

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра комплексного управления прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему Моделирование наката волн цунами на сухой берег

Исполнитель Стокоз Анастасия Константиновна

Руководитель кандидат географических наук, доцент

Плинка Николай Леонидович

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____



кандидат географических наук, доцент,

Плинка Николай Леонидович

«10» 06 2018г.

Санкт-Петербург

2018

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Сокращения	3
Введение	4
1 Общие сведения о проблеме цунами	6
2 Одномерная модель наката длинных волн на сухой берег	19
2.1 Математическое описание одномерной численной модели	19
2.2 Верификация одномерной модели распространения волны	24
2.3 Моделирование наката волны на сухой берег в одномерном случае с реализацией условия подвижной твердой стенки	29
2.4 Мелкомасштабное цунамирайонирование Южно-Курильской бухты (о. Кунашир) с применением одномерной модели наката	35
3 Двухмерная модель наката длинных волн на сухой берег	40
3.1 Математическое описание двухмерной численной модели	40
3.2 Верификация двухмерной модели наката	44
3.3 Мелкомасштабное цунамирайонирование Южно-Курильской бухты в зоне пгт. Южно-Курильск (о. Кунашир) с применением двухмерной модели наката	48
Заключение	56
Список использованных источников	58
Приложение А «Блок схема одномерной численной модели наката длинных волн»	63

Сокращения

NCEI	–	National Centers for Environmental Information
UTC	–	Всемирное координированное время
МОК	–	Межправительственная Океанографическая Комиссия
PTWS	–	Pacific Tsunami Warning System
PTWC	–	Pacific Tsunami Warning Center
NOAA	–	National Oceanic and Atmospheric Administration
JMA	–	Japan Meteorological Agency
СПЦ	–	Система предупреждения цунами
DART	–	Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis
GITEWS	–	German Indonesian Tsunami Early-Warning System
TUNAMI-N2	–	Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of Near-field tsunamis. No. 2
Пгт.	–	Поселок городского типа
ИМГиГ ДВО	–	Институт Морской Геологии и Геофизики
РАН		Дальневосточное Отделение Российской Академии Наук

Введение

Волны цунами имеют малые амплитуды в открытом океане, но при подходе к берегу подвергаются трансформации, и приводят к затоплению обширных территорий, значительному экономическому ущербу и многочисленным человеческим жертвам.

Последствия цунами носят глобальный характер. Стоит вспомнить цунами 2004 года, произошедшее в Индийском океане, которое привело к гибели более чем 200 тысяч человек, включая туристов со всего мира; или цунами 2011 года в Японии, вследствие которого произошла авария на атомной электростанции, оказавшее воздействие на экологию мира.

Повсеместно в цунамиопасных районах формируются системы предупреждения цунами (СПЦ), цель которых регистрация цунами и предупреждение населения, в рамках функционирования систем выполняются расчеты по определению времени добегания волны и оценки дальности заплеска волны на берег. Оперативный расчет оказывается не всегда возможным, поэтому в качестве превентивных мер часто выполняется цунамирайонирование регионов подверженных цунами.

Определение дальности заплеска цунами требуется для смягчения последствий, вызванных стихийным бедствием в рамках комплексного управления прибрежными зонами.

Наиболее эффективным методом определения величины горизонтального заплеска является численное моделирование. Данный способ активно развивается в последнее время в связи с технологическим прогрессом, но из-за редкости явления, плохой изученности процесса и непредсказуемости универсального решения до сих пор не существует и возникает потребность в разработке новых моделей.

Целью исследования в рамках магистерской диссертации является реализация двумерной численной модели наката длинных волн на сухой берег. Для достижения поставленной цели были выполнены следующие задачи:

- рассмотрение уже имеющихся методов расчета наката, в частности знакомство с линейной теорией наката;
- разработка одномерной численной модели, основанной на уравнениях теории мелкой воды с реализацией условия подвижной стенки, определяющей перемещение уреза применительно к накату волны цунами на сухой берег;
- предварительное построение мелкомасштабной схемы цунамирайонирования Южно-Курильской бухты с использованием одномерной модели;
- разработка численной двумерной модели, основанной на уравнениях теории мелкой воды и реализацией в ходе численного расчета условием подвижной твердой стенки;
- построение схемы цунамирайонирования для зоны пгт. Южно-Курильск при южном и восточном направлениях подхода волны цунами.

1 Общие сведения о проблеме цунами

Явление цунами известно с незапамятных времен. Именно катастрофическому воздействию извержения вулкана и последовавшему после него цунами приписывают ослабление Минойской цивилизации на Крите в 15 в. до н. э.. Само слово цунами в переводе с японского означает «большая волна в гавани», а наиболее полное определение этому явлению дал американский ученый Вильям Ван Дорн в 1968 г. сказав, что «цунами – это система гравитационных волн, возникающих в море вследствие крупномасштабных возмущений свободной поверхности» [1].

Чаще всего волны цунами образуются вследствие сейсмических подвижек дна, но также могут быть вызваны извержением вулкана, оползнями, обвалами. Также имеют место техногенные цунами, вызванные подводными взрывами, и метеоцунами, в связи с резким изменением атмосферного давления.

С точки зрения причинно следственной связи первые упоминания о цунами появились в книге «История Пелопонесской Войны» древнегреческого историка Фукидида в V веке до н. э. [2]. Автор в описании цунами 426 г. до н. э. в Малийском заливе впервые предположил возникновение его вследствие моретрясения. До этого появление цунами чаще всего приписывалось гневу Посейдона [3].

По большей части горизонтальный масштаб источника цунами много больше вертикального [4], вследствие чего формируются так называемые длинные недиспергирующие волны, скорость которых находится в прямой зависимости от глубины и рассчитывается по формуле (1.1)

$$C = \sqrt{g * h}, \quad (1.1)$$

где c – фазовая скорость, м/с;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 h – глубина, м.

При средней глубине океана 4 км волна распространяется со скоростью 200 м/с (720 км/ч). В открытом океане амплитуда волны составляет порядка 1 м, но при подходе к берегу из-за трансформации на мелководье может увеличиваться в несколько десятков раз и приводить к катастрофическим последствиям.

В отличие от многих опасных природных явлений, количество катастрофических цунами невелико: за последние 100 лет только 103 смертоносных цунами обрушились на побережья по всему миру. При этом по данным Национальных центров экологической информации (NCEI) [5], за последние 100 лет цунами унесло жизни более 290 000 миллионов человек. Опасность цунами связана с отсутствием возможности его предсказания. Цунами не признают какого-либо конкретного сезона или времени суток, и, хотя большинство из них происходят в Тихом океане в области Тихоокеанского вулканического огненного кольца, они являются глобальным природным явлением. Взять хотя бы землетрясение и цунами 1755 года у берегов Португалии в Атлантическом океане, унесшее жизни порядка 60 – 70 тысяч человек [6]. Из-за относительной редкости возникновения цунами и малой осведомленности населения о характерных признаках стихийного бедствия, жители португальского побережья посчитали береговую полосу наиболее безопасным местом для укрытия от пожаров и разрушения домов, что и привело к значительным людским потерям.

Прибрежные зоны являются одними из наиболее густонаселенных территорий планеты. По данным книги «Географическая картина мира» 2008

года издания [7] в прибрежной зоне (50 км от уреза) проживает 29% всех людей и в том числе 40% всех городских жителей мира. Особенно велика эта доля в Австралии и Океании (около 80% населения региона), далее следуют Северная Америка, Южная Америка и Европа (30-35%), Азия (27%) и Африка (22%). К числу постоянно проживающего на побережье населения следует также прибавить многочисленных туристов и незарегистрированных жителей, все они могут стать жертвами морской катастрофы.

Самым смертоносным цунами современного мира считается цунами 2004 года в Индийском океане. 26 декабря 2004 года у острова Суматра произошло землетрясение по оценкам Геологической службы США [8] магнитудой 9.1 балл, по своей мощности уступающее лишь землетрясениям в Чили в 1960 г. и на Аляске в 1964 г. (см. таблицу 1.1).

Из-за большой плотности населения в Южно-Азиатском регионе, а также близости эпицентра землетрясения к населенному побережью и за отсутствием на тот момент системы предупреждения о цунами, Индоокеанское цунами 2004 года оказалось самым разрушительным. По разным оценкам погибло 230-300 тысяч человек, включая 9 тысяч туристов. Смертоносная волна достигла берегов Индонезии, Таиланда, Индии, Шри-Ланки и многих других стран бассейна Индийского океана. Разрушения произошли даже в Порт-Элизабет в ЮАР.

Помимо многочисленных жертв среди населения цунами приводят к разрушению зданий и коммуникаций, морских судов, стоящих возле берега, уничтожению почвенного покрова и сельскохозяйственных культур, загрязнению почв и питьевой воды. Так, из-за землетрясения и цунами 2011 года в Японии произошла авария на атомной электростанции Фукусима-1. Волна цунами затопила дизельные генераторы, предназначенные для обеспечения работы систем охлаждения. После чего на станции произошла серия взрывов и выброс радиоактивных веществ в среду с последующим загрязнением почвы, водоемов, питьевой воды и продуктов

Таблица 1.1 – Пять самых сильных землетрясений по оценкам Геологической службы США [8]

	Магнитуда	Местонахождение	Название	Дата	Время (UTC)
1	9.5	Био-Био, Чили	Великое Чилийское землетрясение, Вальдивское землетрясение	1960-05-22	19:11
2	9.2	Южная Аляска, США	Великое Аляскинское землетрясение, Землетрясение в заливе Принца Уильяма	1964-03-28	03:36
3	9.1	Западное побережье о. Суматра, Индонезия	Землетрясение на Суматре-Андаманских островах, Землетрясение в Индийском океане, Землетрясение и цунами на Суматре 2004 г.	2004-12-26	00:58
4	9.1	Восточное побережье о. Хонсю, Япония	Землетрясение Тохоку, Великое восточно-японское землетрясение	2011-03-11	05:46
5	9.0	Восточное побережье п-ова Камчатка, Россия	Камчатское землетрясение 1952 г., Цунами в Северо-Курильске	1952-11-04	16:58

Повсеместная угроза возникновения цунами стимулировало создание систем раннего предупреждения о цунами. Первые попытки были предприняты в 1920-х годах на Гавайях. Сильные цунами 1960 г. в Чили и 1964 г. на Аляске придали новый импульс развитию систем предупреждения. Так в 1965 году под эгидой Межправительственной океанографической комиссии (МОК) ЮНЕСКО была основана Тихоокеанская система предупреждения и смягчения последствий цунами (PTWS) [9]. Также было утверждено создание международного оперативного центра предупреждения о цунами в Тихом океане на Гавайях (PTWC) [10]. Работу центра обеспечивает Национальное управление по океану и атмосфере США (NOAA), при этом действия центра координируются с Японским метеорологическим агентством (JMA) [11] и Геофизической службой Российской академии наук [12]. Перед центром стоят задачи регистрации цунами и оповещение стран, которым грозит опасность.

Для Российской Федерации наиболее подвержены риску возникновения цунами регионы Дальнего Востока: побережья Камчатского края, Сахалинской области, Приморского края, и намного реже Хабаровского края и Магаданской области. Очаги наиболее опасных (близких) цунами, угрожающие Дальнему Востоку России, сосредоточены в районе глубоководного Курило-Камчатского желоба. В то же время побережье Курило-Камчатской зоны может подвергаться воздействию и «дальних» цунами, возникающих у западного побережья Латинской Америки (см. рисунок 1.1). Так, спустя 22-25 часов после случившегося у берегов Чили в 1960 году землетрясения магнитудой 9.5 баллов [8] до побережья Камчатки, преодолев порядка 15 000 км, дошли волны цунами высотой 6-7 метров. В районе Халактырского пляжа максимальная высота волны составляла 15 метров [13].

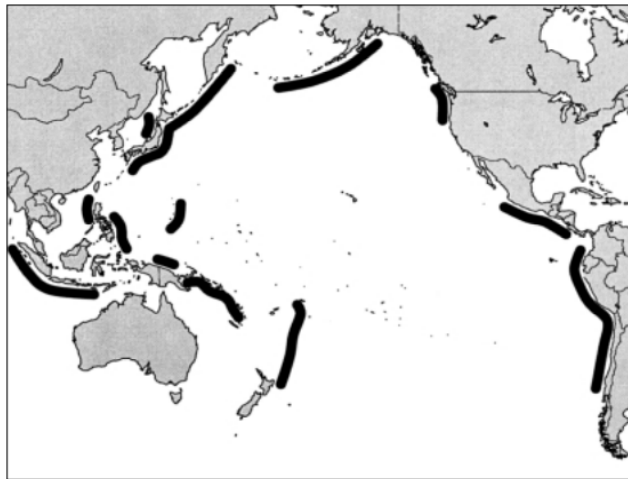


Рисунок 1.1 – Крупные цунамигенные сейсмические зоны в Тихоокеанском регионе

Создание системы предупреждения о цунами на территории Российской Федерации связано с произошедшим в 1952 г. Камчатским землетрясением и последовавшим цунами уничтожившим город Северо-Курильск на острове Парамушир. После этого вышло постановление правительства об организации службы предупреждения цунами. Начали свое наблюдение сейсмические станции «Южно-Сахалинск» на о. Сахалин, «Петропавловск» на п-ове Камчатка и четыре станции на Курильских островах, открылись цунамистанции и мареографные установки, за наблюдениями были привлечены все метеостанции, создавались круглосуточные наблюдательные группы [14]. Однако подавляющее количество предупреждений на практике оказывались ложными. В девяностых годах в связи с экономическим и политическим кризисом СПЦ приходила в упадок и только после цунами 2004 г в Индийском океане начались мероприятия по модернизации системы предупреждения о цунами в России.

По информации на официальном сайте Российской службы предупреждения о цунами [14] на настоящий момент СПЦ Российской федерации объединяет (см. рисунок 1.2):

- 11 специализированных широкополосных цифровых сейсмических станций с сейсмическими микрогруппами;
- 16 пунктов регистрации станций сильных движений;
- 3 региональных сейсмических информационно-обрабатывающих центра, находящихся в Южно-Сахалинске, Петропавловск-Камчатском и Северо-Курильске;
- 23 береговых автоматизированных уровенных поста;
- 3 территориальных Центра предупреждения о цунами в Южно-Сахалинске, Петропавловск-Камчатском и Владивостоке;
- комплекс донной гидрофизической станции в открытом океане DART II;
- высокоскоростные каналы сбора и распространения информации;
- современные технологии и средства для оповещения об угрозе цунами.

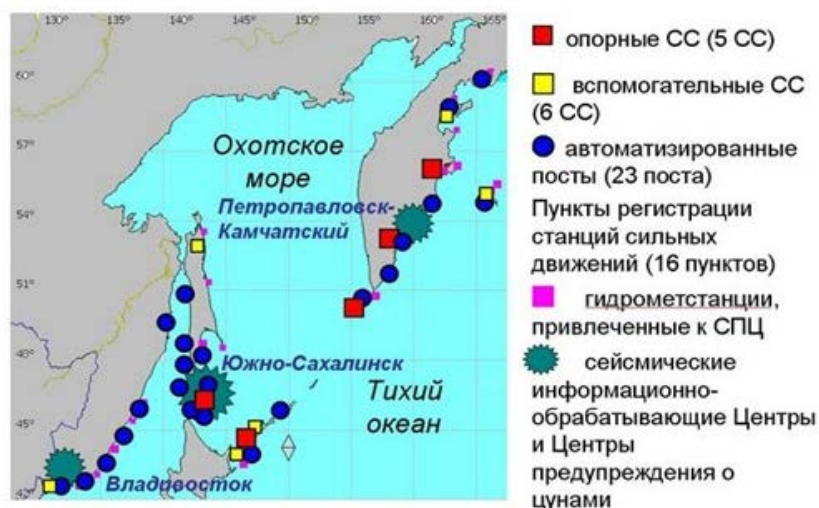


Рисунок 1.2 – Полный состав системы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке Российской Федерации [14]

Принятие решений об объявлении тревоги осуществляется на основе магнитно-географического метода. Сейсмическая информация поступает в обрабатывающий центр, рассчитываются эпицентр землетрясения, глубина залегания гипоцентра и магнитуда. При условии, что эпицентр находится в цунамигенной области, а значение магнитуды превышает критическое, объявляется тревога. Сейсмических данных недостаточно, чтобы обосновать тревогу с большой вероятностью, поэтому система предупреждения о цунами дополняется постоянным мониторингом уровня свободной поверхности на глубоководных станциях и береговых мареографах. Угроза цунами отменяется в том случае, если приход волны цунами не был зарегистрирован на станциях в расчетное время.

На Дальнем востоке нашла свое применение система предупреждения о цунами DART II, разработанная специалистами NOAA (США) [15]. Система представляет собой сеть буйковых станций с донными датчиками гидростатического давления, расположенных преимущественно в Тихом океане [16]. Глубоководные датчики давления передают полученную информацию об уровне свободной поверхности на буй, оснащенный передаточным устройством. Посредством глобальной спутниковой связи «Иридиум» данные поступают в центр цунами, где выполняется более точная оценка риска цунами.

В Индийском океане функционирует несколько иная система предупреждения. Система GITEWS [17] была разработана консорциумом специалистов из Германии и Индонезии после цунами, произошедшего в 2004 году. Система была разработана специально для Юго-восточного азиатского региона, из-за специфической геологической ситуации, а именно близости островного государства Индонезия к зоне субдукции. Первоначально система GITEWS, так же как и DART II, включала буйковые уровенные станции, на практике оказалось, что в данном регионе они малоэффективны, поэтому они были выведены дальше в море для возможного обнаружения цунами, угрожающего остальным странам Индийского бассейна. На данный момент

система состоит из сети сейсмологических датчиков, которые определяют факт возникновения землетрясения, и факт вертикального смещения дна, способного произвести цунами. На побережьях установлен комплекс мареографов с GPS составляющей, производящий мониторинг уровня свободной поверхности в режиме реального времени. Для полноты картины, полученная в течение первых пяти минут информация используется в качестве начальных данных в математическом моделировании распространения волны и вероятного заплеска.

Важной компонентой систем предупреждения, в частности GITEWS, является оперативный расчет характеристик цунами посредством компьютерного моделирования. Простейший случай расчета времени добегания волны может быть выполнен с применением лучевой теории, в связи с тем, что скорость длинной волны зависит только от глубины. Но на практике более важной характеристикой является величина горизонтального заплеска в определенной точке побережья.

В оперативном режиме решить данную проблему несколько затруднительно. Во-первых, это связано с необходимостью выполнения больших объемов вычислений, во-вторых, с недостатком данных о характеристиках очага и, в-третьих, с неполнотой физико-математического описания процесса наката волны на берег.

Из-за того, что существование волны подразделяют на три этапа: генерация, распространение и накат, расчет всех трех стадий представляет собой трудозатратный процесс, в то время как скорость принятия решения является ключевым фактором в системе предупреждения. Поэтому в регионах близких к зонам субдукции, например Японские острова и Индонезийский архипелаг, практикуют формирование баз данных возможных сценариев развития цунами. Путем статистического анализа определяется повторяемость возникновения очагов цунами, заранее для разных начальных условий рассчитываются характеристики длинной волны. Результаты расчетов сведены

в единую базу данных, и при возникновении угрозы выбирается подходящий сценарий.

Кроме того, для оперативных расчетов применяют связанный комплекс моделей, каждая из которых предназначена для расчета определенной стадии существования волны.

Процесс генерации цунами сейсмического происхождения обычно не описывается напрямую. Для получения информации о поднятии уровня свободной поверхности в очаге цунами используются данные об остаточной деформации дна. Значения остаточной деформации дна могут быть рассчитаны как аналитическим методом [18], так и получены сетью сейсмологических датчиков с GPS составляющей, например, как практикуется в системе GITEWS. Из предположения, что форма возмущения на поверхности океана в очаге повторяет деформацию дна, получаем начальное возвышение. На официальном сайте Геологической службы США [19] в открытом доступе имеются данные об остаточной деформации дна большинства крупных землетрясений, отвечающие требованиям численного моделирования.

Для корректировки неточностей расчетов связанных с нехваткой данных об источнике цунами используется информация об изменении уровня свободной поверхности, регистрируемая буйковыми станциями, например, DART II.

Что же касается моделирования распространения волны, эта задача, в настоящее время, не вызывает трудностей. В большинстве случаев расчет характеристик основан на теории длинных волн, известной как теории мелкой воды.

Система уравнений мелкой воды получается из уравнения Навье-Стокса. В работе [20] представлен подробный вывод теории мелкой воды и получена система (1.2) описывающая распространение длинноволновых возмущений, таких как сейши, приливы, цунами, нагонные явления и другие.

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} = \Omega V - g(h + \xi) \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{(h + \xi)}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \tau_x^{(1)} - \tau_x^{(2)} \\ \frac{\partial V}{\partial t} = \Omega U - g(h + \xi) \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{(h + \xi)}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial y} + \tau_y^{(1)} - \tau_y^{(2)} \\ \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial \xi}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

где

- U – компонента полного потока по оси x , m^2/c^2 ;
- V – компонента полного потока по оси y , m^2/c^2 ;
- ξ – возмущение свободной поверхности, м;
- Ω – параметр Кориолиса, m/c^2 ;
- P_a – атмосферное давления, гПа;
- ρ – плотность, kg/m^3 ;
- $\tau_x^{(1)}$ – касательное напряжение ветра на поверхности, N/m^2 ;
- $\tau_x^{(2)}$ – сила трения у дна, N/m^2 .

Первые работы по моделированию распространения длинной волны в океане были выполнены в 70-х годах японскими учеными К. Абе и И. Айда [21 – 24]. В настоящее время существует достаточно численных моделей распространения, наиболее известная из которых «TUNAMI-N2» [25], разработанная опять-таки японскими специалистами Т. Такахаши в исходном варианте и Ф. Имамурой, в усовершенствованном.

Однако одной из нерешенных проблем численного моделирования является описание взаимодействия волны с берегом. Часто в моделях распространения волны в качестве граничного условия у берега используется условие непротекания, хотя определение зоны затопления является одним из наиболее важных критериев в системе предупреждения.

Одной из сложностей моделирования наката является низкое разрешение сетки рельефа берега. Прибрежная зона, включающая в себя часть моря и суши,

является динамической областью в некоторых случаях с эффектами эрозии и аккумуляции. В свободном доступе на сайте Национального центра геофизических данных NOAA [26] предлагается сетка разрешением 1 км, в редких случаях имеются сетки с разрешением 50 м,

К тому же без внимания остается тип берега. Так, например, в районах с густой растительностью величина горизонтального заплеска волны будет значительно меньше, чем в открытых областях. Более того часть энергии будет отражена береговыми постройками, которые так же не указаны на топографических картах. Из чего следует, что точное описание наката длинной волны на сухой берег возможно *только для отдельных мелкомасштабных областей.*

Следующая проблема связана с изменением формы волны при подходе к берегу. Существует два типа наката волны: плавное (медленное) подтопление берега и обрушение волны. В 25% случаев имеет место второй тип [27]. После обрушения волна теряет часть энергии, а на берег движется уже неуправляемая вертикальная стена воды – бор. Как известно, моделирование ударной волны требует специального подхода и является достаточно сложным процессом. Из-за потери энергии волна не достигает предельной дальности заплеска, но, в тоже время, может приносить большой ущерб. В связи с этим представляется логичным *определение зон с высокой вероятностью обрушения волны*, для выработки определенных мер по защите населения и имущества.

При попытке моделирования наката происходит переход области расчета в зону отрицательных или нулевых глубин, где численные методы решения теории мелкой воды не работают. Хотя процесс взаимодействия волны с берегом является трудным в описании, было выполнено немало работ на эту тему [28], и предложены разные способы решения проблемы.

Например, в работе [29] предложен метод численного моделирования наката волн на берег с использованием специального алгоритма для

определения подвижной точки уреза, основанном на законах сохранения массы и энергии.

Кроме того, имеются работы, посвященные разработке аналитического решения проблемы наката. В работе [30] выполненной в 1958 году Карьером и Гринспаном получено аналитическое решение нелинейных уравнений теории длинных волн. В исследовании Синлакиса [31] сделан вывод о подобии аналитических решений линейных и нелинейных уравнений мелкой воды. Следующие труды [32, 33] Пелиновского, Мазовой и Диденкуловой представляют выводы линейной теории наката, основанной на предположении, что высота вертикального заплеска соответствует значению высоты волны на урезе.

В работе [34] выполнено сравнение трех методов расчета наката в одномерном виде: метода сквозного счета, с использованием подвижной сетки и применение модифицированного уравнения мелкой воды. Параметры распространения волны рассчитываются посредством обыкновенной двумерной модели с условием полного отражения на берегу. На некоторой изобате в отдалении от берега определяются характеристики цунами, такие как возмущение свободной поверхности и скорость. Эти значения впоследствии используются в качестве начальных данных для одномерной численной модели наката вдоль заданного сечения. Сравнение демонстрирует, что все численные результаты неплохо согласуются с экспериментальными данными. В свою очередь расчет с использованием подвижного уреза подходит для определения предельной дальности заплеска «с запасом».

Но к настоящему моменту отсутствует универсальная численная модель наката длинной волны, и многие численные модели, хорошо зарекомендовавшие себя в одной области расчета, могут быть неприменимы к другой, что делает востребованным разработку новых расчетных моделей.

2 Одномерная модель наката длинной волны на сухой берег

2.1 Математическое описание одномерной численной модели

Простейший случай рассмотрения задачи наката сводится к решению одномерной системы уравнений мелкой воды. Двухмерная система уравнений (1.2) приводится к одномерному виду из предположения, что волна движется вдоль оси x по нормали к берегу.

Последними слагаемыми уравнений (1.2) – силой вязкости на поверхности и у дна, градиентом атмосферного давления и силой Кориолиса, было решено пренебречь из-за незначительного вклада в процесс распространения волны. Также было решено пренебречь эффектом нелинейности, результаты оценки влияния которого на характеристики распространения и наката волны представлены в работе [35].

В итоге для определения значения предельного заплеска система уравнений мелкой воды (1.2) для расчета характеристик длинноволновых колебаний сводится к упрощенному одномерному линеаризованному виду (2.1):

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} = -gh \frac{\partial \xi}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{\partial \xi}{\partial t} \end{cases} \quad (2.1)$$

В численной модели расчет параметров длинной волны выполняется посредством «шахматной» конечно-разностной сетки (см. рисунок 2.1) с шагом по времени Δt и по пространству Δx .

Для устойчивого решения на величину шага по времени и пространству накладывается ограничение, известное как условие Куранта (2.2). Физический смысл которого заключается в том, что скорость распространения волны, не должна превышать вычислительную скорость на сетке [36].

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} \geq c_{max} \quad (2.2)$$

где c_{max} – максимальная фазовая скорость в расчетной области, м/с;
 Δx – шаг по пространству, м;
 Δt – шаг по времени, с.

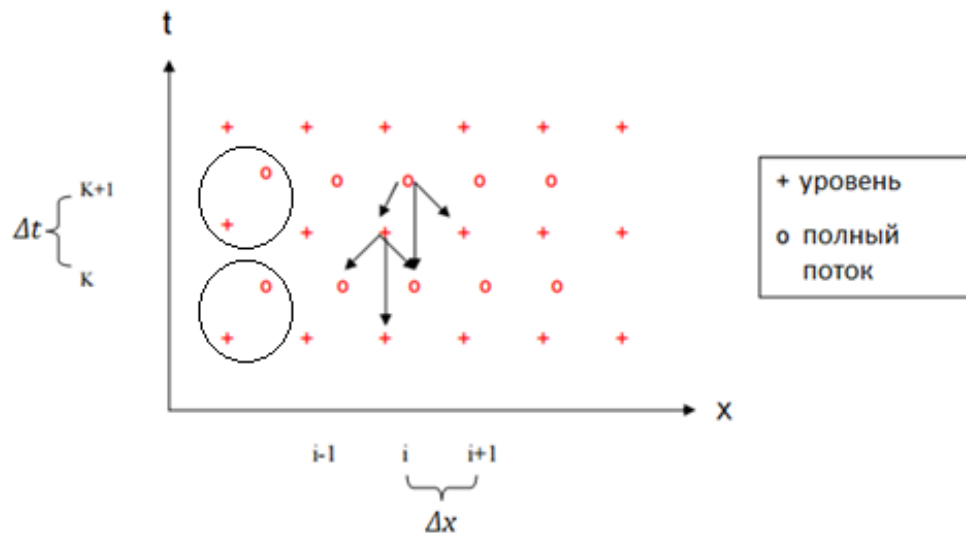


Рисунок 2.1 – «Шахматная» конечно-разностная сетка [37]

Для выполнения численных расчетов уравнения мелкой воды преобразуется в конечно-разностный вид (2.3). Путем выражения значений полного потока и уровня свободной поверхности на следующем шаге по времени (с индексом $k+1$) получены выражения (2.4) применимые в численном моделировании.

$$\begin{cases} \frac{U_i^{k+1} - U_i^k}{\Delta t} + gh_i \frac{\xi_{i+1}^k - \xi_i^k}{\Delta x} = 0 \\ \frac{\xi_i^{k+1} - \xi_i^k}{\Delta t} + \frac{U_i^k - U_{i-1}^k}{\Delta x} = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\begin{cases} U_i^{k+1} = U_i^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} gh_i (\xi_{i+1}^k - \xi_i^k) \\ \xi_i^{k+1} = \xi_i^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} (U_i^k - U_{i-1}^k) \end{cases} \quad (2.4)$$

где i – индекс шага по пространству;
 k – индекс шага по времени.

Для получения единственно верного решения необходимо задание начальных и граничных условий. Физически это выражается в описании поведения волны в начальный момент времени и на границах расчетной области. В качестве начального условия принимается отсутствие возмущения свободной поверхности, выражаемое равенствами (2.5).

$$\begin{aligned} U_i^{k=1} &= 0 \\ \xi_i^{k=1} &= 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

В качестве граничных условий выделяют условия на урезе описывающие характер взаимодействия волны с берегом, и на границе с открытым морем.

Через жидкую границу происходит распространение волны в расчетную область. Более того оно подбирается таким образом, чтобы отраженная от берега волна беспрепятственно излучалась из области расчета. В общем виде граничное условие на жидкой границе представляет собой сумму падающей и отраженной волн [37] (2.6).

$$\xi(x, t) = f\left(t - \frac{x}{c}\right) + \psi\left(t + \frac{x}{c}\right) \quad (2.6)$$

где f – функция, описывающая форму падающей волны;
 ψ – функция, описывающая форму отраженной волны.

Путем дифференцирования уравнения (2.6) по пространству и времени, и вычитания полученных уравнений одного из другого, выводим выражение в конечно разностном виде (2.7), удовлетворяющее заданным условиям на жидкой границе.

$$\xi_{i=1}^{k+1} = \frac{\xi_{i=1}^k + \frac{\Delta t}{\Delta x} c \xi_{i=2}^{k+1} + 2\Delta t p f^i}{1 + c \frac{\Delta t}{\Delta x}} \quad (2.7)$$

В выражении (2.7) параметр f описывает форму волны. В упрощенном теоретическом случае волна задается в виде полусинусоиды и выражается формулой (2.8). В случае если в моделировании применяются реальные данные об изменении уровня свободной поверхности, полученные с мареографов или рассчитанные отдельными моделями распространения волны, то в качестве информации о форме входящей волны используется мареограмма.

$$f^i = A\omega \cos(\omega t^k) \quad (2.8)$$

где A – амплитуда волны, м;
 ω – частота волны, с⁻¹;
 t^k – момент времени на k-ом шаге, с.

В качестве граничного условия на урезе применяется приближение твердой стенки, физически описывающее отвесный берег, реализующееся условием полного отражения, и выраженное равенством (2.9)

$$U_{i=M}^k = 0 \quad (2.9)$$

где M – крайняя расчетная точка в пространстве

Для определения величины заплеска волны на берег в работе применяется условие подвижной твердой стенки. Перемещение твердой стенки, определяющей местоположение уреза, происходит, если уровень моря на урезе превышает значение высоты берега на следующем шаге по пространству. Продвижение уреза вглубь суши описывает затопления береговой зоны. Схематично алгоритм перемещения уреза представлен на рисунке 2.2.

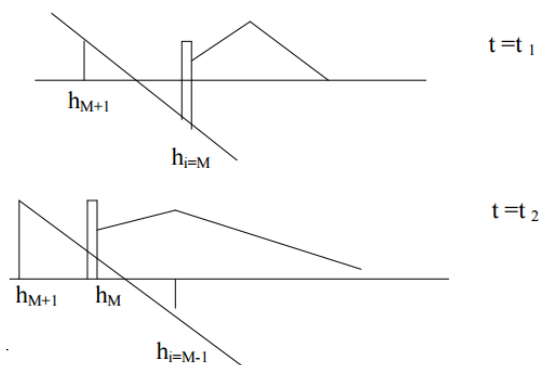


Рисунок 2.2 – Механизм перемещения подвижной стенки [37]

После достижения значения максимального заплеска вектор полного потока изменяет свой знак на противоположный, таким образом, в расчете начинается этап отката волны с вероятностью осушки дна. Перемещение твердой стенки происходит, если уровень свободной поверхности равен либо меньше высоты берега.

Полный цикл перемещения уреза заканчивается возвращением уреза в исходное положение и восстановлением уровня свободной поверхности до невозбужденного состояния. Алгоритм расчета одномерной численной модели представлен в приложении А.

2.2 Верификация одномерной модели распространения волны

Перед тем как включить в расчет условие подвижной стенки одномерная модель распространения волны была подвержена верификации. Было выполнено три эксперимента по расчету характеристик распространения волны в областях с разными типами рельефа дна: с постоянной глубиной (см. рисунок 2.3 а), дном «ступенькой» (см. рисунок 2.3 б), и дном постоянного уклона (см. рисунок 2.3 в).

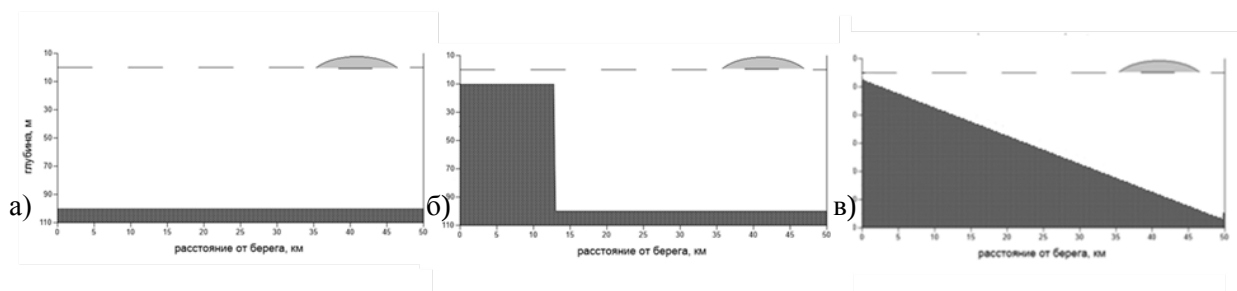


Рисунок 2.3 – Рассматриваемые рельефы дна: а) дно постоянной глубины, б) ступенчатое дно, в) дно постоянного уклона.

Расчет происходит таким образом, что волна распространяется в расчетную область через правую жидкую границу и отражается от неподвижной твердой стенки на левой границе.

В первом эксперименте для расчета характеристик распространения длинной волны применяется профиль дна постоянной глубины 100м. Распространение волны происходит без изменения амплитуды и формы волны (см. рисунок 2.4) за счет пренебрежения в основном уравнении (2.1) силами

вязкости и эффектом нелинейности в связи с их относительно малым вкладом в общий процесс. У твердой стенки при заданном условии непротекания (2.9) происходит полное отражение волны с удвоением амплитуды на стенке. Скорость распространения волны в численной модели равна 31.3 м/с и соответствует решению уравнения (1.1) при глубине 100 м.

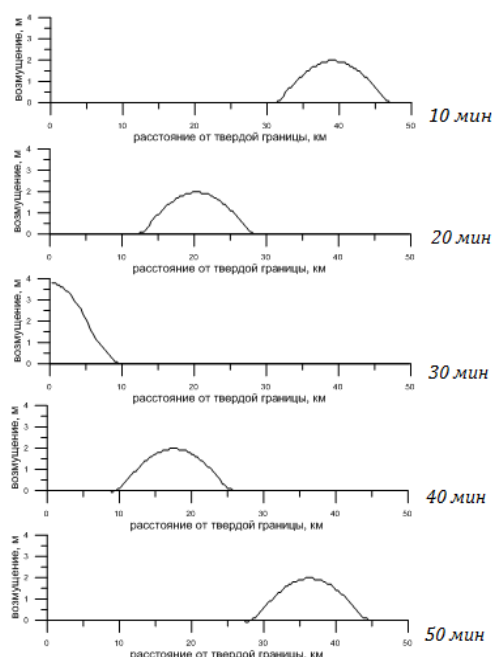


Рисунок 2.4 – Распространение волны в расчетной области с постоянной глубиной

В следующем эксперименте расчет распространения волны произведен при ступенчатом профиле дна, на рисунке 2.5 представлены результаты моделирования, жирной линией обозначено местонахождение ступеньки на профиле дна. При прохождении волной ступеньки происходит разделение падающей волны на проходящую и отраженную. Характеристикой интенсивности отражения является коэффициент отражения и определяется как отношение амплитуд отраженной и падающей волн (2.10). Амплитуда падающей волны на глубине 100 м задана равной 2 м, по результатам численного моделирования амплитуда отраженной волны составила 1 м, из

чего следует, что коэффициент отражения при прохождении ступеньки равен 0.5.

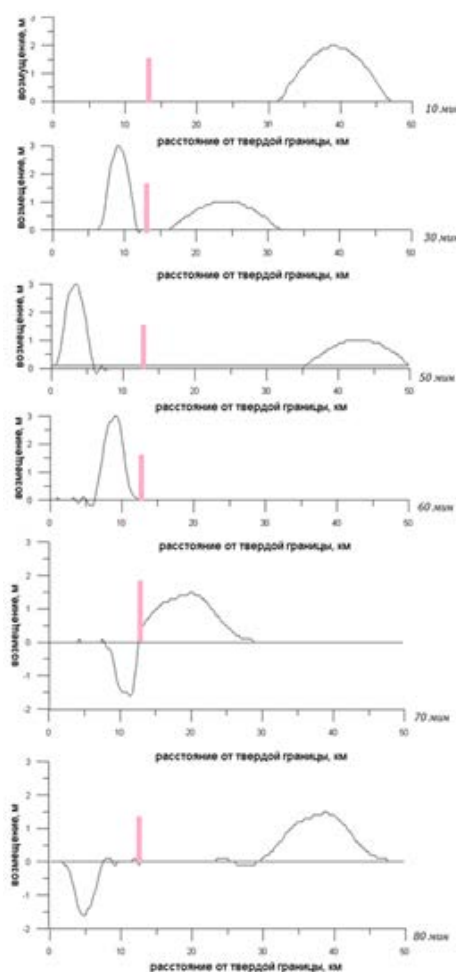


Рисунок 2.5 – Распространение волны в расчетной области со ступенчатым дном

Для проверки точности вычисления коэффициент отражения также рассчитывается по формуле (2.11). При глубинах 100 м в глубоководной части и 10 м в мелководной коэффициент отражения равен 0.5. Что подтверждает корректность произведенного расчета.

При прохождении волны ступеньки из мелководной области в глубоководную коэффициент отражения оказывается отрицательным, а отраженная волна представляет собой отрицательную денивелиацию уровня. В

области мелководья формируется стоячая волна, постепенно затухающая со временем.

$$r = \frac{\xi_{\text{отраз}}}{\xi_{\text{пад}}} \quad (2.10)$$

где r – коэффициент отражения;
 $\xi_{\text{отраз}}$ – амплитуда отраженной волны, м;
 $\xi_{\text{пад}}$ – амплитуда падающей волны, м;

$$r = \frac{\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2}}{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}} \quad (2.11)$$

где h_1 – глубина в области из которой распространяется волна, м;
 h_2 – глубина в области куда распространяется волна, м.

В качестве профиля дна для третьего эксперимента использовано дно постоянного уклона. Отражение волны при прохождении ступеньки не происходит, так как отношение горизонтального размера «ступеньки» к длине волны меньше 0.05 [38]. Тогда при изменении глубины амплитуда волны трансформируется согласно закону Грина-Эри (2.12), из которого следует, что амплитуда волны пропорционально зависит от корня четвертой степени отношения глубин.

$$\xi = \xi_0 \sqrt[4]{\frac{h_1}{h_2}} \quad (2.12)$$

где ξ – амплитуда волны на изобате h_2 , м
 ξ_0 – амплитуда волны на изобате h_1 , м
 h_1 – глубина области, откуда распространяется волна, м
 h_2 – глубина области, куда распространяется волна, м

Закон Грина корректно выполняется при численном моделировании распространения волны. Так, на изобате 100 м амплитуда волны равна 2 м, исходя из формулы, амплитуда на изобате 10 м должна составить 3.55 м. Результат моделирования соответствует аналитическому решению.

После отражения волны от стенки при движении в глубоководную часть расчетной области происходит так называемое «размазанное» отражение, и выглядит как «хвост» тянущийся за волной (см. рисунок 2.6).

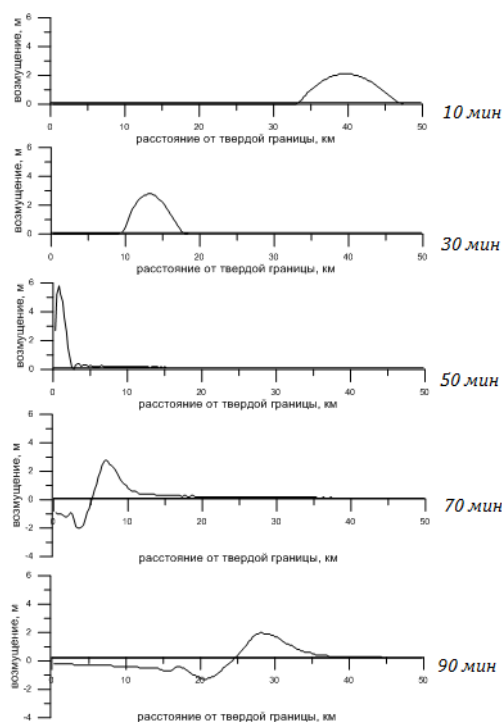


Рисунок 2.6 – Распространение волны в расчетной области с постоянным уклоном дна

Верификация численной модели распространения длинной волны в одномерном случае, основанная на сравнении полученных в ходе моделирования результатов с аналитическими решениями, была произведена успешно.

2.3 Моделирование наката волны на сухой берег в одномерном случае с реализацией условия подвижной твердой стенки

Условие подвижной стенки, как было сказано ранее, применяется в моделировании для описания перемещения уреза, характеризующее накат волны на берег.

В работе было произведено несколько экспериментов по расчету характеристик наката длинных волн разной полярности. Характеристики падающей волны и уклона дна были подобраны таким образом, чтобы избежать обрушения волны, иначе решение выходит за рамки теории мелкой воды.

В качестве критерия, определяющего возникновение обрушения, принят критерий обрушения Br , представляющий собой отношение крутизны волны к уклону дна (2.13). Когда крутизна волны меньше уклона дна ($Br < 1$) происходит постепенное затопление берега без обрушения, иначе ($Br > 1$) имеет место обрушение и дальнейшая трансформация волны уже не поддается численному описанию.

$$Br = \frac{\left. \frac{d\xi}{dx} \right|_{x=0}}{\alpha} = \frac{\omega^2 \xi_R}{g \alpha^2} \quad (2.13)$$

Профиль дна, использованный для моделирования, был принят постоянного уклона $\alpha = 0.002$. Падающая волна задана с амплитудой 2 м, половиной длины волны – 63 км, и полупериодом 30 мин. Критерий обрушения

составил 0.5. Шаг по пространству принят равным 250 м, по времени – 5 с, что соответствует условию Куранта.

В первом эксперименте рассматривается накат волны в форме полусинусоиды с положительной амплитудой, результаты графически представлены на рисунке 2.7. Распространение волны в области постоянного уклона сопровождается увеличением амплитуды волны согласно закону Грина-Эри (2.12).

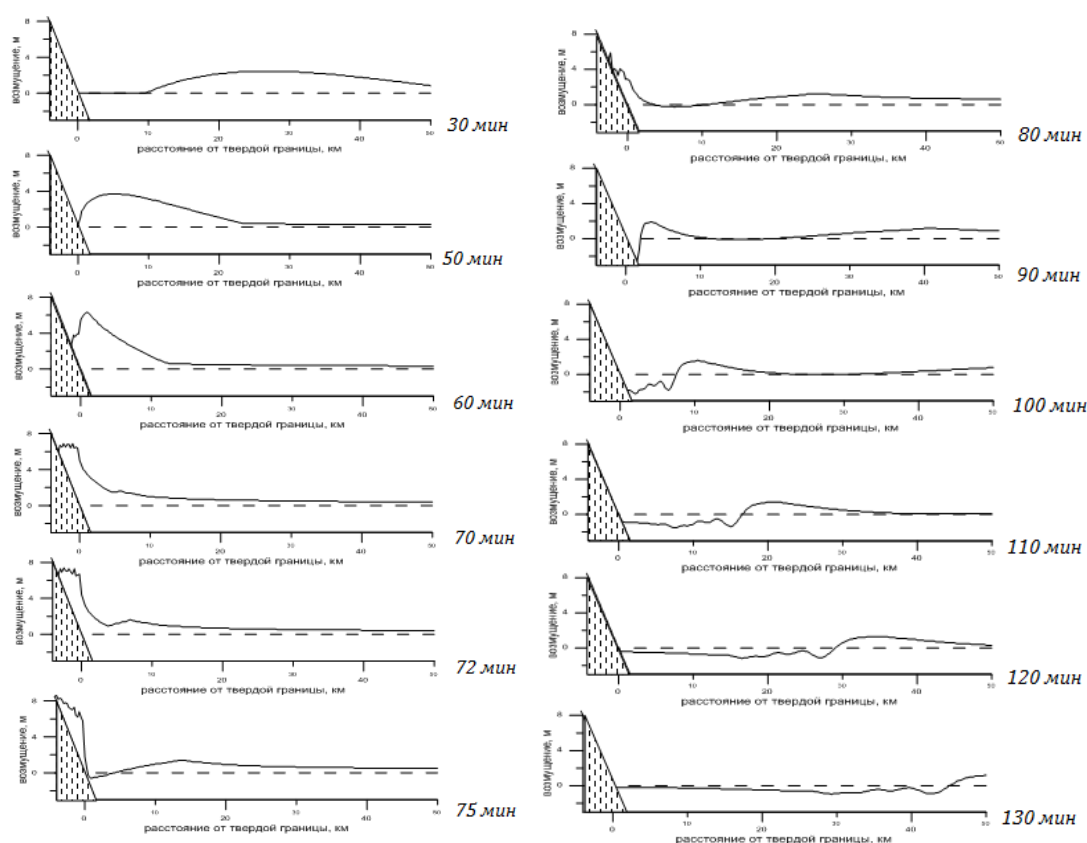


Рисунок 2.7 – Распространение волны в акватории с пологим дном, сопровождающееся а) накатом и б) откатом волны с последующей осушкой дна

У уреза происходит постепенное увеличение уровня свободной поверхности. Выполнение условия перемещения стенки (см. пункт 2.1) приводит урез в движение. Максимальный горизонтальный заплеск волны был достигнут на расстоянии 4.25 км, а величина вертикального заплеска составила

8.5 м. Сильное увеличение амплитуды волны почти в 4 раза по отношению к задаваемой волне объясняется длинным и пологим теоретическим профилем дна.

В работе [33] представлены выводы линейной теории наката и приведены асимптотические формулы (2.14) для определения амплитуды волны на урезе и (2.15) для определения горизонтального заплеска. Из предположения, что высота вертикального заплеска соответствует возмущению свободной поверхности на урезе в приближение твердой стенки, представляется возможным сравнить полученные в ходе моделирования результаты с решением формул.

$$\xi_R = \begin{cases} D\xi_0 \sqrt{\frac{l}{\lambda_0}}, & l > 0.05 \lambda_0 \\ 2\xi_0, & l < 0.05 \lambda_0 \end{cases} \quad (2.14)$$

где D – численный коэффициент, зависящий от формы волны.

$$L \cong \frac{2\pi\xi_0}{\alpha} \sqrt{\frac{2l}{\lambda_0}} = \frac{\xi_R}{\alpha} \quad (2.15)$$

где L – величина горизонтального заплеска, м.

Численный коэффициент D , определенный в работе [39] в ходе выполнения численных расчетов, принят равным 6.5. Из условия, что волна задана на расстоянии больше 0.05 длины волны воспользуемся первым соотношением (2.14). Рассчитанное значение вертикального заплеска составило

8.2 м, а горизонтального 4.1 км. Разница между данными значениями и полученными в ходе моделирования не превышает шаг по пространству.

Откат волны происходит сразу после достижения значения максимального заплеска, и заканчивается осушкой дна дальностью 1.75 км. Движение волны в противоположном от берега направлении в глубоководную область сопровождается «размазанным» отражением, характерным для пологого дна (см. рисунок 2.6). В последствие уровень свободной поверхности возвращается к невозбужденному состоянию.

Во втором эксперименте в расчетную область задавалась волна в виде отрицательной полусинусоиды. Графики распространения волны представлены на рисунке 2.8. При подходе волны к урезу происходит откат воды от берега и формируется осушка дна, составившая при заданных условиях 2,75 км. Волна частично отражается от берега, а пропущенная волна формирует накат, максимальная дальность которого составила 2 км.

По результатам описанных выше экспериментов были построены графики перемещения уреза, представленные на рисунке 2.9. В обоих случаях накат происходит медленнее, чем откат. Максимальные значения дальности заплеска достигаются при подходе волны с положительной амплитудой, и превосходит следующую за накатом осушку дна почти в два раза. Аналогичное соотношение наблюдается при подходе волны с отрицательной амплитудой, следующий за осушкой дна накат не превышает половины значения дальности осушки дна. Графики, представленные на рисунке 2.9, схожи с теми, что были получены в работе [40] в рамках линейной теории наката.

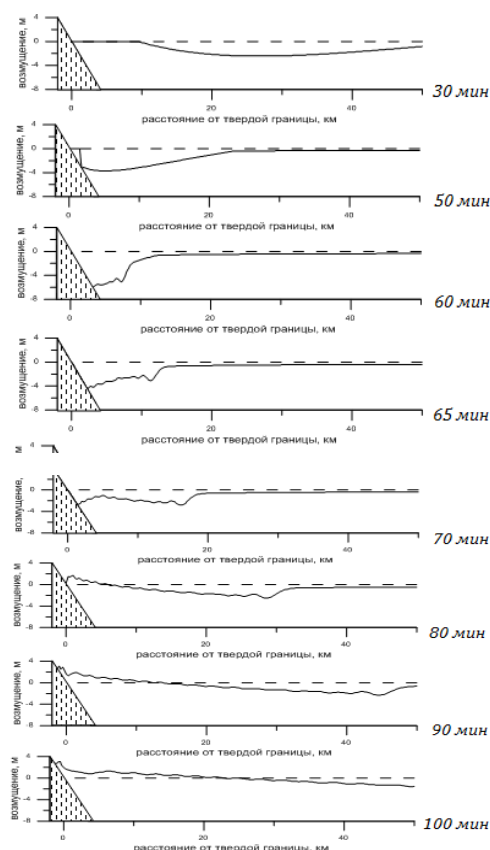


Рисунок 2.8 – Распространение длинной волны в виде отрицательной денивелияции уровня, сопровождающееся а) осушкой дна и б) накатом

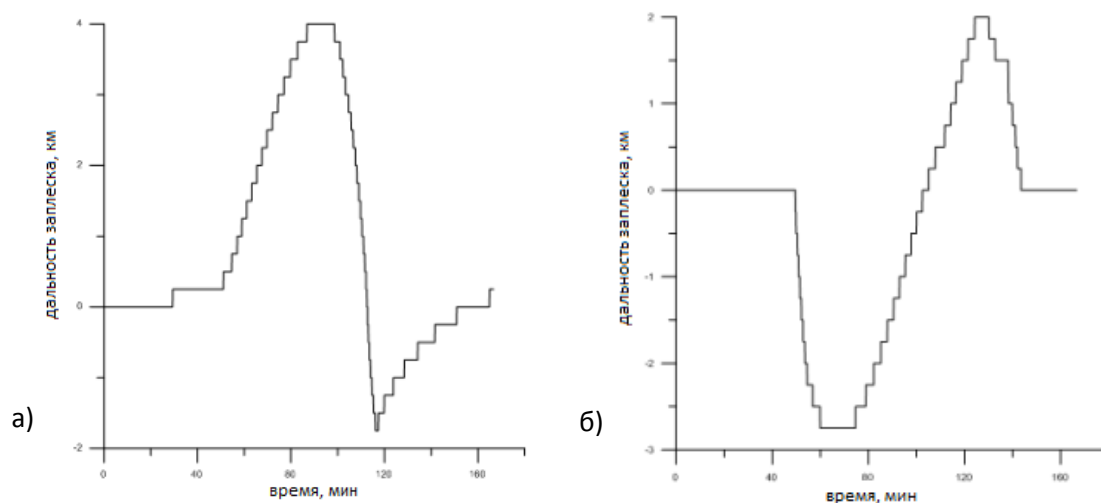


Рисунок 2.9 – Перемещение подвижной твердой границы при накате волн в виде а) положительной и б) отрицательной полусинусоиды

Также в качестве эксперимента был произведен расчет характеристик наката вследствие подхода длинной волны в виде синусоиды с одним гребнем и

ложбиной. Значения дальности заплеска и осушки дна составили 4 км и 3.75 км соответственно (см. рисунок 2.10). Совместное действие процесса отката волны и осушки дна вследствие подхода к урезу ложбины привели к дальности осушки дна соотносимой с дальностью заплеска. Осушка дна сопровождается небольшим накатом, характерным для подхода волны отрицательной денивелиации уровня (см. рисунок 2.9 б).

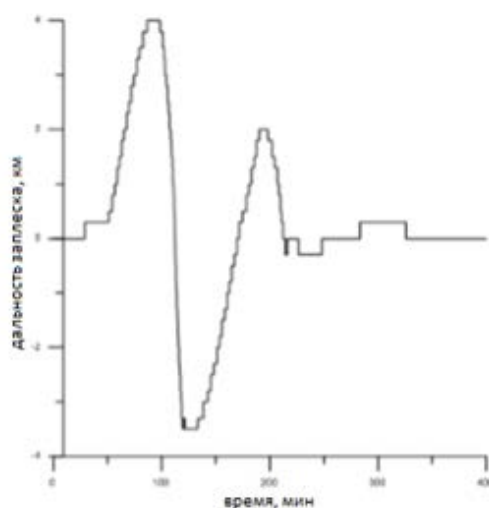


Рисунок 2.10 – Перемещение подвижной твердой границы при накате волны в виде синусоиды

В ходе исследования была успешно реализована одномерная линеаризованная модель наката длинных волн на сухой берег. Сравнение полученных в ходе моделирования результатов с решением асимптотических формул в рамках линейной теории наката подтвердили корректность расчетов.

2.4 Мелкомасштабное цунамирайонирование Южно-Курильской бухты (о. Кунашир) с применением одномерной модели наката

Методология численного моделирования наката успешно проверенная выше, была применена для расчета предельного заплеска волны цунами в бухте Южно-Курильская на о. Кунашир.

Интерес к данному объекту связан с тем, что Курильские острова находятся в цунамигенной зоне, известной как Тихоокеанское огненное кольцо. Пгт. Южно-Курильск является самым густонаселенным пунктом на Курильских островах с численностью населения по данным за 2018 г. 7777 человек [41]. Поэтому цунамирайонирование района представляет практический интерес и позволит сократить социальный и экономический ущерб, причиняемый цунами.

Бухта Южно-Курильская находится на восточном побережье острова Кунашир (см. рисунок 2.11), расположена между мысом Заводской на востоке и мысом Горячий на западе. В навигационном описании Курильских островов [42] присутствует следующее описание бухты: «берега бухты Южно-Курильская, поросшие лесом и кустарником, высокие и окаймлены грядой надводных, осыхающих и подводных камней и скал. Восточный берег бухты, образованный Южно Курильским перешейком, низкий, пологий и песчаный; порос кустарником и травой»

Цунамирайонирование области производилось по данным Шикотанского землетрясения 1994 года. Данные возмущения уровня свободной поверхности в эпицентре землетрясения были получены на официальном сайте Геологической службы США в разделе Землетрясения [19].

Землетрясение 1994 года было выбрано как объект исследования, так как является одним из сильнейших случавшихся в исследуемой области с магнитудой $M=8.3$ балла. Землетрясение вызвало волну цунами, приведшую к

затоплению значительных участков тихоокеанского побережья Курильских островов.

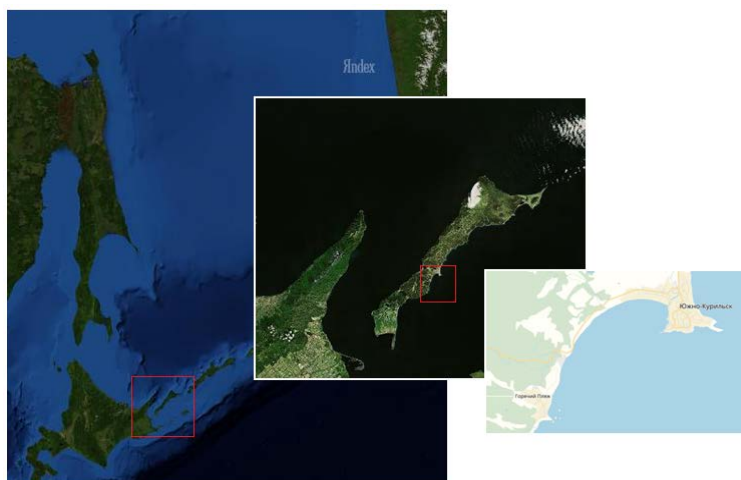


Рисунок 2.11 – Район исследования

В качестве исходных данных для определения максимальной дальности заплеска была использована мареограмма (см. рисунок 2.12) на изобате ближайшей к 10 м, полученная путем решения задачи распространения волны в открытом океане посредством двухмерной гидродинамической численной модели, используемой в ИМГиГ ДВО РАН. Значение амплитуды распространяющейся в расчетную область волны составляет порядка 2.5 м.

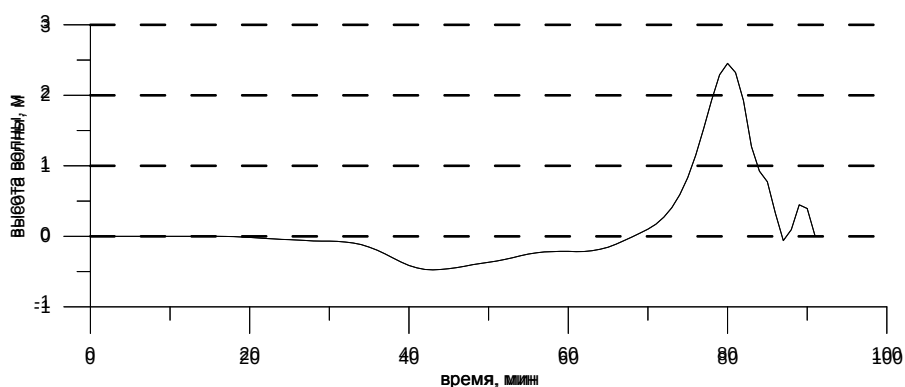


Рисунок 2.12 – Мареограмма входящей в расчетную область волны.

Сечения, вдоль которых производился расчет заплеска, приведены на рисунке 2.13. Данные о морфометрии дна и берега с разрешением 100 м находятся в открытом доступе на сайте OpenTopography [43]. Профили дна были получены в геоинформационной системе QGIS с использованием плагина Profile Tools.

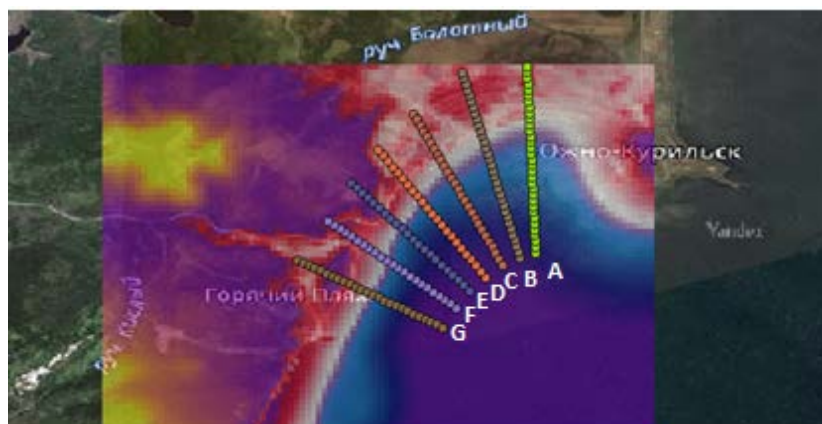


Рисунок 2.13 – Карта разрезов

В ходе работы была построена карта затопления береговой зоны Южно-Курильской бухты в результате цунами 1994 г. (см. рисунок 2.14). Карта построена на основе результатов расчетов распространения и наката волны на сухой берег вдоль поперечных профилей, изображенных на рисунке 2.13. Результаты расчетов представлены в таблице 2.1. Высота вертикального заплеска, полученная по результатам расчетов, составила в среднем 5 – 6 м. В южной части бухты наблюдаются высоты волны 5.1–5.3 м, с дальностью заплеска от 200 до 400 м в зависимости от угла наклона берега. Максимальных значений высота вертикального заплеска достигает в северной части бухты, где наблюдается более пологий уклон, и составляет 6 м с дальностью заплеска 800 м.

В точке С при достижении дальности заплеска 500 м и высоты 4.1 м произошло обрушение волны, связанное с маленьким уклоном берега по отношению к крутизне волны. В результате обрушения часть энергии

расходуется, и волна не достигает максимально возможной отметки (в данном случае 6 м). Стоит отметить, что отметка в 6 м находится на расстоянии 800 м от уреза.

Таблица 2.1 – Результаты численного моделирования распространения и наката волны цунами в Южно-Курильской бухте во время цунами 1994 года

№ профиля	Зона заплеска, (от начального положения уреза воды, м)	Величина вертикального заплеска, м
A	800	6.1
B	400	5.1
C	Обрушение на 500	Обрушение на 4.1
D	400	5.3
E	200	5.3
F	400	5.3
G	300	5.1

Из наблюдений очевидцев известно, что максимальная высота волны на урезе в бухте Южно-Курильская была предположительно равна 5 – 6 м. В пгт. Южно-Курильск несколько маломерных судов затонуло, другие были выброшены на берег, разрушены деревянные пирсы.

В результате проделанной работы была произведена оценка цунамиопасности бухты Южно-Курильская на основе данных о цунами 1994 г. Следует отметить, что южная часть бухты является относительно защищенной в связи с большим уклоном берега, дальность заплеска здесь не превышает 400 метров. Однако на спутниковых снимках видно, что на расстоянии 50 м от уреза расположены постройки, а в центральной части бухты на расстоянии 10 м от уреза пролегает автодорога. Из чего следует, что возникновение цунами приведет к неблагоприятным последствиям.

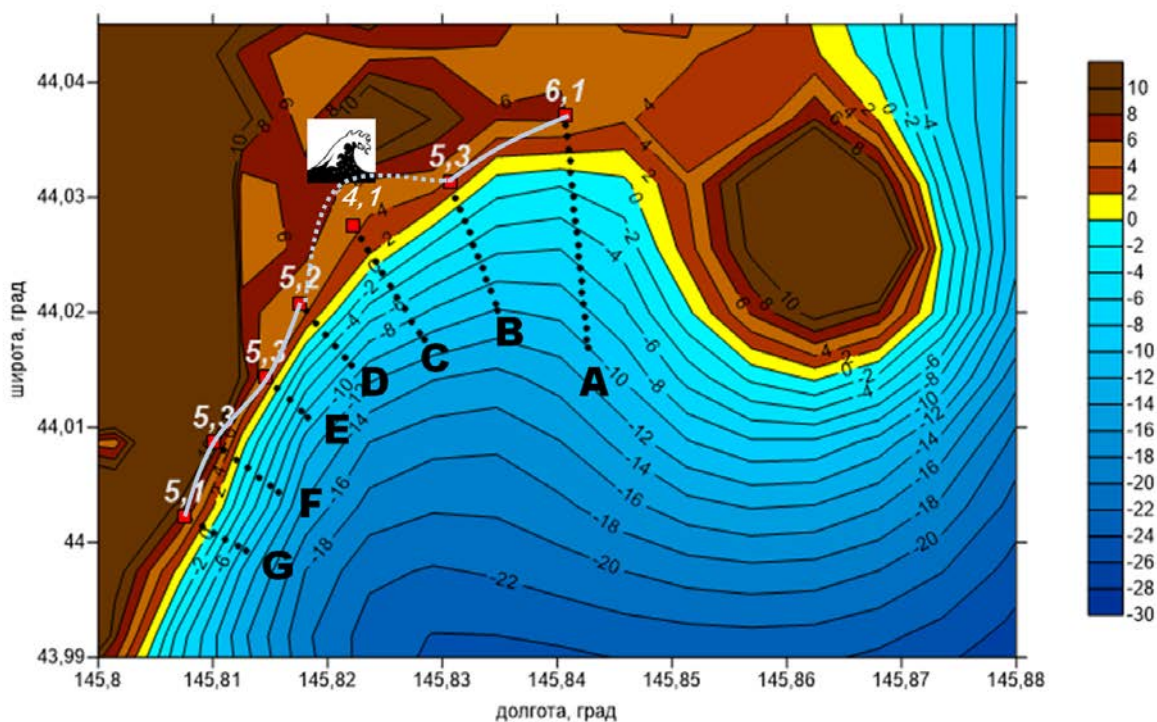


Рисунок 2.14 – Карта затопления побережья в Южно-Курильской бухте во время цунами 1994 года (цифрами отмечены значения величины вертикального заплеска сухого берега)

Северная часть бухты характеризуется пологим берегом. Дальность заплеска достигает 800 м. Кроме того из-за пологого уклона берега вероятно обрушение волны, в результате которого образуется бор – опасная стена воды, сносящая все на своем пути, что может привести к трагическим последствиям.

3 Двухмерная модель наката длинной волны на сухой берег

3.1 Математическое описание

Для расчета характеристик длинноволновых колебаний в двухмерном случае применяется двухмерная система уравнений теории мелкой воды (1.2). Также как и в одномерном случае, силами вязкости и Кориолиса, градиентом атмосферного давления и эффектом нелинейности было решено пренебречь. Система уравнений, применяемая в работе, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} = -gh \frac{\partial \xi}{\partial x} \\ \frac{\partial V}{\partial t} = -gh \frac{\partial \xi}{\partial y} \\ \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial \xi}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

В качестве начального условия в области постоянных глубин задается статического возмущение уровня в виде полусинусоиды, которое в дальнейшем распадается на проходящую в расчетную область волну и выходящую из нее. В остальной части расчетной области возмущение отсутствует. Значения компонент полного потока в начальный момент времени принимаются равными нулю.

На левой (жидкой) границе задавалось условие полного излучения. Верхние и нижние границы в модельных случаях с учетом небольшой поперечной изменчивости морфометрии принимались в виде твердых стенок. На правой границе (береговой) использовалось граничное условие реализующее накат волны на сухой берег в виде подвижной твердой стенки.

Расчет производится с использованием «шахматной» конечно-разностной схемы удовлетворяющей двумерному случаю. Модельные расчеты были выполнены для двух случаев конфигурации берега: прямолинейный берег и криволинейный. Схема расчета характеристик распространения волны при условии прямолинейного берега представлена на рисунке 3.1 а, криволинейного – 3.1 б.

Расчет значений уровня свободной поверхности ξ выполняется в диапазоне $(M; N)$ где M максимальное количество точек по оси x , а N – по оси y . При этом расчет полного потока U ведется в диапазоне $(M+1; N)$, а полного потока V в диапазоне $(M; N+1)$. Дополнительное количество шагов связано с особенностями задания граничных условий.

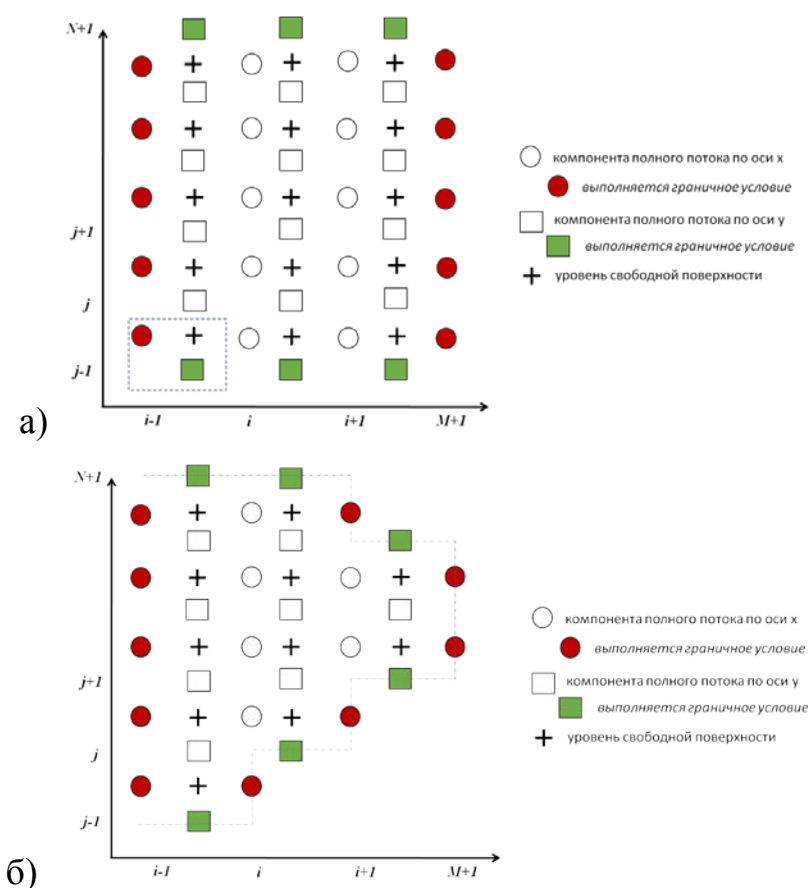


Рисунок 3.1 – «Шахматная» конечно-разностная схема в двумерном случае: а) прямолинейный берег, б) криволинейный берег

Расчетные формулы, используемые для вычисления значений уровня свободной поверхности ξ , и компонент полного потока по оси x U и по оси y V представлены в виде конечных разностей (3.2).

$$\begin{cases} U_{i,j}^{k+1} = U_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} g h_{i,j} (\xi_{i,j}^k - \xi_{i-1,j}^k) \\ V_{i,j}^{k+1} = V_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{\Delta y} g h_{i,j} (\xi_{i,j}^k - \xi_{i,j-1}^k) \\ \xi_{i,j}^{k+1} = \xi_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} (U_{i+1,j}^k - U_{i,j}^k) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (V_{i,j+1}^k - V_{i,j}^k) \end{cases} \quad (3.2)$$

Численная реализация начального условия в виде полусинусоидального статического возмущения было реализовано с помощью (3.3) и (3.4).

$$\begin{aligned} \xi_{i,j}^{k=1} &= 0 \\ \xi_{i=(1,L),j}^{k=1} &= A * \cos(w - k * x_i + \varphi) \end{aligned} \quad (3.3)$$

где L – количество шагов по пространству, соответствующее половине длины волны, м.

$$\begin{aligned} U_{i,j}^{k=1} &= 0 \\ V_{i,j}^{k=1} &= 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

При расчете характеристик волнения в двухмерном случае в линейном виде возникает необходимость в постановке одного граничного условия на каждой из четырех границ, применимые к компонентам полного потока U и V . Численная реализация условий на жидкой левой границе, боковых границах и береговой границе представлены формулами (3.5) – (3.7) соответственно.

$$U_{i=1,j}^k = -\xi_{i=1,j}^{k-1} * Cmax \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} V_{i,j=1}^k &= 0 \\ V_{i,j=N+1}^k &= 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$U_{i=M+1,j}^k = 0 \quad (3.7)$$

Расчет наката волны на берег производится посредством введения в схему условия подвижной твердой стенки. Механизм перемещения подвижной твердой стенки был описан в главе 2.1. Отличие от одномерного случая состоит в том, что в двухмерном значении уровня свободной поверхности у твердой стенки сравнивается с высотой берега на следующем шаге как по оси x так и по оси y , что позволяет моделировать процесс наката как в продольном так и в поперечном направлении относительно направления распространения исходной волны.

Определение положения уреза является первостепенной. Для визуализации все расчетные ячейки сетки были подразделены на «затопленные» и «сухие». Подразделение на «сухие» и «затопленные» точки в начальный момент времени задается в соответствии с положением невозмущенного уреза.

3.2 Верификация двухмерной модели наката

В процессе реализации двухмерной вычислительной модели наката волны на берег было выполнено два эксперимента с заданием теоретических профилей дна для проверки корректности производимых вычислений.

В первом эксперименте волна задавалась в канале постоянного сечения с профилем дна постоянного уклона $\alpha=0.02$ и прямолинейным берегом. Максимальная глубина составила 100 м. Шаг по пространству был выбран равным 100 м, исходя из условия Куранта (2.2) шаг по времени был принят равным 2 с.

Характеристики волны были подобраны таким образом, чтобы исключить обрушение. Волна задавалась в виде положительной полусинусоиды с полупериодом 16 минут, половиной длины волны 30 км и амплитудой 4 м в области постоянной глубины. Распространение волны происходило по нормали к берегу.

Процесс наката волны был реализован в соответствии с условием подвижной твердой стенки. По полученным результатам перемещения уреза и распространения волны были построены графики, наглядно описывающие перемещение уреза при подходе волны к берегу (см. рисунок 3.2).

Высота вертикального заплеска составила 11 м, дальность заплеска 550 м вдоль всего берега. Так как изменение характеристик распространения волны имело место только вдоль оси x , величина заплеска полученная в ходе реализации двухмерной модели совпала с результатами одномерного моделирования. Для наглядности график перемещения уреза (см. рисунок 3.3) был выполнен в разрезе вдоль оси x . Как видно из рисунков модель адекватно описывает как стадию наката так и отката волны на сухом берегу.

Значения вертикального и горизонтального заплеска также были рассчитаны по формулам (2.14) и (2.15) в рамках линейной теории наката [32]. Использование аналитических формул дало следующий результат: высота

вертикального заплеска составила 10.6 м, а дальность – 530 м. Разница со значениями, полученными в ходе моделирования, не превышает шага по пространству, что свидетельствует о возможности использования двухмерной схемы для численных расчетов.

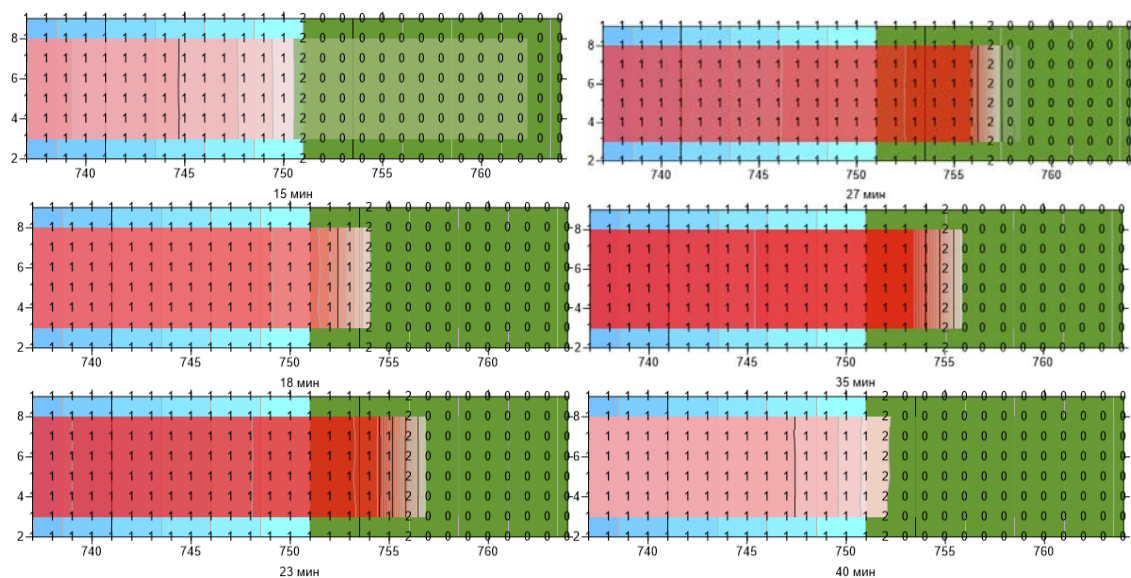


Рисунок 3.2 – Схема перемещения уреза в разные моменты времени при нормальном подходе волны и постоянном уклоне дна. Цифрами 1 обозначены «затопленные» ячейки, 2 – урез, 0 – сухие ячейки.

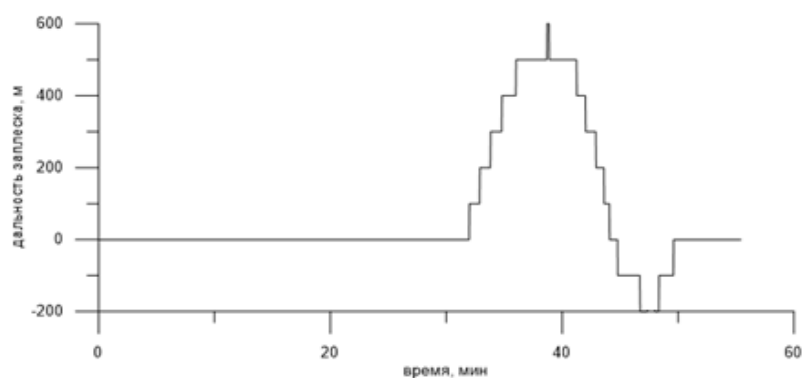


Рисунок 3.3 – Перемещение подвижной твердой границе при накате волны.

Разрез вдоль оси x

В следующем эксперименте волна также была задана для профиля дна приближенного к естественному, береговая полоса имитирует бухту с неоднородной морфометрией в поперечном направлении (см. рисунок 3.4). Уклоны дна в данном случае отличаются в диапазоне от 0.25 на периферии до 0.31 в центральной части.

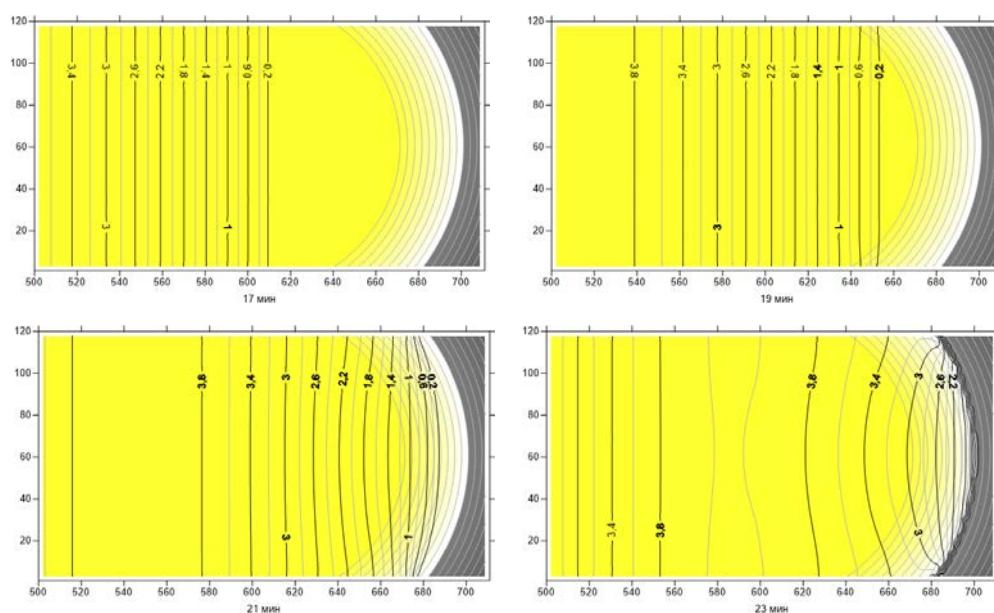


Рисунок 3.4 – Распространение и накат волны в модели с профилем дна, имитирующем естественную бухту

Волна была задана с такими же характеристиками, как и в первом эксперименте: в виде положительной полусинусоиды с полупериодом 16 минут, половиной длины волны 30 км и амплитудой 4 м в области постоянной глубины.

Стоит отметить, что из-за криволинейности береговой линии и непостоянного уклона профиля дна произошло незначительное искривление фронта волны. Однако эффект рефракции при выбранных параметрах морфометрии является незначительным.

Результаты моделирования наката представлены на рисунке 3.5. Точками схематично изображен урез перемещающийся во времени: черными точками

обозначено положение уреза в начальный момент времени, синими точками обозначено положение уреза спустя три минуты после начала наката, и наконец красными точками обозначено максимальное положение уреза. Накат в центральной части расчетной области составил порядка 400 м, а высота вертикального заплеска достигла 12 м. Несмотря на то что у боковых границ уклон дна меньше чем в центральной части, накат был слабее чем в центральной части. Дальность заплеска составила 300 метров, а величина вертикального заплеска достигла 8.6 м. Такое различие может быть вызвано тем, что волна частично отразившаяся от берега на периферии бухты накладывается на подходящую волну. В результате интерференции падающей и отраженных волн в центральной части наблюдается максимальный накат (см. рисунок 3.5).

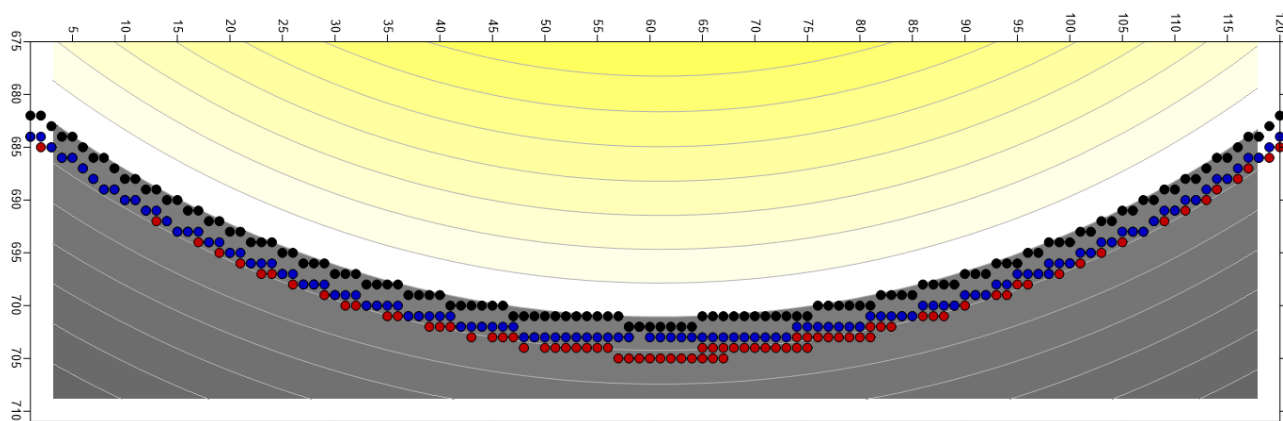


Рисунок 3.5 – Накат длинной волны на берег. Точками обозначено положение уреза: черным – в начальный момент времени, синим – спустя три минуты после наката, красным – максимальный заплеск

3.3 Мелкомасштабное цунамирайонирование Южно-Курильской бухты в зоне пгт. Южно-Курильск (о. Кунашир)

Результаты, изложенные в предыдущей главе показали возможность использования предлагаемой численной модели для практических расчетов параметров наката длинной волны с применением подвижной твердой стенкой, описывающей перемещение уреза. В данной главе приведены результаты мелкомасштабного цунамирайонирования пгт. Южно-Курильск и прилегающей к нему бухты Южно-Курильская на о. Кунашир.

Выбор объекта исследования обусловлен тем, что пгт. Южно-Курильск является самым густонаселенным пунктом на Курильских островах, которые в свою очередь расположены в зоне субдукции и часто испытывают на себе воздействие землетрясений и цунами.

Стоит отметить, что в период японского правления поселок располагался вдоль морского побережья, но после цунами был разрушен и отстроен снова на уровне примерно 30 м выше прежнего.

В главе 2.4 уже были приведены результаты цунамирайонирования Южно-Курильской бухты на основе данных о Шикотанском землетрясении 1994 г. с использованием одномерного численного моделирования вдоль сечений, проведенных от изобаты 10 м по нормали к берегу.

Для сопоставимости результатов одномерных и двухмерных расчетов параметры подходящей волны при двухмерном расчете были заданы такими же, как и в одномерном расчете. Таким образом, на изобате 10 м характеристики падающей волны соответствовали мареограмме на рисунке 2.12. Данные о батиметрии и топографии были получены с сайта OpenTopography [43] с разрешением 100 м.

Были произведены расчеты характеристик наката при подходе волны южного направления. Подобное распространение соответствует случаю зарождения цунами на юге Курило-Камчатского желоба. Расположение

расчетной области относительно географической карты приведено на рисунке 3.6.

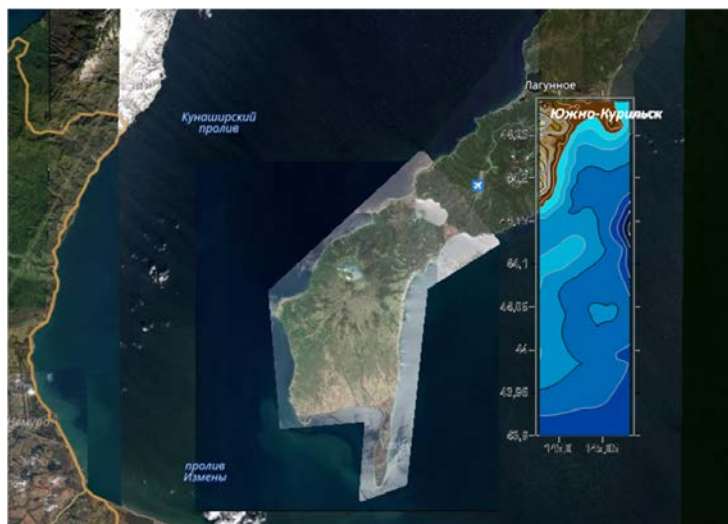


Рисунок 3.6 – Район исследования при задании волны южного направления

По результатам численного моделирования были построены карты распространения волны цунами южного направления, представленные на рисунке 3.7. Непосредственно при приближении к берегу под воздействием эффекта рефракции фронт волны принимает очертания близкие с формой береговой линии, что приводит к развороту фронта волны и нормальному подходу волны к берегу, что в свою очередь позволяет сравнивать результаты двухмерных и одномерных расчетов.

Волна начинает взаимодействие с берегом на периферии и концентрируется в центральной части бухты, аналогично случаю, описанному в главе 3.2.

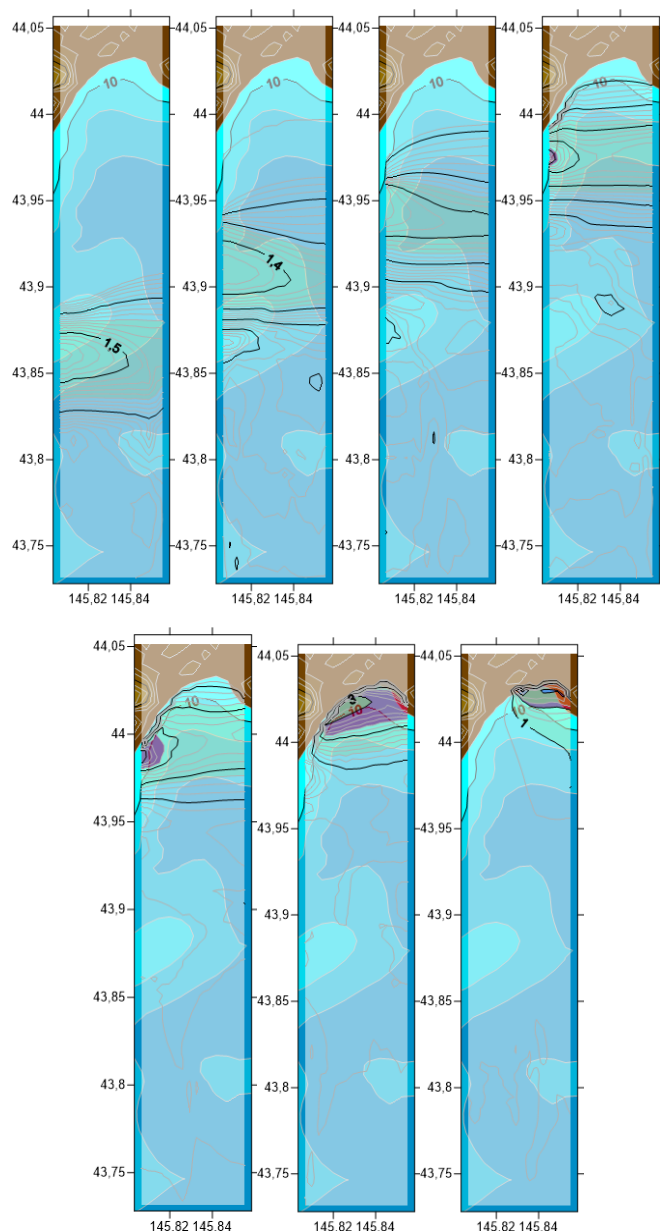


Рисунок 3.7 – Распространение волны южного направления к бухте Южно-Курильская, изолиниями обозначено значение уровня свободной поверхности

В результате расчета наката волны были получены значения дальности заплеска и величина вертикального заплеска для каждой точки побережья. На рисунке 3.8 графически изображено положение уреза в разные моменты времени. На карте черными точками обозначено положение уреза в начальный момент времени, синими спустя минуту после начала наката, красным – спустя

5 минут, желтым – спустя 10 минут, и зеленым – предельный заплеск спустя 15 минут после начала наката.

На карте (см. рисунок 3.8) наглядно представлено как дальность заплеска зависит от рельефа берега, при одинаковых величинах вертикального заплеска расстояние, которое достигает волна при накате, отличается значительно. В среднем по бухте высота вертикального заплеска колеблется от 4 до 6 м. При этом дальность заплеска в южно части бухты составляет 200 – 400 м, в центральной части 500 – 800 м, а в северной достигает 1100 м.

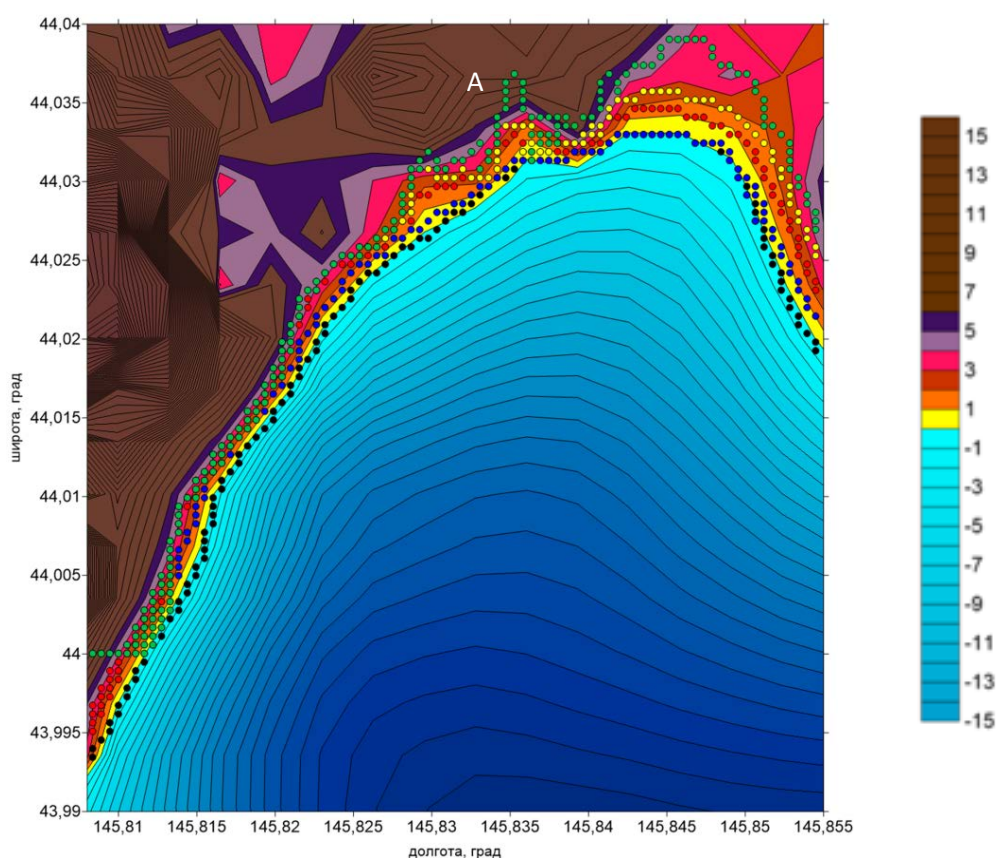


Рисунок 3.8 – Перемещение уреза при накат волны на побережье Южно-Курильской бухты. Точками схематично обозначено положение уреза в разные моменты времени: черными – в начальный момент времени, синими – спустя минуту после начала наката, красным – спустя 5 минут, желтым – спустя 10 минут, и зеленым – предельный заплеск спустя 15 минут после начала наката.

Данные результаты хорошо соотносятся с результатами, полученными при одномерном моделировании (см. главу 2.4). В одномерном случае высота волн несколько превышает результаты двумерного моделирования, что скорее всего происходит из-за того, что в двумерном случае учитывается распространение волны в продольном и поперечном направлении относительно подхода волны, таким образом происходит уменьшение ее критических значений. С другой стороны, в случае если низменная часть находится между двумя сопками, то распространение волны произойдет на дальнейшее расстояние, что иллюстрирует величина горизонтального заплеска на рисунке 3.8 в пункте А.

Более того, двумерная модель учитывает возможность интерференции падающих и отраженных волн в условиях сложной береговой линии. В ряде случаев интерференция приводит к увеличению значений дальности заплеска.

Проанализировав результаты одномерного и двумерного моделирования, можно выявить наиболее цунамиопасные области в районе исследования. В данном случае наибольшая дальность заплеска достигается в северной части бухты, образованной Южно-Курильским перешейком.

При южном подходе пгт. Южно-Курильск в меньшей степени подвержен воздействию цунами в силу морфологии берега. Поэтому была смоделирована ситуация подхода волны цунами с восточного направления. Местоположение расчетной области на географической карте представлено на рисунке 3.9.

По результатам моделирования были построены карты распространения и наката волны (см. рисунок 3.10). При подходе волны восточного направления сильнее всего страдает мыс Заводской, на котором расположен пгт. Южно-Курильск. Северная часть Южно-Курильской бухты экранируется выступающим мысом.

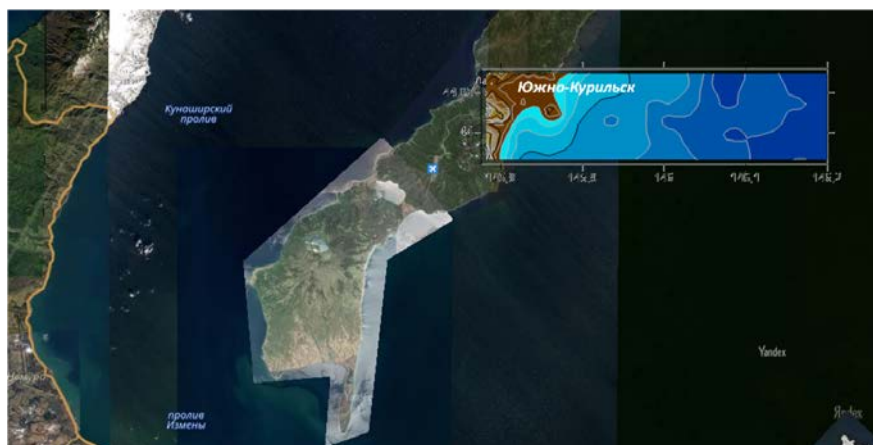


Рисунок 3.9 – Район исследования при задании волны восточного направления

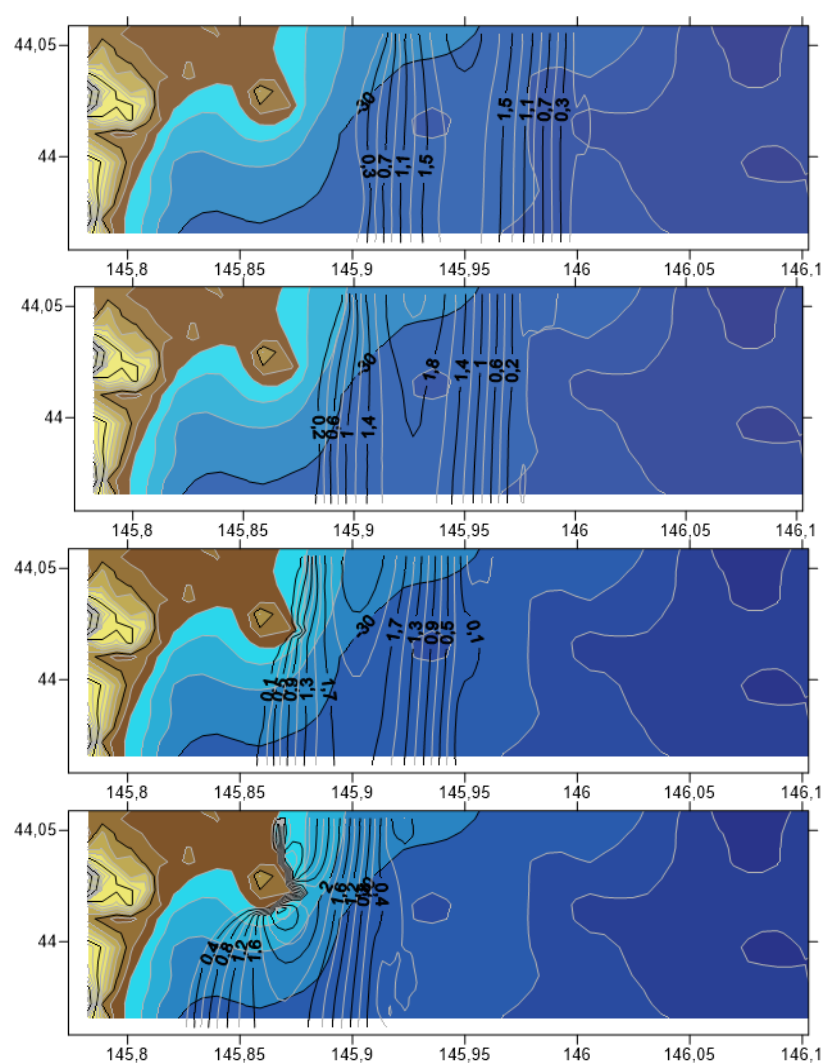


Рисунок 3.10 Распространение волны восточного направления в сторону мыса Заводской, изолиниями обозначено значение уровня свободной поверхности

На рисунке 3.11 приведена схема перемещения уреза при накате волны на берег мыса Заводской. При данном направлении подхода волны больше всего воздействию цунами подвергается оконечность выступающего мыса Заводской. На восточной оконечности мыса, высота вертикального заплеска достигает 8 м, но из-за сильного уклона рельефа берега волна не продвигается дальше 200 м. В северо-западном направлении величина уклона уменьшается, а воздействие волны ослабевает, в результате высота вертикального заплеска изменяется в северо-западном направлении от 5 до 3 м, а дальность заплеска от 400 до 300 м соответственно.

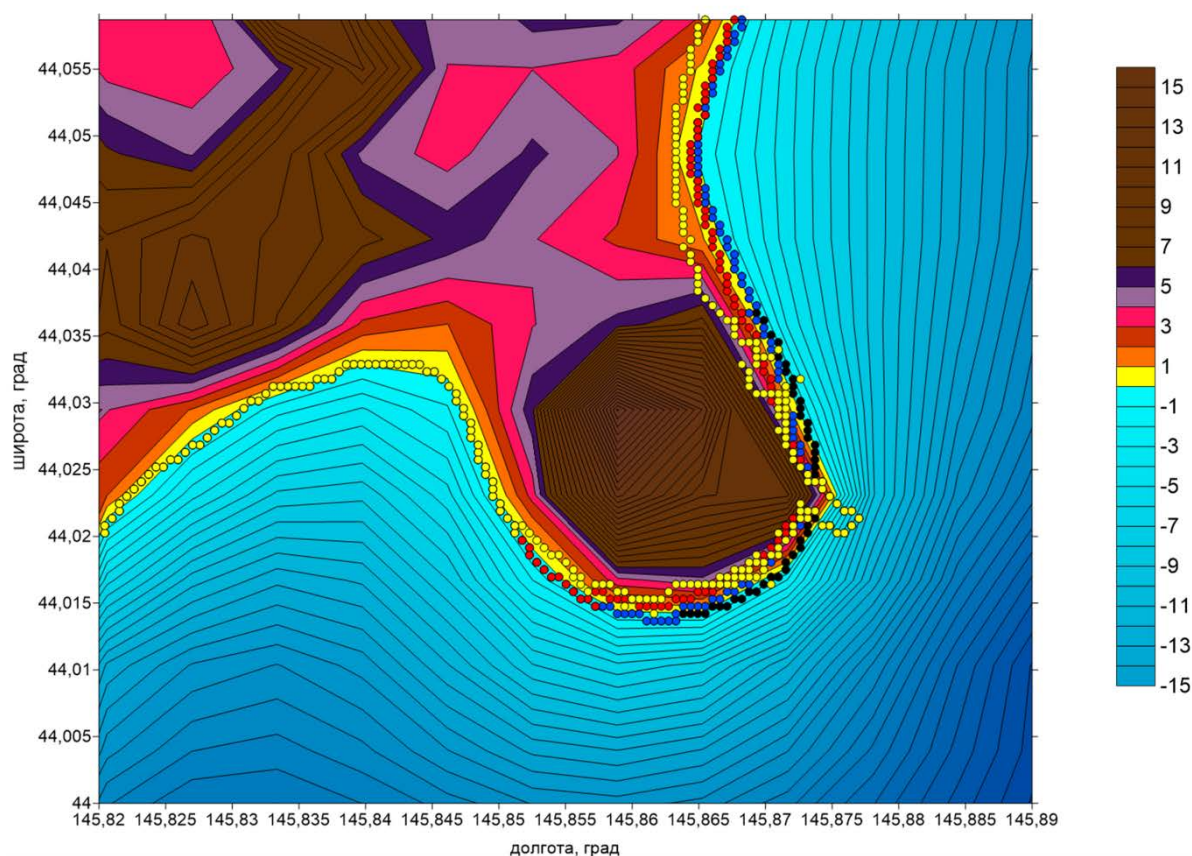


Рисунок 3.11 – Перемещение уреза при накат волны на побережье мыса Заводской пг. Южно-Курильск. Точками схематично обозначено положение уреза в разные моменты времени: черными – в начальный момент времени, синими – спустя минуту после начала наката, красным – спустя 5 минут, желтым – предельный заплеск спустя 15 минут после начала наката.

В работе [44] приведена карта цунамирайонирования южных Курильских островов на основе данных повторяемости раз в сто лет. На интересующем нас участке в районе пгт. Южно-Курильск высота вертикального заплеска предполагается равной 4 – 8 м. Максимальные значения достигаются в центральной части бухты Южно-Курильская и в районе мыса Заводской. Данные выводы не противоречат полученным в ходе моделирования результатам.

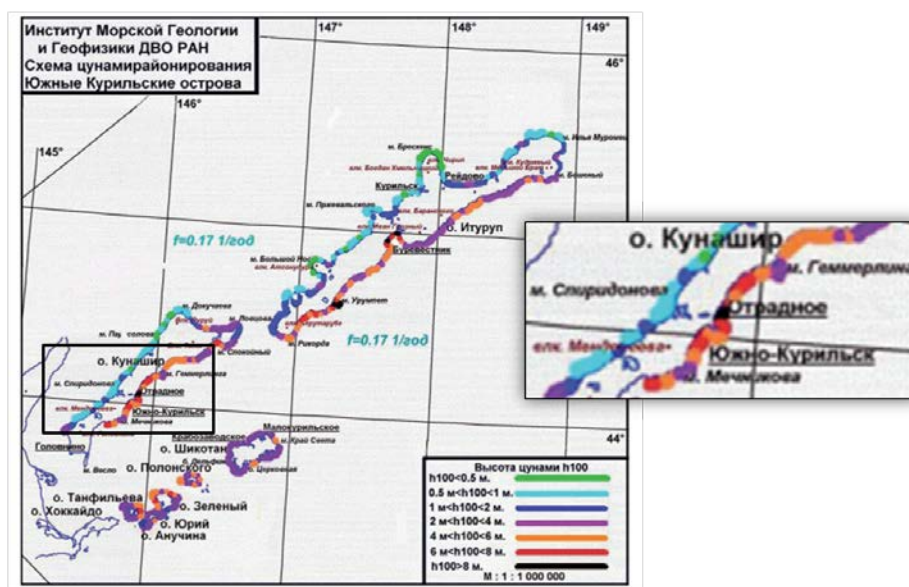


Рисунок 3.12 – Схема цунамирайонирования южных Курильских островов, выполненная ИМГиГ ДВО РАН [44]

Заключение

Оценка дальности заплеска волны цунами на берег является неотъемлемой частью комплексного управления прибрежными зонами, в частности управления рисками проявления негативных явлений. Численное моделирование хорошо зарекомендовало себя в качестве метод расчета характеристик распространения и наката волны, как наиболее доступный и технологичный инструмент. Существует несколько подходов к описанию перемещения уреза, в том числе представленные в работах [26, 30, 35], но отсутствие общепринятого универсального решение проблемы наката делает востребованным разработку новых численных моделей.

Основным результатом исследования в рамках магистерской диссертации является реализация двухмерной численной модели наката длинных волн на сухой берег и оценка цунамиопасности для пгт. Южно-Курильск и прилегающей к нему бухты Южно-Курильская (о. Кунашир).

На начальном этапе работы была разработана одномерная численная модель наката длинной волны. Корректность выполняемых расчетов была подтверждена в ходе верификации путем сравнения результатов численного моделирования с аналитическими решениями. Заключительным этапом реализации одномерной модели стало применение данной модели для оценки величины заплеска в бухте Южно-Курильская на о. Кунашир.

На завершающем этапе была реализована двухмерная численная модель основанная на численном решении теории мелкой воды с применением условия подвижной твердой стенки апробированном на одномерной модели.

В качестве преимущества двухмерного моделирования можно указать на воспроизведение более точных условий наката, перемещение водной массы в продольном и поперечном направлениях, как в морской части, так и на суше, и

возможность избежать неопределенности в ориентации волнового луча по отношению к берегу.

С помощью двухмерной численной модели была построена мелкомасштабная схема цунамирайонирования Южно-Курильской бухты и зоны пгт. Южно-Курильск, позволяющая оценить участки с наибольшей и наименьшей высотой заплеска, при различных направлениях подхода волны. Наиболее опасным для пгт. Южно-Курильск является подход волны цунами с восточного направления, в этом случае величина вертикального заплеска достигла 8 м.

Результаты, полученные при использовании предлагаемой двухмерной модели, не противоречат результатам крупномасштабного цунамирайонирования для Южно-Курильских островов, выполненной в ИМГиГ ДВО РАН. Таким образом, предлагаемые одномерная и двухмерная модели могут быть использованы в работе служб по предупреждению цунами.

Список использованных источников

1. Dorn W.G.V. Tsunamis on the moon [текст] / W.G.V Dorn // Nature. – 1968. – Vol. 220. – pp. 1102-1107.
2. Thucydides. The Peloponnesian War [текст]/ Thucydides; trans. J.M. Dent, E.P. Dutton –1910.
3. Smid T.C. Tsunamis in Greek Literature [текст] / T.C. Smid // Greece & Rome. 2nd Ser. – 1970. – Vol. 17. –No. 1. – pp. 100–104.
4. Левин Б.В. Физика цунами и родственных явлений в океане [текст] / Б.В. Левин, М.А. Носов – М.: Янус-К, 2005. – 360 с.
5. November 5. World tsunami awareness day [электронный ресурс] / National Centers for Environmental Information. – Режим доступа: <https://www.ncei.noaa.gov/news/november-5-world-tsunami-awareness-day>
6. Никонов А.А. Ужасное потрясение Европы, Лиссабонское землетрясение 1 ноября 1755 г. [текст] / А.А. Никонов // Природа. – 2005. – №1.
7. Максаковский В.П. Географическая картина мира. Книга 1. Общая характеристика мира [текст] / В.П. Максаковский – М.: Дрофа, 2008. – 496 с.
8. 20 Largest earthquakes in the world [электронный ресурс] / U.S. Geological Survey. – Режим доступа: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/largest-world.php>
9. Генеральный план. Система предупреждения о цунами в Тихом океане [текст] / МОК ЮНЕСКО – 1999. – 39 с.
10. Pacific Tsunami Warning Center [электронный ресурс] / NOAA's National Weather Service. – Режим доступа: www.prh.noaa.gov/ptwc
11. Tsunami Warning Advisory [электронный ресурс] / Japan Meteorological Agency. – Режим доступа: <https://www.jma.go.jp/en/tsunami/>

12. Служба срочных донесений [электронный ресурс] / Единая геофизическая служба РАН. – Режим доступа: <http://www.ceme.gsras.ru/>
13. Всемирный день распространения информации о цунами [электронный ресурс] / Камчатское УГМС. – Режим доступа: http://kammeteo.ru/gms_interest3.html
14. Служба предупреждения о цунами [электронный ресурс] / Российская служба предупреждения о цунами. – Режим доступа: <http://rtws.ru/info/sluzhba-predupr>
15. Первая очередь системы раннего обнаружения цунами на Дальнем Востоке России [электронный ресурс] / ДВНИИГМИ. – Режим доступа: <http://www.ferhri.org/napravleniya-rabot/2017-06-25-23-13-34/2017-07-27-01-32-53/84-sistema-rannego-obnaruzheniya-tsunami.html>
16. Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis [электронный ресурс] / NOAA Center for Tsunami Research. – Режим доступа: www.ndbc.pmel.noaa.gov/Dart/
17. German Indonesian Tsunami Early Warning System [электронный ресурс] – Режим доступа: www.gitews.org
18. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. [текст] // Bull. Seis. Soc. Am. – 1985. – Vol. 75. – №4. – pp. 1135– 1154.
19. Significant Earthquakes [электронный ресурс] / U.S. Geological Survey. – Режим доступа: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/significant.php>
20. Вольцингер Н.Е. Основные океанологические задачи теории мелкой воды [текст]/ Н.Е. Вольцингер, Р.В. Пясковский – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1968 – 300 с.
21. Abe K. A dislocation model of the 1933 Sanriku earthquake consistent with tsunami waves [текст] // J. Phys. Earth. – 1978. – Vol. 26. – №4. – pp. 381–396.
22. Abe K. Tsunami propagation on a seismological fault model of the 1952 Kamchatka earthquake [текст] // Bull. Nippon Dental Univ. – 1979. – №8. –

pp. 3–11.

23. Aida I. Numerical experiments for the tsunami propagation the 1964 Niigata tsunami and 1968 Tokachi–Oki tsunami [текст] // Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo. – 1969. – Vol. 47. – №4. – pp. 673–700.
24. Aida I. Numerical computation of a tsunami based on a fault origin model of an earthquake [текст] // J. Seism. Soc. Japan. – 1974. – Vol. 27 – №2. – pp. 141–154.
25. Tsunami modelling manual (TUNAMI model) [текст] / F. Imamura, A.C. Yalciner, G. Ozyurt. – 2006. – 58 p.
26. Bathymetry and Global Relief [электронный ресурс] / NOAA. – Режим доступа: <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/relief.html>
27. Мазова Р.Х. Статистические данные о характере наката волн цунами [текст] / Р.Х. Мазова, Е.Н. Пелиновский, С.Л. Соловьев // Океанология. – 1983. – Том 23. – №6. – с. 932–937.
28. Medeiros S.C. Review of wetting and drying algorithms for numerical tidal flow models [текст] / S.C. Medeiros, S.C. Hagen // International Journal for Numerical Methods in Fluids. – 2012. – Vol. 71. – Issue 4.
29. Марчук А. Г. Численное моделирование наката волн цунами на берег произвольного профиля [текст] / А. Г. Марчук, П.С. Мошкалев // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2014. – Том 12. – выпуск 2. – с. 55–63
30. Carrier G.F. Water waves of finite amplitude on a sloping beach [текст] / G.F. Carrier, H.P. Greenspan // J. Fluid Mech. – 1958. – Vol. 4. – No. 1. – pp. 97–109.
31. Synolakis C.E. The runup of solitary waves [текст] / C.E. Synolakis // J. Fluid Mech. – 1987. – Vol. 185. – pp. 523–545.
32. Мазова Р.Х. Линейная теория наката волн цунами на берег [текст] / Р.Х. Мазова, Е.Н. Пелиновский // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1982. – Том 18. – № 2. – с. 166–171.

33. Диденкулова И.И. Накат одиночных волн различной формы на берег [текст] / И.И. Диденкулова, А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2007. – Том 43. – № 3. – с. 419–425.
34. Бейзель С.А. О некоторых численных алгоритмах расчета наката волн цунами в рамках модели мелкой воды [текст] / С.А. Бейзель, Н.Ю. Шокина, Г.С. Хакимзянов // Вычислительные технологии. – 2014. – Том 19. – № 1. – с. 41-62.
35. Бухтеев В.Г. Некоторые вопросы численного моделирования цунами [текст] / В.Г. Бухтеев, Г.П. Клещева, Н.Л. Плинк // Распространение и набегание на берег волн цунами. – М.: Наука, 1981 – с. 132-138.
36. Практикум по динамике океана [текст]/ Под редакцией А.В. Некрасова, Е.Н. Пелиновского – СПб.: Гидрометеиздат, 1992 – 318 с.
37. Izquierdo A. Long Wave Theory [электронный ресурс]/ A. Izquierdo, N. Plink – Case study – Режим доступа: <http://eu-comet2.rshu.ru/?p=outputs>
38. Kajiura K. The leading wave of a tsunami [текст] / Kajiura K // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1963. – Vol. 41. – pp. 535 – 571.
39. Плинк Н.Л. Методология учета колебаний уровня при комплексном управлении прибрежными зонами [текст] / Н.Л. Плинк, М.В. Кашарский, Нгуен Хонг Лан // Сборник научных трудов РГГМУ. Колебания уровня в морях. – 2003. – с. 5 – 20.
40. Диденкулова И.И. Накат длинных уединённых волн различной полярности на плоский откос [текст] / И.И. Диденкулова, Е.Н. Пелиновский, О.И. Диденкулов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2014. – том 50. - № 5. – с. 604 – 611
41. Органы местного самоуправления. Муниципальное образование «Южно-Курильский городской округ» [электронный ресурс] / Губернатор и правительство Сахалинской области. – Режим доступа: <https://sakhalin.gov.ru/index.php?id=233>
42. Навигационное описание. Глава 1. Курильские острова [электронный

ресурс]. – Режим доступа: <http://parusa.narod.ru/bib/books/fareast/1406-2.htm>

43. Global Multi-Resolution Topography Data Synthesis острова [электронный ресурс] / Open Topography. – Режим доступа: <http://opentopo.sdsc.edu/raster?opentopoID=OTGMRT.112016.4326.1&minX=145.639&minY=43.893&maxX=145.957&maxY=44.06>
44. Кайстренко В.М. Количественная оценка цунамиопасности и карты цунамирайонирования [текст] / В.М. Кайстренко // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2017. Том 10. – № 3. – с. 39-55.

Приложение А «Блок схема одномерной численной модели наката
длинных волн»

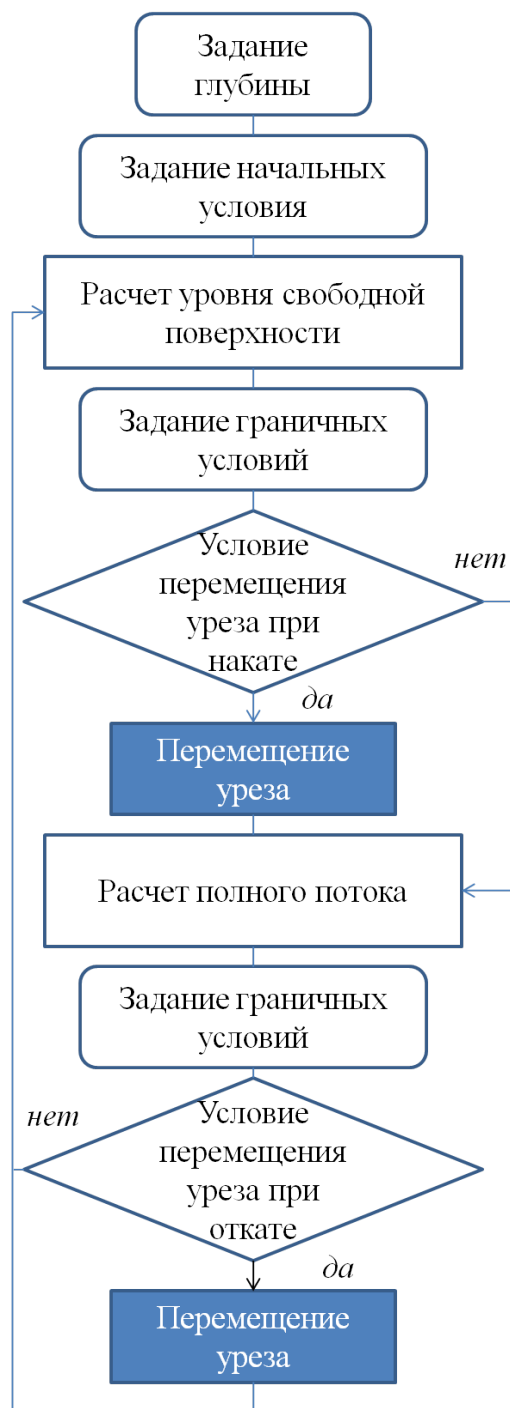


Рисунок А.1 – Блок схема одномерной численной модели наката длинных волн на сухой берег