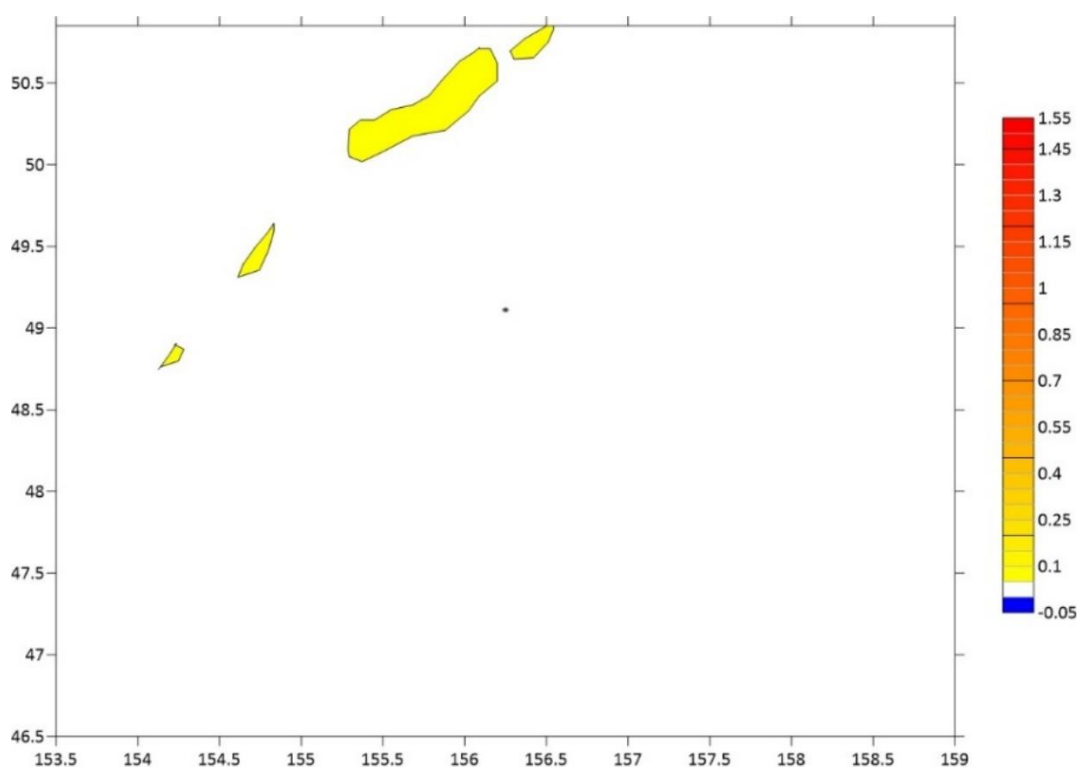


Рисунок 3. – Начальная стадия формирования цунами.

На рисунке изображена начальная стадия моделирования цунами, когда волновое возмущение только формируется и начинает распространяться по акватории. Эпицентр землетрясения, вызвавшего это цунами, расположен на расстоянии 213 километров от береговой линии Курильских островов.

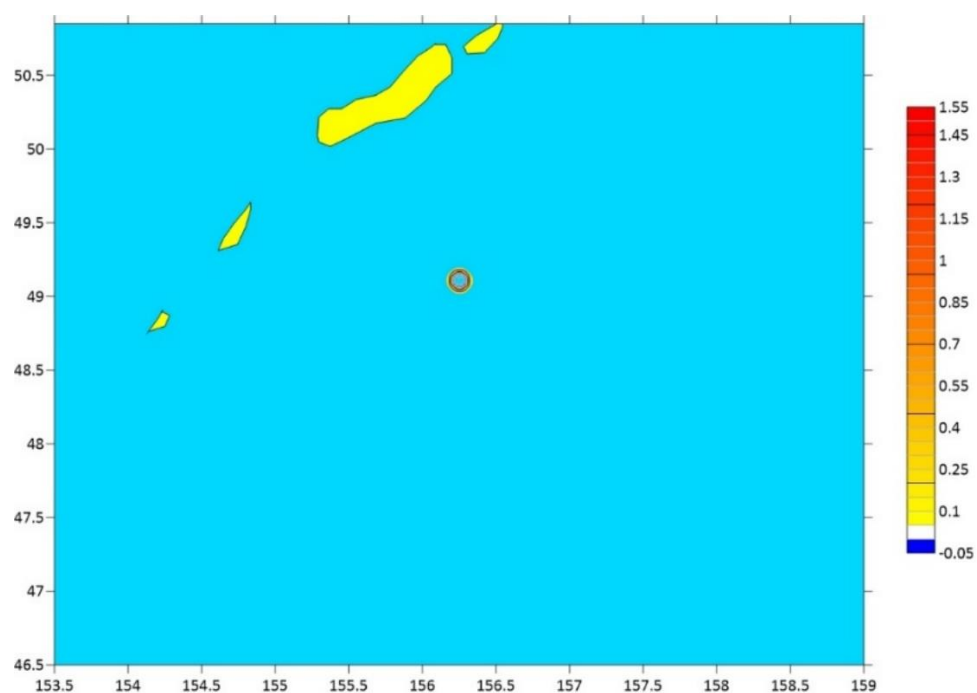
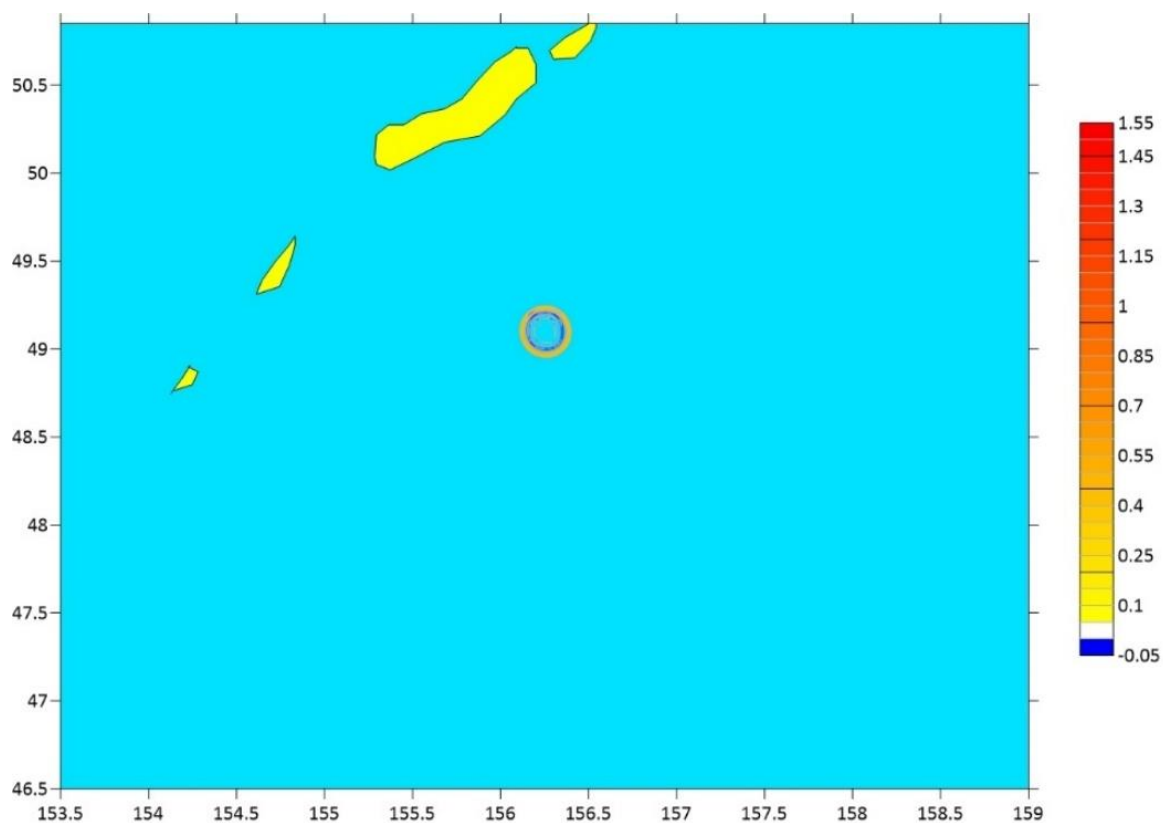


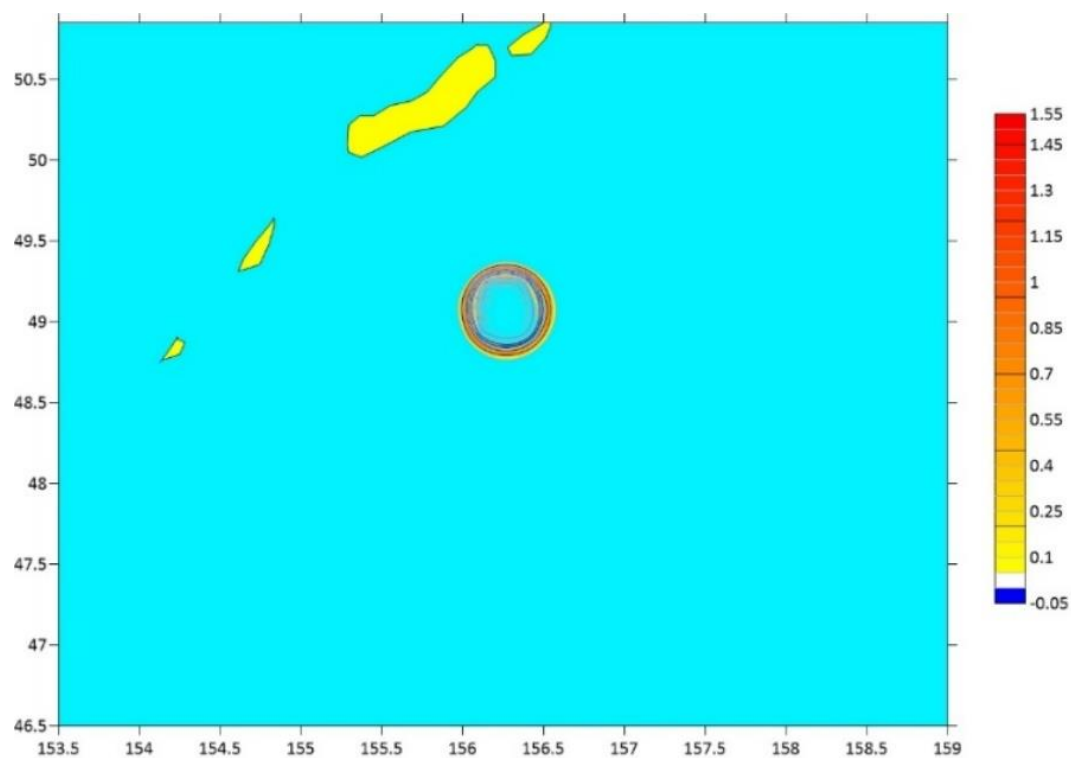
Рисунок 4. – Распределение амплитуды волн цунами на этапе 1 минуты после сейсмического события

Волна начала распространяться от эпицентра, охватывая область радиусом примерно 8 км.



*Рисунок 5. – Распределение амплитуды волн цунами на этапе 2
минуты после сейсмического события*

Распространение волны продолжается, достигая расстояния около
14 км от эпицентра.



*Рисунок 6. – Распределение амплитуды волн цунами на этапе 4
минуты после сейсмического события*

Моделирование распространения цунами спустя 4 минуты после сейсмического события. Волновой фронт находится на расстоянии около 27 км от эпицентра.

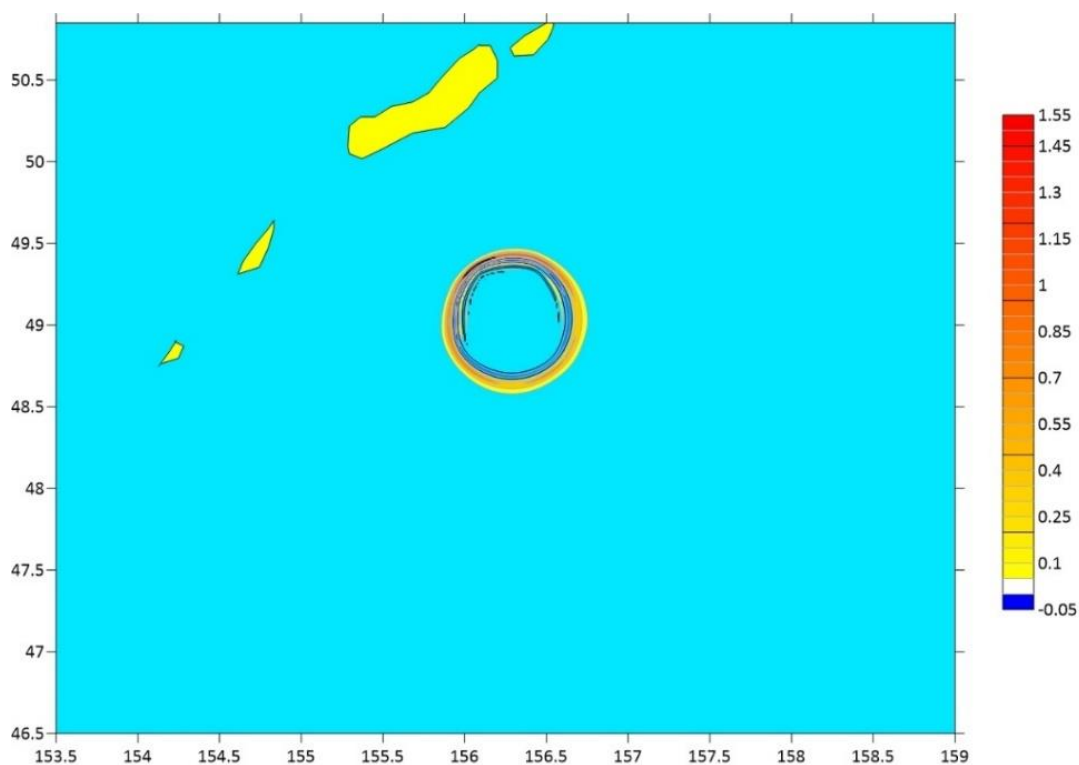


Рисунок 7. – Распределение амплитуды волн цунами на этапе 6 минуты после сейсмического события

Визуализация распространения волны цунами через 6 минут после землетрясения. Волна охватывает область радиусом примерно 38 км от эпицентра.

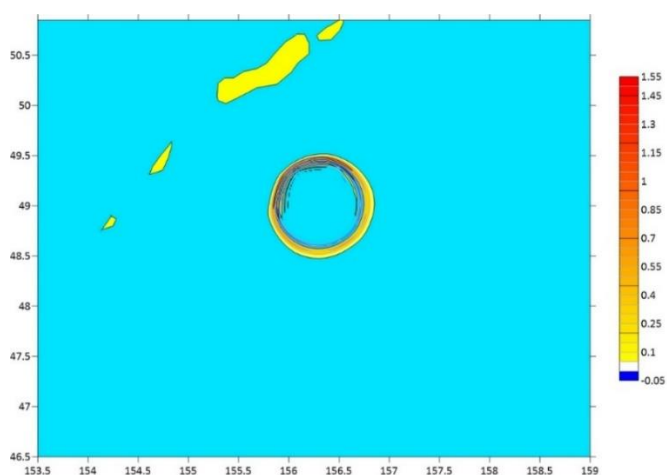


Рисунок 8. – Распределение амплитуды волн цунами на этапе 8 минуты после сейсмического события

Состояние волны цунами через 8 минут после события. Волна продвинулась на расстояние около 48 км от эпицентра.

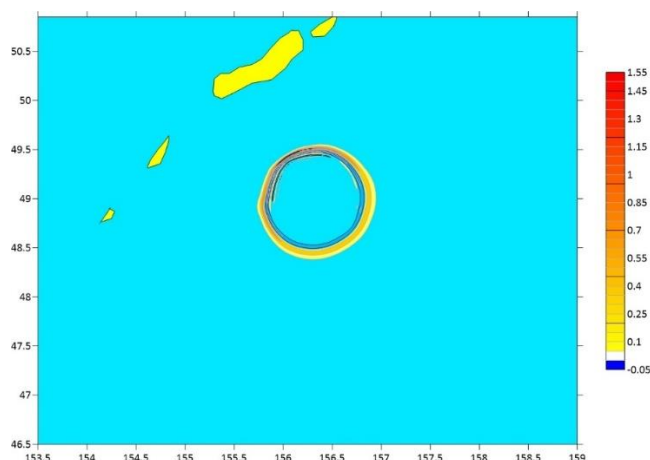


Рисунок 9. – Распределение амплитуды волн цунами на этапе 10 минуты после сейсмического события

Спустя 10 минут волны распространились от эпицентра на 55 км.

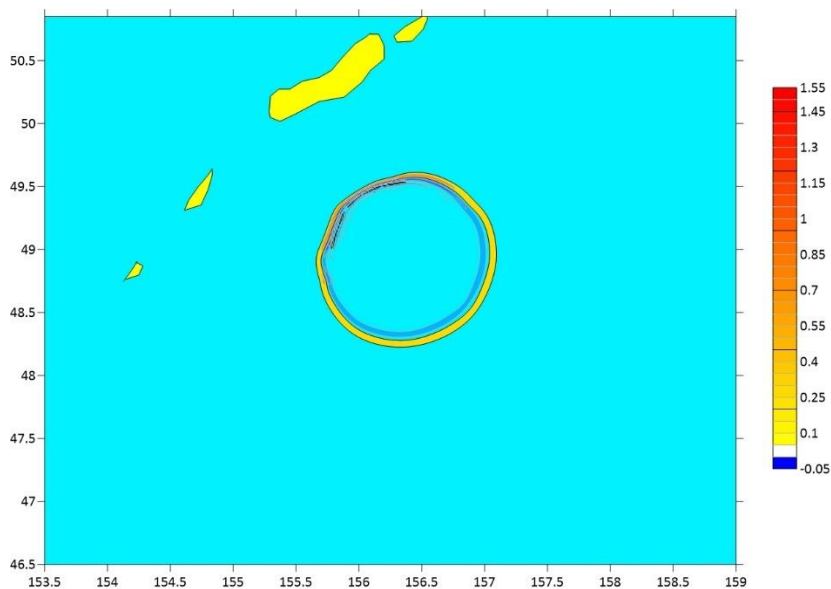


Рисунок 10. – Распределение амплитуды волн цунами на этапе 13 минуты после сейсмического события

Распределение амплитуды волн цунами через 13 минут. Волна достигла расстояния около 68 км от эпицентра.

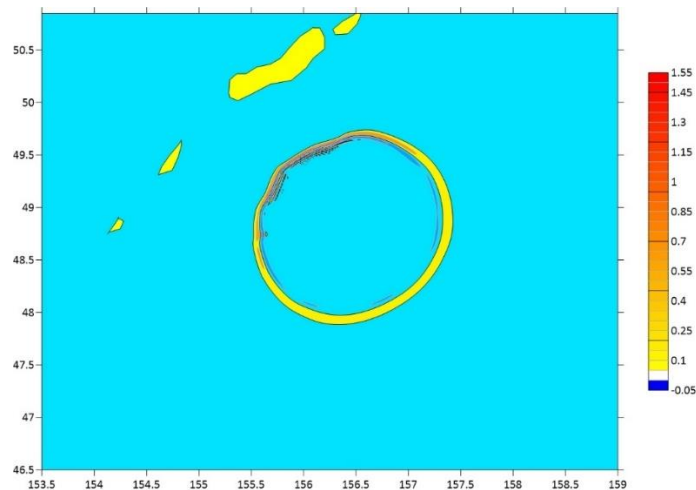


Рисунок 11. – Распределение амплитуды волн цунами на этапе 14 минуты после сейсмического события

Моделирование распространения цунами спустя 14 минут после сейсмического события. Волна охватывает область радиусом примерно 73 км от эпицентра.

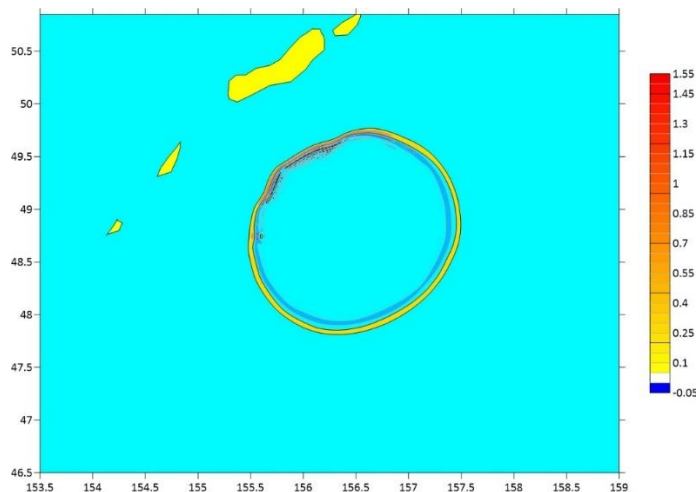


Рисунок 12. – Распределение амплитуды волн цунами на этапе 16 минуты после сейсмического события

Распределение амплитуды волн цунами спустя 16 минут. Волна распространилась на расстояние около 82 км от эпицентра.

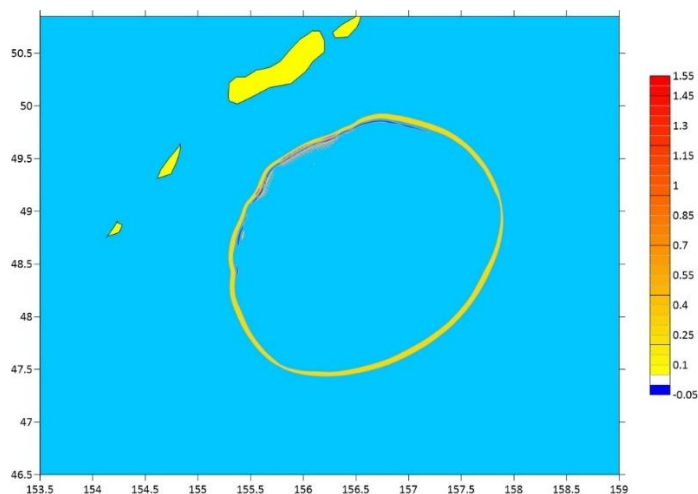


Рисунок 13. – Распределение амплитуды волн цунами на этапе 18 минуты после сейсмического события

Распределение амплитуды волн цунами через 18 минут после землетрясения. Волновой фронт находится на расстоянии около 90 км от эпицентра.

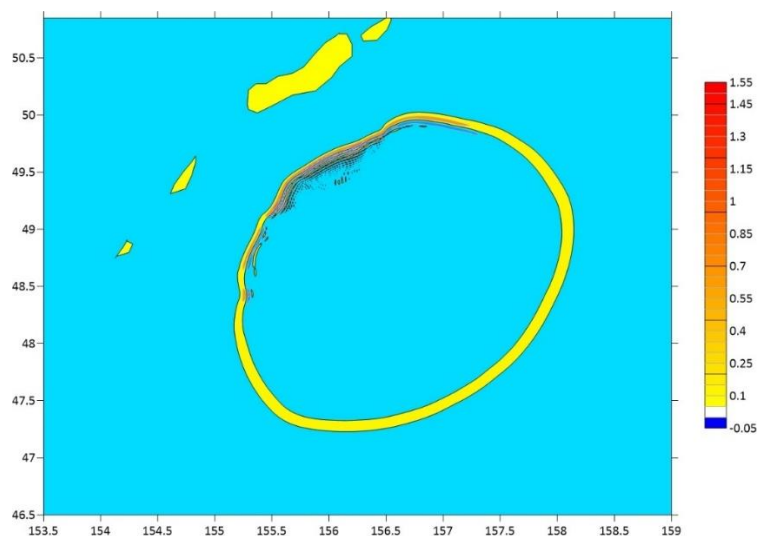


Рисунок 14. – Распределение амплитуды волн цунами на финальном этапе 20 минуты после сейсмического события.

Финальный этап моделирования ($t=20$ минут). Волна цунами распространилась на расстояние около 93 км от эпицентра.

Расстояние между береговой линией и волновым фронтом на последнем этапе моделирования составило 120 км.

Представленная серия изображений демонстрирует процесс моделирования распространения волны цунами, вызванной сейсмическим событием в 213 км от береговой линии Курильских островов. Моделирование охватывает первые 20 минут после землетрясения и показывает динамику распространения волны от эпицентра. В течение этого времени волна цунами распространяется радиально во всех направлениях, сохраняя кольцевую структуру волнового фронта. Скорость распространения волны на начальном этапе достаточно высока, однако постепенно снижается по мере удаления от эпицентра.

В данной модели использована неявная численная схема для решения уравнений мелкой воды. Это означает, что для расчета нового значения высоты поверхности (η) используются значения как с предыдущего, так и с текущего временного шага, что повышает устойчивость численного решения.

Модель также включает в себя нелинейные члены, а именно - инерционные члены в уравнениях движения. Они учитывают, что скорость потока влияет на перенос массы и, следовательно, на распространение волны.

Несмотря на учет этих нелинейностей и использование неявной схемы, необходимо отметить, что максимальная высота волны (η) в данной модели не превышает одного метра.

Представленные результаты позволяют оценить основные характеристики распространения цунами в начальный период, такие как скорость распространения, радиальная структура волнового фронта и распределение η .

Заключение

В данной выпускной квалификационной работе проведено исследование, посвящённое численному моделированию цунами в районе Курильских островов с использованием упрощённой версии модели COMCOT. Работа направлена на изучение процессов генерации, распространения и трансформации волн цунами, а также на оценку их потенциальной опасности для прибрежных территорий.

Основные результаты работы:

Анализ характеристик цунами: изучены общие свойства цунами, их генетические механизмы и особенности распространения. Установлено, что сейсмические цунами, вызванные подводными землетрясениями, являются наиболее опасными для Курило-Камчатского региона.

Географические и сейсмотектонические особенности: рассмотрены географическое положение и сейсмотектонические характеристики Курильских островов, определяющие высокую вероятность возникновения цунами. Особое внимание уделено историческим цунамигенным землетрясениям, таким как события 1952 и 2011 годов.

Методы моделирования: выбрана и применена упрощённая версия модели COMCOT, основанная на уравнениях мелкой воды, для численного моделирования распространения цунами. Проведены расчёты, позволившие визуализировать динамику волн на различных временных этапах.

Результаты моделирования: получены данные о распространении волн цунами в течение первых 20 минут после сейсмического события. Установлено, что волны сохраняют кольцевую структуру фронта, а их скорость и высота зависят от расстояния от эпицентра и рельефа дна.

Выводы:

Упрощённая версия модели COMCOT подтвердила свою эффективность для базовой оценки распространения цунами в условиях сложного рельефа Курильских островов, однако не учитывает все физические процессы, такие как дисперсия волн и взаимодействие с береговой линией.

Результаты моделирования могут быть использованы для разработки систем раннего предупреждения и планирования защитных мероприятий в прибрежных зонах.

Для повышения точности прогнозов необходимо дальнейшее совершенствование модели, включая учёт дополнительных факторов и использование полной версии COMCOT с расширенным набором физических процессов.

Проведённое исследование вносит вклад в развитие методов прогнозирования цунами и способствует повышению безопасности прибрежных территорий Дальнего Востока России.

Список литературы

1. Мурти Т.С. Сейсмические морские волны. Цунами. - Л.: ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ, 1981. - 446 с.
2. Ломницкая, А.С. Введение в сейсмологию. – М.: Недра, 1981. – 264 с.
3. Левин Б.В., Носов М.А. Физика цунами и родственных явлений в океане. М.: Янус-К, 2005. 360 с.
4. Хесс, Э. Морфология океанического дна // В кн.: Физическая геология. — М.: Иностранная литература, 1962. — С. 120-150.
5. Цунами: угрозы и защита [Электронный ресурс] // URL: <https://www.tsunami.org> (дата обращения: 20.11.2024).
6. Канамори, Х. "Цунами и сейсмические волны" // Геофизический журнал, 1983.
7. Курильские острова. География, климат, история, животный мир. Официальный сайт Dive.ru. URL: <https://www.dive.ru/nashi-napravlenija/kurilskie-ostrova> (дата обращения: 3 апреля 2025 года).
8. Лобковский Л.И., Рабинович А.Б., Куликов Е.А. и др. Курильские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. (наблюдения, анализ и численное моделирование) // Океанология. 2009. Т. 49. № 3. С. 181–197.
9. Щетников Н.А. Цунами на побережье Сахалина и Курильских островов по мареографным данным 1952–1968 гг. Владивосток: ДВО АН СССР, 1990. 164 с.
10. Костенко И. С., Зайцев А. И. Проявление чилийского цунами 2010 г. у берегов Сахалина: численное моделирование и сравнительный анализ / И. С. Костенко, А. И. Зайцев // Морские науки. — 2011. — № 1. — С. 1–6.

11. Шикотанское землетрясение и цунами 4–5 октября 1994 года. Научный доклад. URL: http://imgg.ru/uploads/documents/719/Шикотанское_землетрясение_и_цунами_4-5_октября_1994_года.pdf (дата обращения: 4 июня 2025 года).
12. На острове Парамушир остался единственный житель, переживший разрушительное цунами в 1952 году // Российская газета. 2023. 8 мая. URL: <https://rg.ru/2023/05/08/reg-dfo/na-ostrove-paramushir-ostalsia-edinstvennyj-zhitel-perezvivshij-razrushitelnoe-cunami-v-1952-godu.html> (дата обращения: 4 апреля 2025 года).
13. 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. DOI: 10.7868/S2073667317030042.
14. Рабинович А. Б. и др. Наблюдения и моделирование цунами Курильских островов 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. в ближней зоне // *Advances in Geosciences*. — 2008. — Т. 14. — С. 105–116.
15. Иванов А.В., Петров Б.С. Мониторинг цунамигенных землетрясений методами спутниковой геодезии // Геофизические исследования. — 2016. — Т. 17, № 1. — С. 45–58.
16. Цунами: история и археология // CyberLeninka. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsunami> (дата обращения: 30 апреля 2025 года).
17. Гусьяков А.В. Построение обзорных карт цунамирайонирования побережья с использованием вероятностного подхода РТНА [PDF] // Журнал Института цитологии и генетики СО РАН. URL: http://www.ict.nsc.ru/jct/content/t24n1/Gusyaakov_n1.pdf (дата обращения: 30 апреля 2025 года).
18. Система предупреждения о цунами в Тихом океане (МКГ/ИТСУ) [PDF]. URL:

http://tap.pdc.org/TAPResources/Master%20Plan/INF1124_russian.pdf

(дата обращения: 1 мая 2025 года).

19. Ермаков В.А. Тектоническое районирование Курильских островов и проблемы сейсмичности // Геотектоника. — 1997. — Т. 31, № 3. — С. 45–55.

20. Synolakis, C. E., Bernard, E. N., Titov, V. V., Kâno, M., & González, F. I. Tsunami science: The past, present and future. *Oceanography*, 2008, 21(2), 16-27.

21. NOAA Tsunami Research Program. "Tsunami Modeling and Hazard Assessment" — Technical Report, 2020.

22. X. Wang. Numerical modelling of surface and internal waves over shallow and intermediate water. PhD thesis, Cornell University, 2008.