

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения
Российской академии наук



Под редакцией Б.В. Левина

ЦУНАМИ

НА КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВАХ

Г.В. Шевченко, Т.Н. Ивельская, В.М. Кайстренко



ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ И МЕРЫ ПО СНИЖЕНИЮ РИСКА

**Памяти
жертв трагедии
5 ноября 1952 года
посвящается**

УДК 551.466

Цунами на Курильских островах. Особенности проявления и меры по снижению риска (памяти жертв трагедии 5 ноября 1952 г. посвящается) / Г.В. Шевченко, Т.Н. Ивельская, В.М. Кайстренко. – Южно-Сахалинск: ФГБУН ИМГиГ ДВО РАН, 2012. – 44 с.

Ответственный редактор: член-корреспондент РАН Б.В. Левин.

Приведены сведения о проявлениях наиболее сильных цунами, имевших место на Курильских островах – Камчатского 05.11.1952 г, Итурупского 07.11.1958 г., Чилийского 24.05.1960 г., Урупских 13 и 20.10.1963 г., Шикотанского 05.10.1994 г. и Симуширского 15.11.2006 г. Освещена история Службы предупреждения о цунами, созданной после трагедии 5 ноября 1952 г. и получившей значительное развитие в последние годы благодаря Федеральной целевой программе «Снижение рисков...». Дано описание истории становления и развития системы измерения характеристик цунами береговыми и глубоководными телеметрическими регистраторами, рассмотрены примеры анализа записей Чилийского (28.02.2010 г.) и Тохоку (11.03.2011 г.) цунами. Кратко изложена методика количественной оценки цунамиопасности побережья и приведены карты возможных высот цунами повторяемостью 1 раз в 100 лет для Северных и Южных Курильских островов.

Публикуемое издание представляет интерес для широкого круга читателей, а также специалистов в области изучения землетрясений и цунами.

Ключевые слова: Курильские острова, цунами, вертикальный заплеск, высота волны, период, землетрясение, магнитуда, магнитудно-географический критерий, регистратор, цунамиопасность, период повторяемости.

Ил. 43, библи. 20.

Издано по решению Ученого Совета
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук.
Россия, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б; E-mail: nauka@imgg.ru

*В оформлении обложки были использованы фотографии
А.Е. Святловского, Г.В. Беневоляского, Л. Котенко, а так же
фото с отчета 2-й Тихоокеанской экспедиции ТОФ.*

UDK 551.466

Tsunami in the Kurile Islands. The features of manifestation and measures to reduce the risk (the victims of the tragedy November 5, 1952 are dedicated) / G.V. Shevchenko, T.N. Ivetskaya and V.M. Kaystrenko. – Yuzhno-Sakhalinsk: IMG&G FEB RAS, 2012. – 44 p.

Executive editor: associated member RAS B.V. Levin.

The information about the manifestations of the most dangerous tsunamis that occurred in the Kurile Islands - Kamchatka 05.11.1952, Iturup 11.07.1958, Chile 24.05.1960, Urup 13 and 20.10.1963, Shikotan 05.10.1994 and Simushir 15.11.2006 is provided. The history of Tsunami Warning Services created after the tragedy of November 5, 1952 and has received considerable development in recent years due to the Federal Target Program «Risk Reduction ...». The history and development of the tsunami characteristics measuring by the coastal and deep-sea telemetry recorders is presented. The examples of the analysis of the records of Chile (28.02.2010) and Tohoku (11.03.2011) tsunamis are shown. The method of tsunami risk quantitative estimation and the maps of tsunami height distribution for the North and the South Kurile Islands for 100 years recurrence period are given.

Publishing materials are of interest to both the wide circle of readers and specialists of the sphere of earthquakes and tsunamis study.

Key words: Kurile Islands, tsunami, runup, wave height, period, earthquake, magnitude, magnitude and geographic criteria, recorder, tsunami risk, recurrence period.

Ill. 43, bibl. 20.

Published by the decision of the Scientific Council
of Institute of Marine Geology and Geophysics of Far East Branch
of Russian Academy of Sciences.
Russia, 693022, Yuzhno-Sakhalinsk, Nauki Str. 1B; E-mail: nauka@imgg.ru

© ИМГиГ ДВО РАН, 2012

Предисловие

В этом году мы отмечаем печальную памятную дату – 60 лет со дня Камчатского цунами 5 ноября 1952 года - по количеству унесенных жизней это самая трагическая природная катастрофа в истории не только Сахалинской области, но и всего Дальневосточного региона. Огромными волнами практически был уничтожен город Северо-Курильск, военно-морская база на о. Шумшу, а также ряд более мелких населенных пунктов на тихоокеанском побережье Северных Курил и Камчатки. Беспрецедентные человеческие жертвы и колоссальный материальный ущерб послужили серьезным уроком – правительством страны были предприняты адекватные и оперативные меры:

- *принято решение о создании Службы предупреждения о цунами,*
- *среди населения (в большинстве, переселенцев из центральных областей, не знакомых с особенностями данного явления и мерами предосторожности) проводится просветительская работа,*
- *Академии наук и гидрометеорологической службе (ныне – Росгидромет) были даны поручения по изучению цунами.*

Принятые решения были достаточно эффективными – ряд последовавших событий, некоторые из которых привели к серьезному материальному ущербу, не были причиной гибели курильчан.

Однако трагические события последних лет, среди которых особого внимания заслуживают катастрофические последствия цунами 11 марта 2011 года на северо-восточном побережье о. Хонсю, показывают коварный характер явления цунами, его чрезвычайную сложность и непредсказуемость. Даже наличие прекрасно отлаженной службы предупреждения и, вероятно, наиболее подготовленного и организованного населения, серьезных мер защиты (специ-

альные стены и т.д.) не смогли предотвратить многочисленных человеческих жертв. Это подчеркивает актуальность изучения цунами на Курильских островах – наиболее подверженных воздействию цунами в нашей стране.

В данной работе приведен обзор основных результатов, достигнутых сахалинской наукой в области изучения особенностей проявления волн цунами на Курильских островах. Приведена информация о мерах по снижению риска – развитию службы предупреждения населения о цунами, а также количественной оценки цунамиопасности различных участков побережья и созданию соответствующих карт.

Содержание

1. Введение	5
2. Краткие сведения о физике цунами	7
3. Последствия цунами на Курильских островах	10
- Цунами 5 ноября 1952 года.....	10
- Цунами 7 ноября 1958 год.....	16
- Чилийское цунами 24 мая 1960 года.....	17
- Урупские цунами 13 и 20 октября 1963 года.....	19
- Шикотанское цунами 5 октября 1994 года.....	21
- Симуширское цунами 15 ноября 2006 года.....	23
- Тохоку цунами 11 марта 2011 года.....	25
4. Служба предупреждения о цунами	27
5. Характеристики цунами по данным инструментальных измерений	32
- Регистрация цунами береговыми самописцами уровня моря.....	32
- Чилийское цунами 27 февраля 2010 года.....	34
6. Количественная оценка цунамиопасности	40
Литература	43

Введение

Цунами относится к числу самых грозных стихийных явлений природы, которые наносят большой ущерб хозяйственным объектам прибрежных населенных пунктов Дальневосточного региона России, а иногда приводят к человеческим жертвам. Термин «цунами» имеет японское происхождение и означает «большая волна в гавани».

Цунами представляет собой длинную волну (чаще цуг, или группу таких волн), которая вызывается движениями дна океана в области сильного подводного землетрясения. Гораздо реже это явление бывает связано со взрывными извержениями вулканов или оползнями, но эти виды источников не играют существенной роли для дальневосточного побережья России и в данной работе не рассматриваются.

Курильская островная дуга (а также полуостров Камчатка) находятся вблизи одной из самых сейсмоактивных областей в мире, которая приурочена к западному склону Курило-Камчатского глубоководного желоба (рис. 1.1).

Именно здесь расположены и очаги цунамигенных (вызвавших цунами) землетрясений, соответствующая карта приведена на рис. 1.2.

Цунамигенные землетрясения в данном районе распределены крайне неравномерно. На Северных Курилах отмечено четыре таких события, два из которых, произошедших 17 октября 1737 и 4 ноября 1952 года, относились к числу наиболее грозных. Последнее по тяжести последствий и количеству жертв не имеет себе равных на тихоокеанском побережье России. На Средних Курилах таких землетрясений было всего три, причем два из них произошли недавно, в 2006 и 2007 гг. Цунами 15 ноября 2006 года также относится к числу особо опасных, хотя волны высотой 12-20 м обрушились на безлюдные берега островов Симушир, Кетой, Матуа и другие в центральной части островной гряды. Для сравнения, в районе Южных Курильских островов за исторический период зафиксировано 20 цунамигенных землетрясений, хотя интенсивность большинства возникших цунами была несколько ниже, чем при экстремальных событиях в центральной и северной части гряды. Но и здесь были отмечены значительные цунами, принесшие существенный материальный ущерб прибрежным населенным пунктам. Последнее из них про-

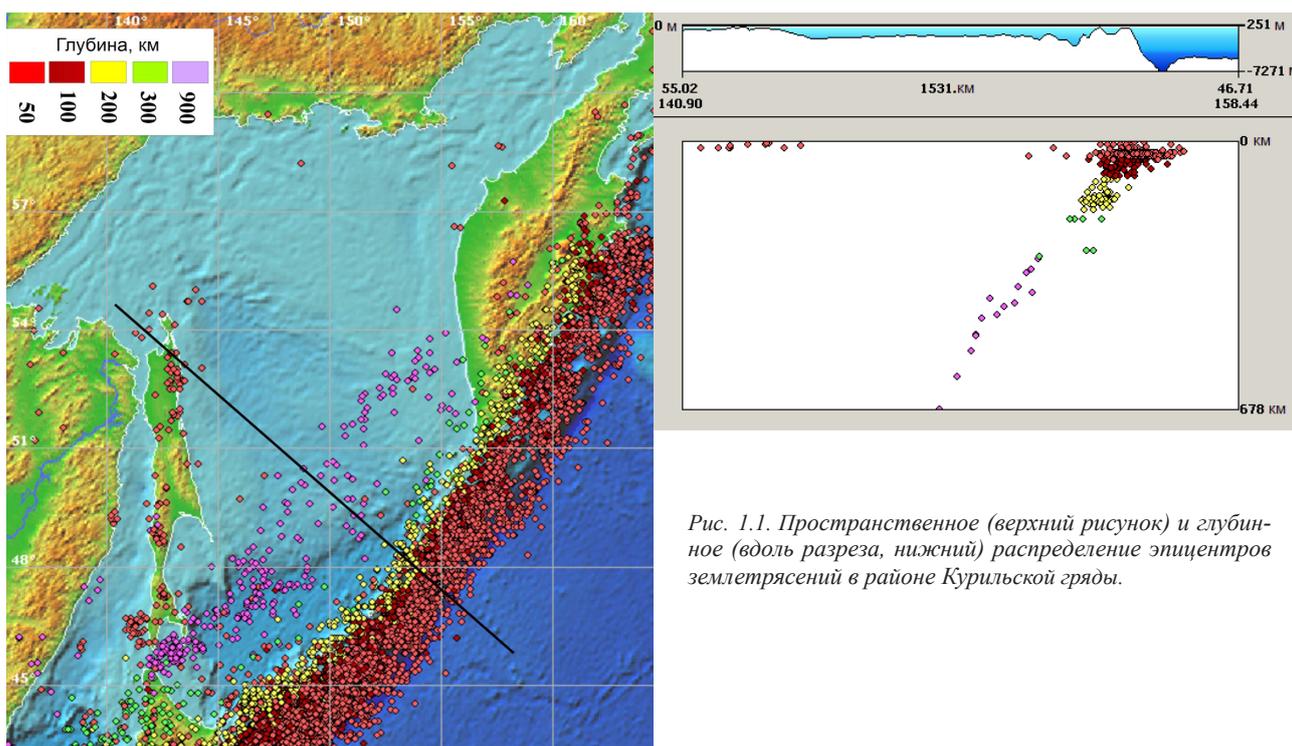


Рис. 1.1. Пространственное (верхний рисунок) и глубинное (вдоль разреза, нижний) распределение эпицентров землетрясений в районе Курильской гряды.

изошло 4 октября 1994 года. Ниже приведены краткие сведения о проявлении наиболее сильных цунами на Курильских островах и материальном ущербе от них.

По повторяемости сильных цунамигенных землетрясений материковый склон у Южных Курильских островов относится к числу самых цунамиактивных районов в мире. По этой причине изучению цунами и мерам по снижению ущерба от них в нашей стране уделяется большое внимание. Эти меры разделяются на две категории.

Во-первых, для данного вида морских опасных явлений (одного из немногих ЧС природного характера) создана Служба по оперативному предупреждению (СПЦ) населения прибрежных населенных пунктов, расположенных в цунамиопасных районах. При возникновении угрозы цунами по специальному сигналу население эвакуируется из опасной зоны, а находящиеся в портах суда выходят в открытое море. СПЦ была создана в конце пятидесятих годов прошлого века и основывалась на сейсмологической информации о характере землетрясения (магнитуда, глубина очага и положение эпицентра), для которой был сформулирован так называемый магнитудно-географический критерий цунамигенности. Землетрясение считается цунамиопасным, если его эпицентр попадает в цунамигенную зону, а магнитуда превышает заданное пороговое значение. Пороговое значение магнитуды землетрясений для объявления тревоги цунами для Курило-Камчатской зоны принято равным $M_{пор} = 7.0$. Для удаленных цунамигенных зон в Тихом океане пороговые значения различны и меняются в пределах от 7.5 до 8.5 в зависимости от расстояния. Этот принцип и сейчас играет ключевую роль в деятельности СПЦ, хотя в последнее время на Курильских островах разворачивается сеть телеметрических регистраторов, позволяющих в реальном времени получать информацию о характере волнового процесса. Основные этапы развития СПЦ также рассматриваются в данной работе.

Помимо непосредственной оценки высот волн в защищаемом регионе и степени опасности цунами в целях предупреждения населения, инструментальные измерения колебаний уровня моря дают наиболее надежную информацию о характеристиках цунами – моментах прихода и высотах первой и максимальной волн, преобладающих периодах и длительности колебаний. ИМГиГ ДВО РАН был пионером в разработке специальной аппаратуры для дистанционного

измерения длинных волн в диапазоне периодов цунами – регистраторов придонного гидростатического давления. В феврале 1981 года на шельфе о. Шикотан была осуществлена первая в мире регистрация цунами в открытом океане. После значительного перерыва, институт возобновил мониторинг цунами на Южных Курильских островах на разнесенной сети автономных станций. В последние годы на регистраторах

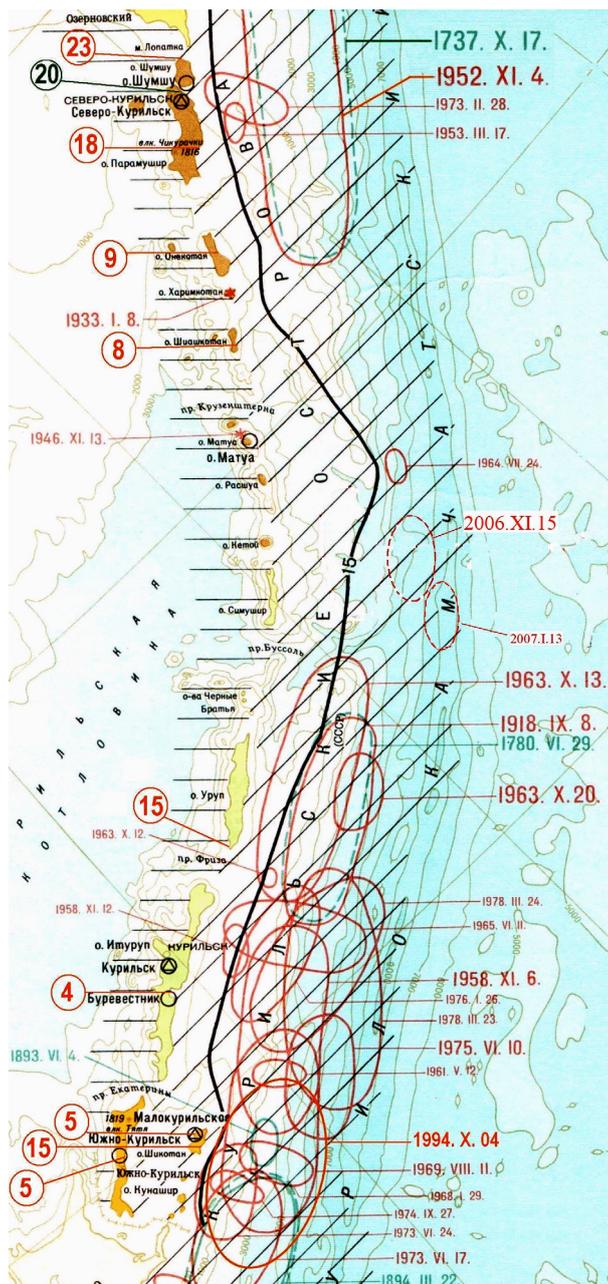


Рис. 1.2. Карта очагов и высот цунами в районе Курильских островов [Курильские острова].

ИМГиГ и СПЦ получены многочисленные записи цунами, вызванных сильным землетрясениями вблизи о. Симушир (15.01.2009), архипелага Самоа (29.09.2009), Чили (27.02.2010) и северо-восточного берега о.Хонсю (11.03.2011).

Вторым видом мер по снижению риска негативного воздействия цунами на объекты береговой инфраструктуры является расчет цунамиопасности (возможной высоты волны повторяемостью 1 раз в 50 или 100 лет на данном

участке побережья) и создание соответствующих карт. Такие оценки необходимы для оптимального выбора места для размещения новых промышленных объектов в прибрежной зоне или выбора необходимых мер защиты на этапе проектирования. Эти работы проводятся Институтом морской геологии и геофизики ДВО РАН при поддержке Министерства строительства Сахалинской области.

Краткие сведения о физике цунами

Цунами представляет собой длинную волну (чаще цуг, или группу таких волн), которая вызывается движениями дна океана в области сильного подводного мелкофокусного землетрясения. Реже эти волны возбуждаются взрывами подводных вулканов, сходом лавин или оползней. В некоторых случаях сходные с цунами аномальные колебания, как правило, проявляющиеся локально, в сравнительно небольших по размерам районах, возбуждаются иными, в том числе метеорологическими причинами (существует специальный термин – метеоцунами). Однако на Курильских островах практически все цунами вызывались землетрясениями, в большинстве случаев расположенными на прилегающем к ним материковом склоне. В некоторых ситуациях тихоокеанского побережья России достигали волны от весьма удаленных источников – например, от берегов Южной Америки.

При сильном подводном землетрясении в земной коре происходят значительные, до нескольких метров, колебания морского дна (рис. 2.1а), которые проявляются на поверхности моря в виде возвышения и понижения отдельных ее участков. Пространственные масштабы этих участков соответствуют размерам очага землетрясения и составляют в продольном направлении сотни, а в поперечном – десятки километров. Сила тяжести стремится выровнять поверхность и привести ее в исходное положение – в результате возникают волны, подобные колебаниям маятника (по своей природе волны цунами являются гравитационными). Эти волны, в отличие от обычно наблюдаемого на поверхности моря ветрового волнения, являются длинными, их пространственные масшта-

бы примерно на три порядка больше. Скорость распространения длинных волн зависит только от глубины и определяется формулой Лапласа:

$$V = L/T = \sqrt{gH}$$

где L – длина волны (расстояние между двумя гребнями), T – период (время прохождения через заданную точку двух последовательных гребней), g – ускорение силы тяжести, H – глубина океана. В открытом океане, средняя глубина которого составляет около 4 км, скорость распространения длинных волн составляет 200 м/с, или 720 км/ч. Характерные длины волн цунами составляют 100-500 км, а периоды – от 10 до 40 минут. При очень сильных землетрясениях (Чилийское, май 1960, Тохоку, март 2011) размеры очаговых областей могут быть больше, и тогда наблюдаются волны с периодом 1 час и более. Амплитуды даже очень сильных цунами в открытом океане редко превышают 1 м, обычно их величина составляет несколько десятков см. Естественно, что такие вариации на расстоянии в десятки или сотни километров невозможно заметить без специальной измерительной аппаратуры, именно поэтому при угрозе цунами находящимся в портах или на рейдах судам дается команда выйти в открытое море, где они будут в безопасности.

Именно с уменьшением скорости распространения волн цунами вследствие уменьшения глубины океана и связана их разрушительная сила. Так, если глубина океана в зоне шельфа составляет 40 м, то скорость распространения длинных волн уменьшается по сравнению с глубоководной частью в 10 раз. Соответственно, во столько же раз уменьшается длина волны

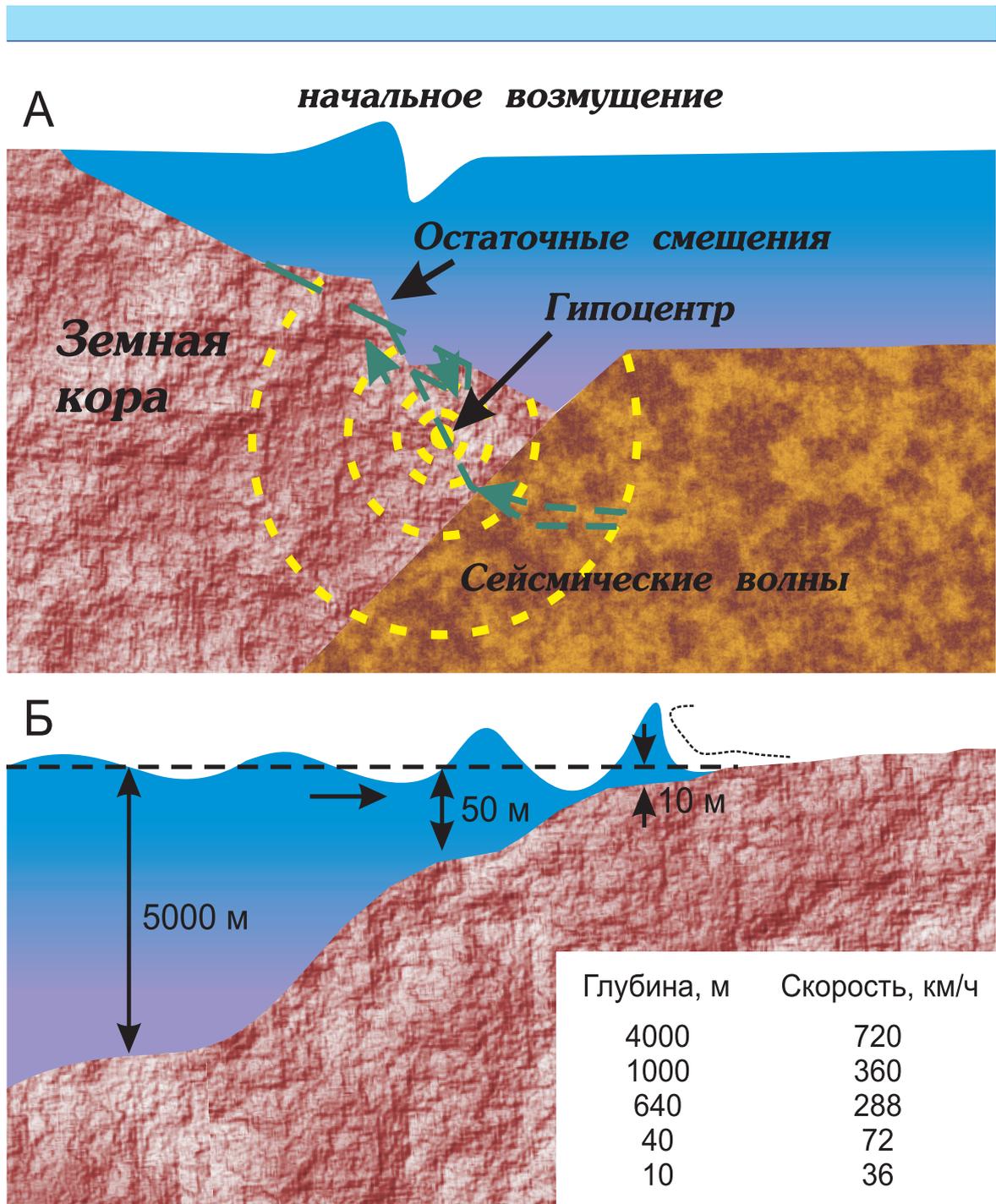


Рис. 2.1. Генерация цунами в области подводного землетрясения (а) и трансформация волн по мере подхода к берегу (б).

— она сжимается, но резко возрастает высота. Чем меньше глубина, тем сильнее это выражено, и на берег обрушиваются гигантские волны, вызывающие эрозию прибрежной зоны, сметающие находящиеся на их пути постройки и сооружения (рис. 2.1б).

Характер воздействия цунами на побере-

жье определяется величинами вертикального и горизонтального заплесков. Эти параметры рассчитываются относительно уреза воды — среднего положения уровня моря на берегу (приливная компонента устраняется). При поиске следов исторических событий именно их установление является основной задачей про-

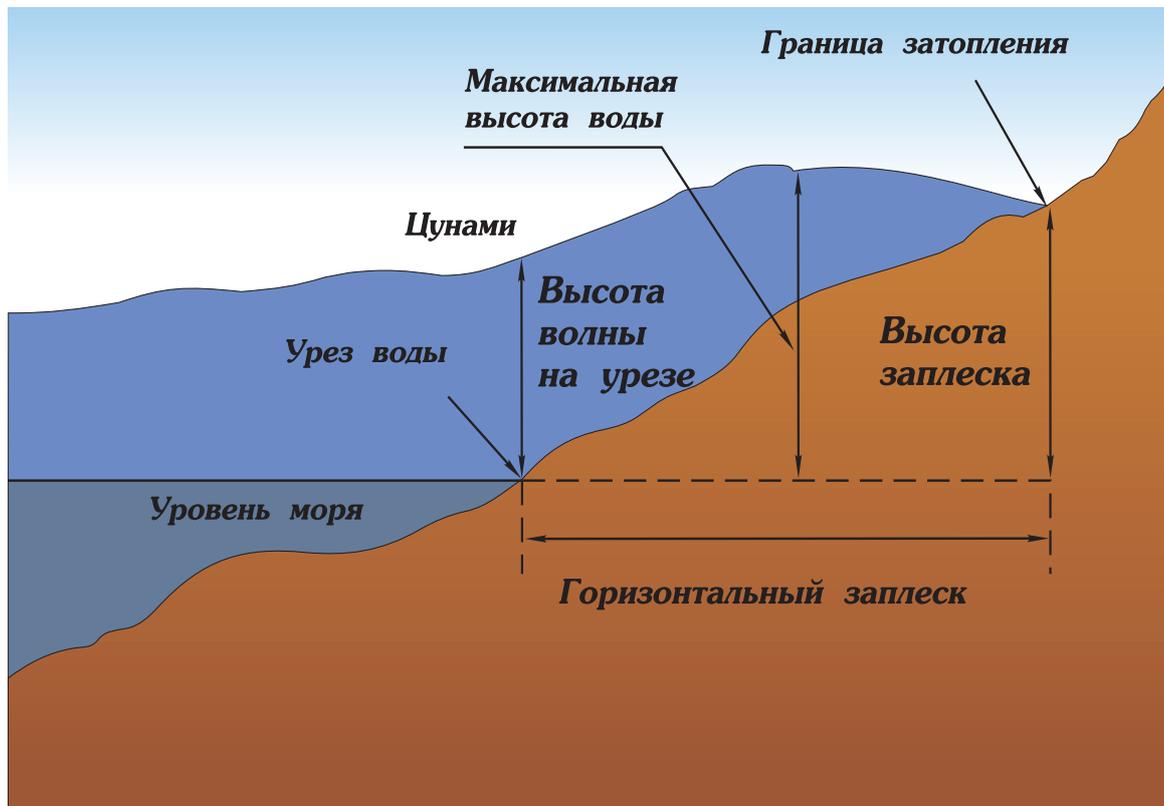


Рис. 2.3. Характеристики цунами в береговой зоне.

водимых экспедиционных обследований участков побережья, подвергшихся воздействию цунами. Под высотой волны цунами, в отличие от традиционной для теории ветровых волн разностью между подошвой и гребнем волны, понимается положительное отклонение от среднего уровня. Отрицательные отклонения также важны, они характеризуют динамические нагрузки при откате цунами, которые также представляют серьезную угрозу для объектов, попавших в зону затопления.

Из-за чувствительности к вариациям донного рельефа, а также береговой черты, цунами отличается значительной пространственной изменчивостью высот и дальности заплесков. Особенно это характерно для заливов и бухт, в которых имеются выраженные резонансные колебания, их периоды близки к периодам цунами. Каждая мода резонансных колебаний имеет свои пучности (зоны с максимальными колебаниями) и узловые линии (колебания малы, но в их окрестностях возникают сильные течения).

Последствия цунами на Курильских островах

Камчатское цунами 5 ноября 1952 года

5 ноября 1952 года у дальневосточных берегов России произошло цунами, вызвавшее самые катастрофические последствия не только в Сахалинской области, но и во всем Дальневосточном регионе. Только на Северных Курильских островах погибли 2336 человек гражданского населения (потери среди военных так и не были рассекречены). Практически все поселки на побережье Южной Камчатки и Северных Курильских островов были уничтожены волнами высотой до 20 м (рис. 3.1). В самом Северо-Курильске, наиболее крупном на-

селенном пункте в атакованном цунами районе, было смыто 95 % строений – из рис. 3.2 видно, что практически вся его территория находилась в зоне затопления. Столь большие разрушения и потери были, с одной стороны, объективным следствием очень сильного и соответственно, редкого цунами, вызванного сильнейшим землетрясением с магнитудой $M = 8.5$, а с другой стороны – следствием полной неготовности населения, не подготовленного к проживанию в цунамиопасном районе. Люди, заселившие эти острова после их возвращения России, прибы-



Рис. 3.1. Максимальные высоты волн на побережье Северных Курил при Камчатском цунами 5 ноября 1952 года.

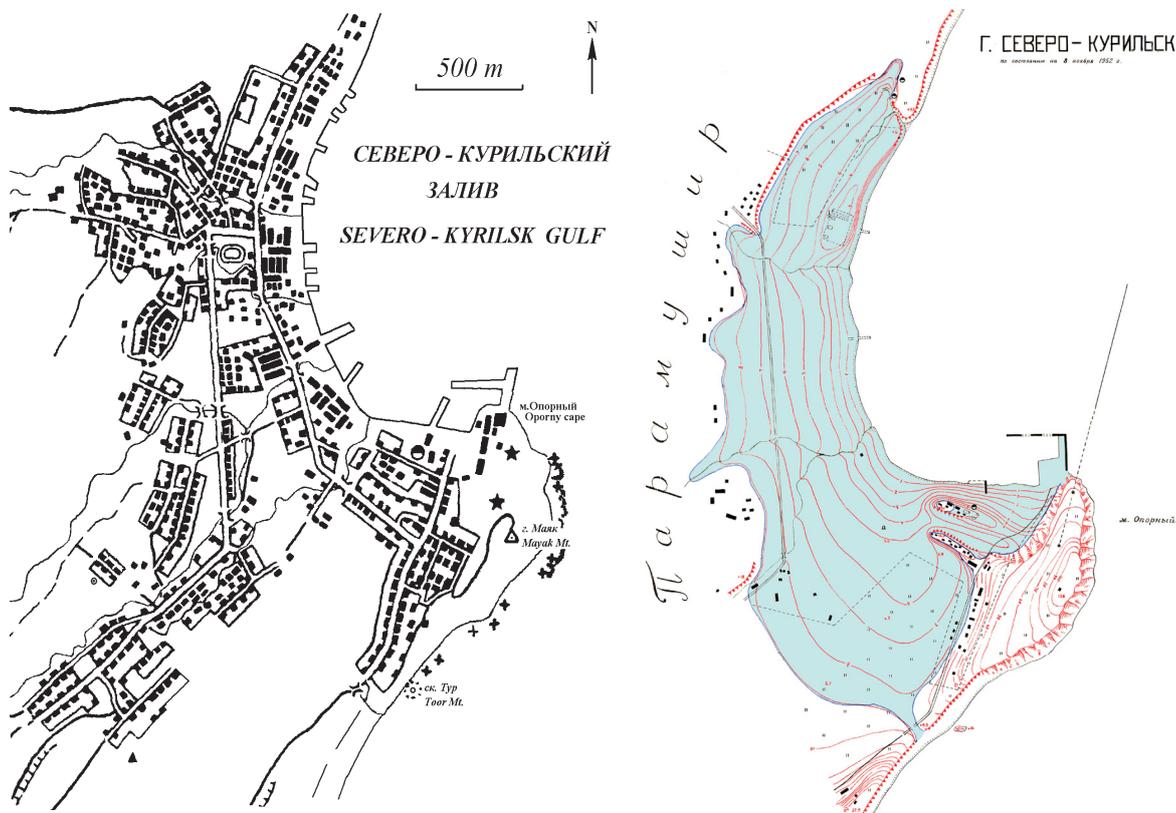


Рис. 3.2. Карта г. Северо-Курильск перед цунами 5 ноября 1952 года (слева) и зона затопления города (из работы [Kaistrenko, Sedaeva, 2001]).

ли, в основном, из европейской части страны и никогда не слышали о таком явлении.

Директор рыбокомбината в поселке Океанский на о. Парамушир писал 10 ноября, что спаслись только 542 человека, 460 человек пропали при цунами.

Цунами 1952 года было трансокеаническим, сопровождавшимся волнами опасной высоты практически по всему Тихому океану: до 4 м в Японии, до 6 м на Гавайских островах, до 3 м на побережье Чили.

Благодаря оперативности командира Камчатской флотилии адмирала Г. Холостякова и начальника Второй Гидрографической экспедиции И.П. Кучерова было проведено обследование атакованного цунами района по свежим следам. Отчет Гидрографической экспедиции и последующая публикация группы исследователей Института Физики Земли являются наиболее полными сводками данных о проявлениях этого цунами.

Приведем несколько свидетельств очевидцев трагедии

Н.И. Михальченко, в 1952 г. капитан рыболовного судна:

«Мы с женой жили в 30-40 м от берега в Океанском, выскочили на улицу. Трясло сильно, мы с трудом удерживались на ногах. После тряски вернулись в дом спать (штукатурка вся обвалилась). Только легли - снова трясет. Жена и сам стали одеваться, зашел одетый уже сосед. Только открыли дверь, слышу кричат: «вода» (сначала показалось «пожар») - волна ударила и подбросила к потолку, барак развалился. Вылез на крышу, ее несет водой, темно, ничего не видно. Когда крыша остановилась, пощупал ногой - земля. Остался в одном сапоге и побежал в сторону комбината.

Увидел человека наверху на дороге, который позвал меня к костру, около которого стояли почти неодетые люди. Пятеро женщин из нашего барака и моя жена. Увидел там и соседа, который дал мне шубу и сухое белье. Когда начало светать, сосед и я пошли вниз искать его детей. В магазине, куда вода не дошла, взяли теплые брюки и телогрейки и отнесли людям. Потом снова спустились вниз.

На сопке находились 2-3 суток, потом подошли СРТ из Петропавловска и привезли нас в Северо-Курильск. Позже судно «Либерти» вывезило людей во Владивосток, и нас тоже».

*...услышали гул и увидели вдали отсвет
луны в виде полоски,
движущейся по проливу с большой
скоростью...*

Рис. 3.3. Центральная часть Северо-Курильска после цунами. Фото Л. Бондаренко.



А. Мезис, в 1952 году капитан сейнера:

«4 ноября я приехал к семье в Козыревск, а судно оставалось в Северо-Курильске вследствие неисправности... Ночью случилось сильное землетрясение с гулом. К практически ежедневным толчкам мы привыкли, однако на этот раз трясло сильно...

Вышел из дома по направлению к берегу - люди бегут от берега с криками: «Волна, волна!»... Луна светила ярко. На море полный штиль (после первой волны прошло около 30 минут), возле домов нанесено песка, стены домов мокрые, людей почти нет... Я обратил внимание, что вода быстро уходит, оголив дно до глубин 7-8 метров. И тут услышали гул и увидели вдали отсвет луны в виде полосы, движущейся по проливу с большой скоростью. Мы побежали вверх по тропинке. Сверху при ярком свете луны было хорошо видно, что идущая волна имеет гладкий профиль без бурунов, но бурунится, встретив препятствие.

Рис. 3.4. Дома в Северо-Курильске, разрушенные цунами.



Расстояние от Козыревска до Северо-Курильска через пролив около 3 миль. Было хорошо видно, как волна ударила в Маячную сопку и взмыла вверх. В прибрежной части Козыревска волна ударила в рыбоконсервный завод и стала его двигать, как бульдозер. Мы стояли на краю обрыва, рядом с нами, внизу, бурлящая вода, бревна, обломки. Волна пошла дальше, затем уровень стал понижаться. Вся долина заполнена обломками. Пройти почти невозможно...

Волна, пройдя низину в Северо-Курильске, смыла постройки в залив, который почти весь покрылся обломками. В обломках - масса людей. Мой сейнер сорвало и вынесло в море, не повредив. Находившаяся на нем часть команды запустила двигатель и корабль пошел сквозь обломки, подбирая людей... Потом сейнер подошел к Козыревску и я сменил старшего помощника, чтобы тот шел искать свою семью. Мы на сейнере ходили в проливе и были заняты спасательными работами... В заливе долго держались люди, но кораблям двигаться среди обломков было трудно... К 12 часам дня было уже более десятка судов. Примерно 100 детей мы доставили из Северо-Курильска на подошедшие суда.

На третий день начали эвакуировать людей из Козыревска и увидели плывшую по проливу крышу дома, на которой находился человек. Это была жена боцмана с океанского сейнера. Все это время ее носило приливным течением через пролив из океана в Охотское море и обратно. Несмотря на перенесенный ужас, переохлаждение (ноябрь!) и раны, женщина была в сознании, и впоследствии осталась жива...»

Были случаи мародерства, которые пресекались военными властями.

Рис. 3.5. Разрушения на военно-морской базе «Катаока», пос. Байково, о. Шумуи.



Л. Дюбровский, начальник райотдела:

«В Северо-Курильск я прибыл с семьей в феврале 1952 года и поселился в поселке Матросский, примерно в 1,5 км к юго-западу от порта.

Землетрясения здесь были довольно часто, и мы мало обращали на них внимания, потому что особого беспокойства они не причиняли. С цунами я был знаком по литературе. До 1952 года никаких сигналов, предупреждающих о цунами, не было.

4 ноября 1952 года я проснулся около 4-х часов утра (на моих часах было без 4-х минут 4) от сильного подземного толчка или серии толчков и какого-то гула, похожего на звук работающей у дома автомашины. Домик мой качался и трещал, посуда полетела с полок.

Прошло несколько мгновений и стало ясно, что землетрясение не обычное, трясет очень сильно. Домик (полуземлянка) был построен из досок, скрепленных проволокой, листами жести и пр. Конструкция была, что называется, сейсмически стойкая. Как я потом увидел, практически все было цело, только из печки было выбито несколько кирпичей, но и она была в дальнейшем пригодна для использования. В других домах (полуземлянках) разрушений было больше. Я быстро встал, взял с кровати дочку, завернул ее в одеяло и вместе с женой выбежал из дома.

Было темно. Из соседних домов тоже вышли люди, одетые кто в чем. Недалеко от моего дома стояла грузовая автомашина марки Студебеккер с металлическим кузовом. Во время толчков она как-то прыгала и грохотала всем своим железом. Провода линии электропередачи раскачивались и искрились. Было очень тревожно. Через несколько минут я вернулся в дом, оделся и стал выяснять обстановку.

В это время со стороны города послышался странный, необычный шум, грохот, треск, крики людей, домашних животных, птиц - все слилось в единый гомон какой-то беды. Я попытался выяснить обстановку у соседей, но телефон не работал.

Обходя поселок, я вышел к берегу, высота которого была метров 16-18, и увидел, что вода в океане отступила от берега, дно обнажилось. Такую картину я наблюдал впервые, но помнил из литературы, что так бывает во время цунами. Нужно было ждать следующей волны.

Вторая волна была минут через 40 после первой. Я видел воду «под ногами», т.е. значительно выше, чем в обычных условиях.

Когда рассвело, я в бинокль посмотрел на город и не узнал его - города не было.

Утро было тихое, солнечное, океан был спокоен. Под берегом плавали какие-то ящики, бочки, обломки и даже был виден целый небольшой деревянный дом. Стало ясно, что произошло. Я спустился к урезу воды, осмотрел и распорядился, чтобы с берега вывозили все, что можно еще спасти: мешки, ящики, бочки и пр.

Мосты вблизи поселка были снесены или разрушены. На рейде Северо-Курильска стояло несколько судов. В дальнейшем количество их все увеличивалось. Со шлюпок высаживались какие-то люди, рекомендовали уходить выше, в сопки, т.к. волны будут еще выше.

Откуда-то появился самолет, с него сбрасывали хлеб и папиросы.

Обстановка все же была сложная, нервная. Я решил отправить женщин и детей в сопки, подальше от воды. Погрузили в машину женщин и детей, некоторые документы, продукты и отправили в сопки. Стали осматриваться. Кое-кто уже успел сходить в город и вернуться с мешками, набитыми консервами, бутылками с вином и еще какими-то товарами. Нужно было прекратить этот грабеж.

Я пошел в город. Всюду виднелись разрушения. Кое-где попадались трупы людей. В порту, на стреле подъемного крана, был вдавлен человек. Далеко на берег был выброшен сейнер. Только один, сложенный из больших камней дом стоял на своем месте, но без крыши, без дверей и оконных переплетов.

Командир танко-десантного корабля рассказывал, что его корабль стоял в ковше на якоре и на швартовых. Волной корабль был выброшен из ковша, оказался в проливе, не имея никаких повреждений, и в дальнейшем участвовал в эвакуации людей».

Цунами 7 ноября 1958 года

7 ноября в 9 часов 59 минут местного времени в районе Южных Курильских островов произошло землетрясение разрушительной силы с магнитудой $M=8.2$. Координаты эпицентра составляли 44.53° с.ш. и 148.54° в.д. (рис. 3.6), фокальная глубина равнялась 40 км. Максимальная балльность отмечена на о. Итуруп (до 8 в районе пос. Горячие Ключи). Толчки ощущались также на Северных и Центральных Курильских островах и острове Сахалин. Эпицентр землетрясения находился в районе глубоководного желоба напротив о. Итуруп (рис. 3.6). Впервые в истории нашей страны

была объявлена тревога цунами (этот вопрос подробнее обсуждается ниже).

Несмотря на принятые меры по созданию службы предупреждения о цунами и работе с населением, в 1958 году надлежащего опыта не было, и с береговых гидрометеостанций поступали отрывочные и недостаточно точные данные.

Прежде всего, цунами подошло к острову Итуруп. В заливе Касатка первая волна отмечена примерно через 30 минут после начала землетрясения. Точное время появления первой волны никто не засек.

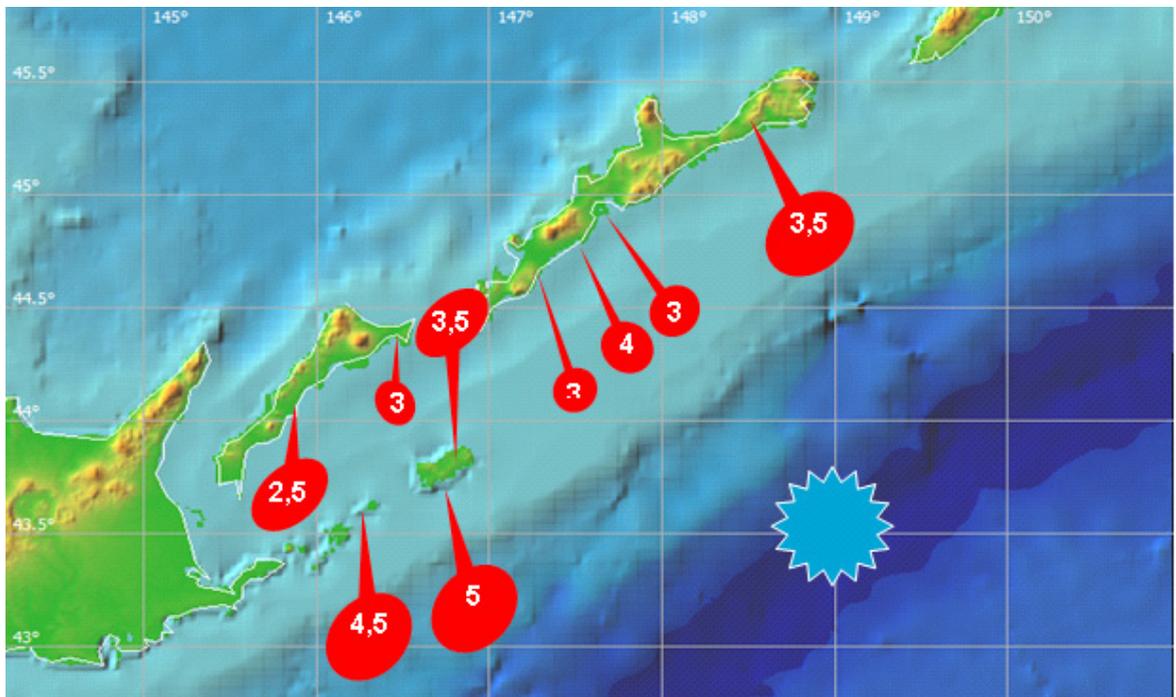


Рис. 3.6. Карта высот цунами 07.11.58 на южных Курильских островах. Синей звездой отмечено положение эпицентра землетрясения.

Максимальной высоты и разрушительной силы была вторая волна, которая пришла примерно через 18-20 минут после первой, затем пришла третья волна, после чего колебания продолжались в течение 15 часов с затухающей силой. Высота первой волны у пирса в поселке Буревестник равнялась 2 метрам, вторая и третья волны были высотой около 3-х метров. Второй волной был выброшен на пирс (1,8 м над средним уровнем моря) танковоз, который имел осадку около 1 м (рис. 3.7). Хотя по своей силе землетрясение было близким к Камчат-

скому 1952 г, волны цунами были значительно меньше ожидаемых – на океанском побережье островов Шикотан и Итуруп максимальные заплески достигали 4-5 м (рис.3.6).

В поселке Малокурильское полностью разрушены пирсы, частично разрушены складские помещения, выведены из строя три рыболовецких судна, волной унесен запас картофеля. Три семьи потеряли личное имущество.

В поселке Крабовоздск также разрушены пирсы, базы отстоя и ремонта кораблей, выброшены на берег 5 рыболовецких катеров.

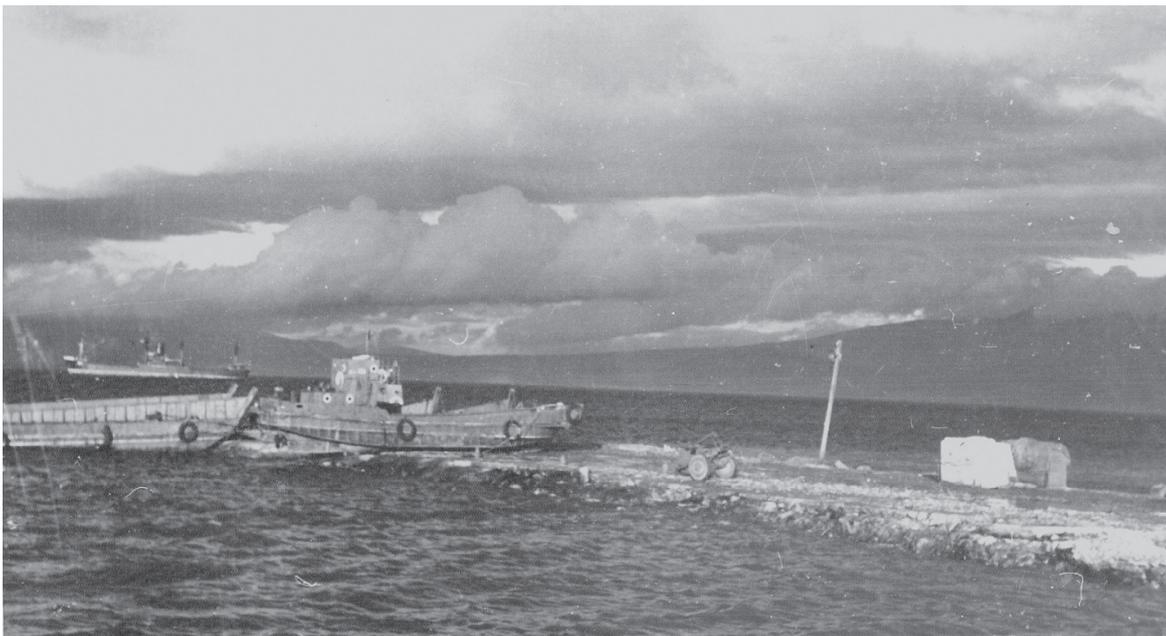


Рис. 3.7. Выброшенный на пирс танковоз «Армеец». Портпункт Буревестник, о. Итуруп.

Чилийское цунами 24 мая 1960 года

Двадцать третьего мая в 6 часов 15 минут по сахалинскому времени в Тихом океане, у берегов Чили произошло самое сильное в XX веке землетрясение с магнитудой $M_w = 9.5$, вызвавшее образование мощного трансокеанического цунами. Цунами у берегов СССР, вызванное таким далеким землетрясением, наблюдалось впервые. Об исключительности явления говорит тот факт, что колебания уровня наблюдались у берегов Сахалина и у северного побережья Охотского моря, где раньше волны цунами не регистрировались и при гораздо более близких землетрясениях. В бухте Нагаева отмечалось пять ярко выраженных волн, максимальная высота которых (от подошвы до гребня, по мареограмме) достигала 220 см, в порту Корсаков – 190 см.

В Северо-Курильске цунами началось с резкого падения уровня, которое было замечено дежурным портнадзора в 4 часа 45 минут по сахалинскому времени, на основании этого сообщения была объявлена тревога цунами - население поднялось на сопки, а флот был выведен в открытое море. Хотя повышение уровня носило скорее характер подтопления, волной цунами был причинен серьезный ущерб. Все склады и жилые помещения города, располо-

женные ниже отметки 4,7 м, были затоплены. В порту смыло значительное количество соли, угля, лесоматериалов, вышла из строя энергетическая система и т.д.

Цунами 24 мая характерно тем, что высоты волн имели примерно одинаковый порядок как в бухтах, так и у открытого побережья. Волны такой же высоты, как и в Северо-Курильске, наблюдались на гидрометеостанциях мыс Васильева и Шумшу (около 5 метров по визуальным данным). На Южных Курильских островах высоты волн также были значительными, по наблюдениям на станциях Буревестник, Малокурильское, Южно-Курильск и Зеленовск они составляли 3 – 4 м.

В бухте Малокурильская 24 мая в 05 часов 45 минут по сахалинскому времени начался быстрый отлив, дно моря оголялось на 80-90 метров, затем начался прилив, но уровень моря не превысил обычной полной воды. В 05 часов 55 минут подошла первая значительная волна. Уровень моря поднялся выше приливного на 2 метра. Были затоплены пирсы, накренились пришвартованные к ним суда. Затем произошел быстрый отлив, и в 07 часов 05 минут подошла максимальная волна. Уровень повысился на 3,5-4 метра выше приливного. Было затоплено



Рис. 3.8. Приемно-транспортный рефрижератор, выброшенный на мель в Малокурильской бухте.

несколько домов, склад с фуражом, сорвано 2 метра пирса. От пирса оторвало груженое судно ПТР-5 и выбросило на берег (рис. 3.8). Сорвало стоявший на 4-х якорях пароход «Дзержинский» и пришвартованные к нему судна и вынесло в море, выбросило на пирс стотонную баржу.

Стоявший под разгрузкой пароход «Иван Сеченов», около 6 тысяч водоизмещением, сорвало с 2-х якорей и три раза выносило через пролив из бухты и обратно, несмотря на то, что его машины работали на полную мощность.

Волной сорвало и унесло на 200 метров вверх по реке деревянный мост. На вновь стро-

ящемся рыбозаводе унесло более 200 кубов круглого леса и много пиломатериалов.

После второй волны наблюдались еще 4 волны с амплитудой от 1,5 до 2 метров, затем колебания уровня стали затухать, но продолжались до 15 часов 25 минут.

Все станции отмечали спокойный характер явления - сравнительно медленное понижение и повышение уровня и сильные течения, наблюдавшиеся в ряде бухт.

Цунами 24 мая обошлось без человеческих жертв, но принесло значительный материальный ущерб, составивший по Сахалинской области около 30 миллионов рублей.

Урупские цунами 13 и 20 октября 1963 года

Два значительных по масштабам землетрясения и цунами произошли с интервалом в одну неделю на Курильских островах в октябре 1963 года. Первое из них проявилось на всем тихоокеанском побережье Курильских островов, а также было зарегистрировано на береговых самописцах уровня Японии, Гавайских островов и Калифорнии. Второе носило более локальный характер, но вблизи источника высоты волн были даже больше, чем при более сильном землетрясении 13 октября.

Землетрясение с магнитудой $M=8.1$ произошло 13 октября 1963 года в 5 часов 18 мин по Гринвичу, координаты эпицентра составляли 44.81° с.ш. и 149.54° в.д. (он находился на материковом склоне вблизи о. Уруп), фокальная глубина равнялась 47 км.

По наблюдениям вблизи источника (гидрометеостанции на Уруп и Ван-дер-Линда), цунами началось с понижения уровня моря (зона осуш-

ки составляла 70-80 м), затем пришла первая волна высотой 2-3 м. После нее последовал более значительный отлив, зона осушки составляла 400-500 м. Вторая волна была самой опасной, по данным гидростатического регистратора в бухте Невидимка ее высота составила 4,4 м. Всего было отмечено 5 крупных волн с интервалом 12-15 мин, затем интенсивность цунами постепенно снижалась.

Цунами проявилось главным образом на тихоокеанском побережье островов Уруп и Итуруп, но также вызвало достаточно опасные колебания уровня на Шикотане, Кунашире, а также островах Малой Курильской гряды. На Средних и Северных Курилах цунами было достаточно интенсивным (высоты около 1 м), но серьезной опасности не представляло.

Цунами 13 октября нанесло существенный ущерб хозяйственным объектам на тихоокеанском побережье [Соловьев, 1965]. Так, в бухте

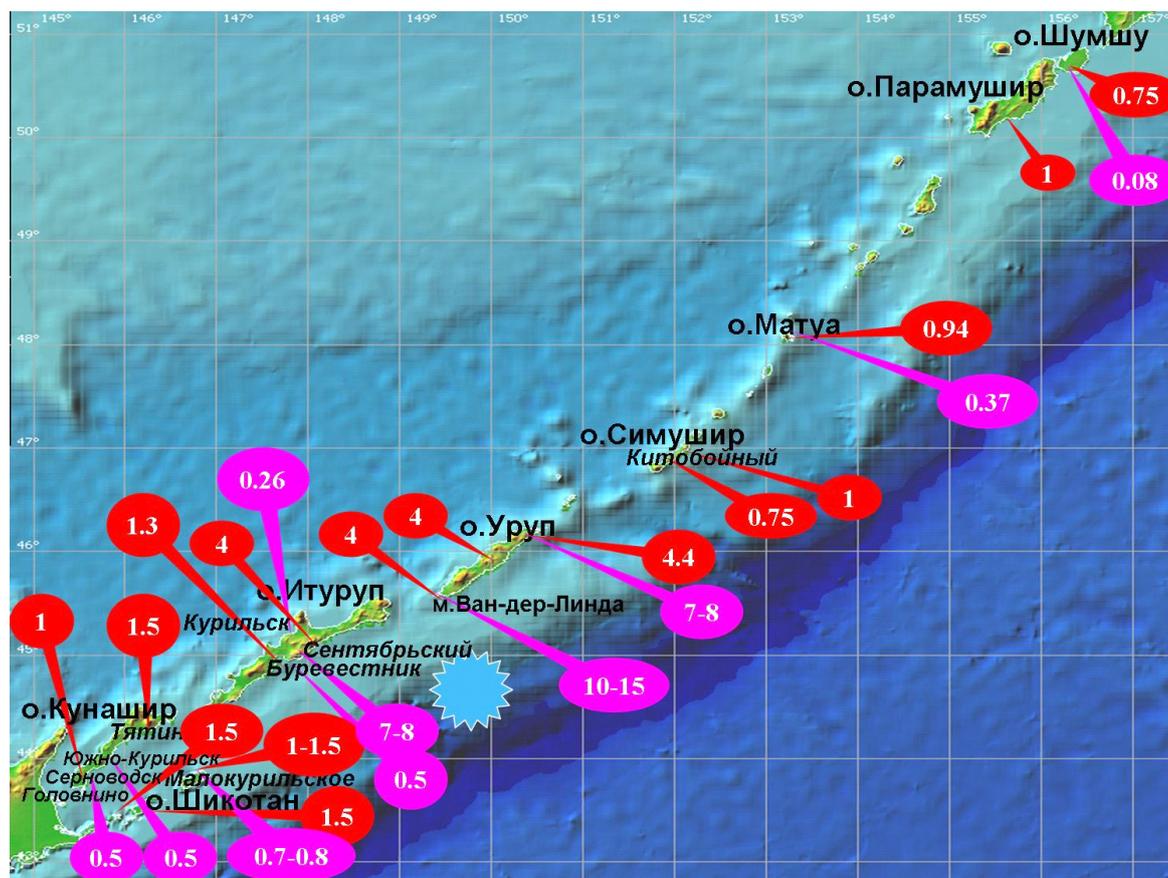


Рис. 3.9. Распределение высот цунами 13 (красные метки) и 20 (фиолетовые) октября 1963 года на побережье Курильских островов [Соловьев, 1965].



Рис. 3.10. Бревно, заброшенное волной цунами 20 октября 1963 г. на скалу. Мыс Ван-дер-Линда, океанская сторона. Фото Е.М.Шишова.

Катаева, которая незначительно вдается в берег непосредственно к северо-востоку от мыса Ван-Дер-Линда, цунами унесло 80 тонн угля, 14 тонн дизтоплива, 100 штук бочкотары. Аналогичный ущерб был причинен китокomboинатам в бухте Алеутка, «Скалистый» на о. Симушир и т.д. В бухтах о. Шикотан несколько судов было выброшено цунами на мель.

Сильнейший афтершок ($M=7.4$) этого землетрясения был зафиксирован 20 октября 1963 года, координаты эпицентра составляли 44.78° с.ш. и 150.24° в.д. (он находился в глубоководном желобе примерно в 100 км к востоку от о. Уруп), глубина океана составляла 6000-7000 км, фокальная глубина очага равнялась 60 км. Проявления этого цунами были весьма необычными – высоты волн на побережьях, расположенных непосредственно напротив очага (юго-восточное побережье о. Уруп и северо-восточное о. Итуруп), были аномально высокими для землетрясения умеренной силы. Но за пределами этой зоны интенсивность колебаний была сравнительно невелика и вполне соответствовала обычному уровню. На гидрометеостанциях Уруп и м. Васильева (о. Прамушир) по визуальным наблюдениям заметных колебаний не отмечено, по мареографу на о. Матуа максимальная волна имела высоту 37 см, на о. Шумшу – 8 см (рис. 3.9).

Наиболее опасные проявления цунами отмечены в районе м. Ван-дер-Линда (рис. 3.11) и пос. Сентябрьский на севере о. Итуруп. На охотоморской стороне мыса в бухте Катаева во время землетрясения производилась погрузка с берега продуктов на автомашину. В 12 ч. 25 мин. заметили быстрое падение уровня, осушка 200 м. Все люди, находившиеся в это время на берегу, увидели быстрый отлив и побежали выше. В 12 ч. 30 мин. пришла волна цунами высотой 5-6 м, шума при подходе волны не слышали. Постояв у берега, бурля и образуя небольшие водовороты, волна отошла на расстояние около 500 м от уреза воды. Первая волна цунами опрокинула автомашину. В 12 ч.40 мин. подошла вторая волна с высотой гребня 10-12 м. Максимальная высота гребня этой волны 15 м была отмечена на склонах террасы при входе волны в ложбину оврага, где протекает ручей.

Линия максимального заплеска была закреплена на склоне террасы вешками. На гребне волны была видна белая пена, волна шла сплошным фронтом, конца гребня не было видно. Вначале волна ударила о мыс, затем заняла всю бухту, подхватила автомашину, ударила о берег и при отходе отбросила назад на расстояние 20-25 м от уреза воды. Были смыты остатки угля и бочкотары, часть продуктов. Всего наблюдалось четыре крупных волны цунами,

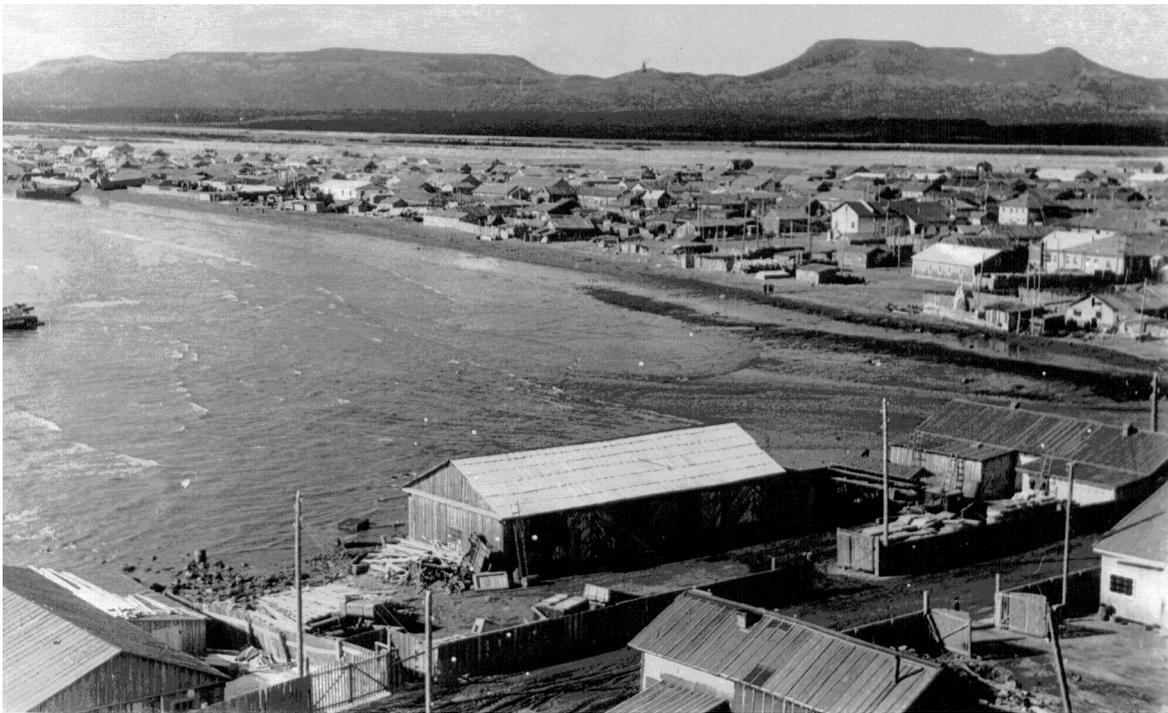


Рис. 3.11. Откат цунами 20 октября 1963 года в пос. Южно-Курильск [Соловьев, 1965].
Фото С.Л. Соловьева.

третья и четвертая имели высоты 4-5 м. Затем в течение всего дня и ночи наблюдались волны с высотой гребня 1-2 м.

В пос. Сентябрьский максимальная волна с высотой 7-8 м была третьей по счету, берег был затоплен на 149 м. Волнами были частично разрушены два строения и снесен мост через

ручей. В портпункте Буревестник, расположенном на сравнительно небольшом расстоянии к югу от данного пункта, высота волны составляла всего около полуметра и не представляла никакой опасности. Примерно такие же колебания наблюдались у берегов островов Кунашир и Шикотан (рис. 3.9, 3.11).

Шикотанское цунами 5 ноября 1994 года

5 (по Гринвичскому времени - 4) октября 1994 г. в районе Южных Курильских о-вов произошло сильное землетрясение с магнитудой $M=8.1$ (координаты эпицентра 43.6° с.ш. и 144.6° в.д., фокальная глубина 44 км), которое вызвало значительные волны цунами на побережье Южных Курил (рис. 3.12); заметные волны зарегистрированы на Сахалине и во многих пунктах на побережье Тихого океана (в Японии, США, Чили и других странах). К счастью, человеческих жертв от цунами не было, благодаря тому, что оно произошло в ночные часы, однако причиненный им материальный ущерб оказался довольно значительным.

Прежде всего, это относится к пос. Южно-Курильск, в южной части которого зона затопления имела ширину 140-150 м, а вдоль реки

Серебряная волны цунами проникли на удаление около 880 м от уреза воды (рис. 3.13). Большинство зданий, попавших в эту зону, получили серьезные повреждения, некоторые были сорваны с фундаментов и перенесены волнами на некоторое удаление от обычного места положения (рис. 3.14) [Королев и др., 1997]. Получили повреждения рыболовецкие и другие суда, которые не успели выйти в открытое море (рис. 3.15).

В бухте Малокурильская на о. Шикотан волны высотой 1,9–3,4 м также оказали воздействие на объекты, находящиеся в прибрежной зоне. В удаленной от горловины низменной части бухты ширина зоны затопления составила около 70 м, а вдоль ручьев волны цунами проникли значительно дальше [Кайстренко и др., 1997].

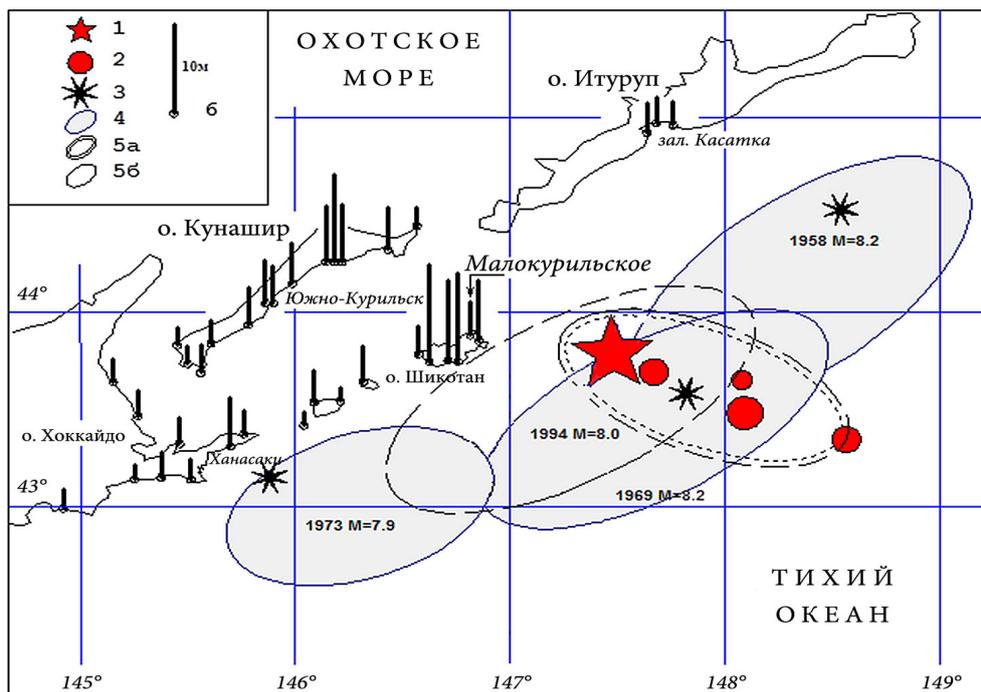


Рис. 3.12. Область очага Шикотанского цунами 5.X.1994 г. и максимальные наблюдаемые высоты цунами на побережье (по результатам полевого обследования): 1-3 - эпицентры: 1 - главного толчка 5.X.1994 г.; 2 - афтершоков с $M=6,8$ в первые 6 час. после главного толчка; 3 - сильнейших исторических землетрясений (указаны год и магнитуда землетрясения); 4-5 - контуры очагов цунами [Шикотанское, 1996].

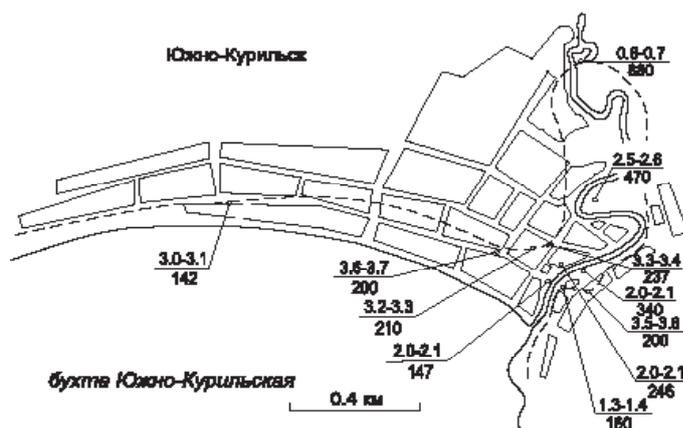


Рис. 3.13. Зона затопления пос. Южно-Курильск цунами 5 октября 1994 г. В числителе указаны величины вертикального, в знаменателе – горизонтального заплеска (в м).

В бухте Крабовая, удаленная часть которой отличается малыми уклонами рельефа, ширина зоны затопления составила 300-500 м. Были затоплены ряд домов на улицах Западная и Торговая пос. Крабовозаводское, из которых за год до этого события жители были отселены.

Максимальные высоты волн на тихоокеанском побережье о. Шикотан, обращенном к источнику цунами, составляли 5-8 м, наиболее

значительный заплеск (около 15 м) был отмечен в бухте Церковная [Кайстренко и др., 1997]. На западном берегу острова, а также на восточном побережье о. Кунашир высоты волн составляли преимущественно 3-4 м. Исключение составляет участок к северу от пос. Южно-Курильск, не прикрытый о. Шикотан, где высоты волн достигали 8 м.



Рис. 3.14. Дом в Южно-Курильске, сорванный с фундамента и унесенный волной цунами на расстояние около 500 м.



Рис. 3.15. Грузо-пассажирское судно, выброшенное на мель. Бухта Южно-Курильская.

Симуширское цунами 15 ноября 2006 года

15 ноября 2006 г. в центральном сегменте Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны произошло сильнейшее землетрясение с магнитудой $M=8.1$. Очаг землетрясения располагался в океане напротив островов Симушир – Матуа, его эпицентр находился примерно в 85 км от северной оконечности о. Симушир (координаты 46.0° с.ш. и 152.9° в.д., фокальная глубина 35 км). Землетрясение такой силы было зафиксировано в данном районе впервые за всю историю сейсмических наблюдений и было началом серии землетрясений, заполнивших так называемую «сейсмическую брешь», на существовании которой было основано предсказание сильного цунами в данном районе [Лаверов и др., 2006]. Образованию гигантских волн, обрушившихся, по счастью, на совершенно безлюдные острова в центральной части Курильской гряды, способствовала сравнительно малая фокальная глубина очага землетрясения, составлявшая 25-27 км.

На Курильских островах была получена всего одна инструментальная запись этого цунами на мареографе в бухте Малокурильская – максимальный размах колебаний (от подошвы до гребня) составил около 1,5 м, причем эта волна пришла примерно через 4 часа после вступления первой волны. В населенных пунктах Южных и Северных Курил цунами не представляло серьезной угрозы и практически не причинило материального ущерба (он был весьма существенным на побережье США, осо-



Рис. 3.16. Высоты максимальных заплесков цунами 15 ноября 2006 года на островах центральной части Курильской гряды [MacInnes et al., 2007].

бенно пострадал порт Кресент-Сити). Первоначально считалось, что данное событие на тихоокеанском побережье России было умеренной интенсивности.

Эта представление изменилось только после двух международных экспедиций, проведенных в период с 1 июля по 14 августа 2007 г. на островах Уруп, Симушир, Кетой, Янкича и Рыпонкича (о-ва группы Ушишир), Расшуа, Матуа. В ходе обследования подвергшихся воздействию цунами участков побережья удалось измерить высоту и дальность заплесков цунами, собрать данные по геологическим эффек-

там землетрясения и цунами на указанных побережьях (рис. 3.16).

Наиболее высокие заплески цунами были выявлены на о. Матуа, где их средняя высота превышала 10 м. В бухте Аину (юго-запад о. Матуа) цунами сильно изменило морфологию берега, размыв участок морской аккумулятивной террасы шириной 20-30 м (рис. 3.17). В бухте Душной (северо-восточная часть о. Симушир)

цунами оставило на морской террасе многочисленные промоины в дюнах высотой более 10 м (рис. 3.18). Помимо эрозии, на обследованных побережьях повсеместно наблюдалась и аккумуляция. Отложения цунами представлены морским песком, галькой, валунами, перемещенным в сторону суши плавником. На крутых склонах берегов во время цунами была частично уничтожена растительность и смыта почва.



Рис. 3.17. Эрозия прибрежных участков на юго-западном побережье о. Матуа. Фотографии до (2006) и после цунами (2007).



Рис. 3.18. Промоина на морской террасе, образовавшаяся в результате воздействия цунами. Бухта Душная, о. Симушир.

Тохоку цунами 11 марта 2011 года

11 марта 2011 года в 5:46 по Гринвичу у северо-восточного побережья о. Хонсю (примерно в 130 км к востоку от города Сендай) произошло сильнейшее в истории Японии землетрясение с магнитудой $M=9.0$. Эпицентр находился в точке с координатами 38.32° с.ш. и 142.37° в.д., фокальная глубина составляла 32 км. Вызванные им волны цунами с высотами 15-20 м (максимальный заплеск достиг 41 м) разрушили ряд населенных пунктов на северо-восточном побережье острова, привели к гибели около 25 тысяч человек и явились причиной крупной техногенной катастрофы на АЭС «Фукусима».

Цунами было трансокеанским - опасные волны были зафиксированы на побережье Северной и Южной Америки, многочислен-

ных островах в Тихом океане и т.д. Оно также значительно проявилось и на тихоокеанском побережье России. Прежде всего, на островах Курильской гряды, где для жителей населенных пунктов была объявлена тревога цунами. Наиболее опасные проявления цунами были весьма необычными и связаны, главным образом, со взломом ледяного покрова в бухтах и устьях рек и выбросом тяжелого льда на берег [Кайстренко и др., 2011]. Пример такого выброса льда на территорию рыбокомбината «Островной» на побережье бухты Малокурильской приведен на рис. 3.19. Взломанный лед выбрасывало на улицы с. Крабовозводское (рис. 3.20), им был поврежден мост через реку Серебрянка в Южно-Курильске. Высоты цунами достигали 3,5 м в бухте Крабовая, 2,5 м в



Рис. 3.19. Тяжелый лед, заброшенный цунами на территорию автогаража ЗАО рыбокомбинат «Островной» (с. Малокурильское, о. Шикотан). Фото Д. Васильева.

поселках Южно-Курильск, Малокурильское и Северо-Курильск, 2 м в порту Буревестник, хозяйству которых был нанесен незначительный материальный ущерб.

Цунами проникло в Охотское море – волны значимой высоты, хотя и не представлявшие серьезной угрозы, зафиксированы в портах Корсаков, Стародубское, Поронайск и Магадан. Со льда на юго-восточном побережье о.Сахалин было эвакуировано несколько тысяч рыбаков – любителей подледного лова. Через Сангарский пролив волны цунами проникли в Японское море и вызвали интенсивные колебания уровня моря в крупнейших портах Приморья – Владивосток и Находка, более слабые – в портах юго-западного Сахалина Невельск и Холмск.

Приведенные примеры показывают, что в различных районах Курильской островной гряды происходили сильные цунамигенные землетрясения. Вызванные ими волны при-

вели к человеческим жертвам и нанесли серьезный материальный ущерб прибрежным населенным пунктам. Исключение составило Симуширское цунами 15 ноября 2006 года, максимальное проявление которого пришлось на острова, на которых в настоящее время постоянное население отсутствует. Случай Чилийского цунами 24 мая 1960 года продемонстрировал, что и удаленные землетрясения большой силы также могут представлять серьезную опасность для тихоокеанского побережья России. Высокая степень опасности цунами является в определенной мере сдерживающим фактором развития экономики на островах – например, после землетрясения и цунами 5 октября 1994 года остров Шикотан покинуло более 2/3 жителей. Для преодоления негативного влияния этого фактора предпринимаются усилия по изучению особенностей проявления цунами на побережье Курильской гряды и разработке мер по защите населения.



Рис. 3.20. Выброс льда в районе здания ресторана на ул. Торговая в центральной части поселка Крабозаводское. Фото О.Волкова.

Служба предупреждения о цунами

Как упоминалось выше, по повторяемости сильных цунамигенных землетрясений материковый склон у Южных Курильских островов относится к числу самых цунамиактивных районов в мире. По этой причине изучению цунами и мерам по снижению ущерба от них уделяется большое внимание. Среди этих мер наиболее важной является создание и развитие Службы предупреждения населения о волнах цунами (СПЦ).

Служба была создана после разрушительного цунами 1952 - Советом министров СССР в 1956 году принимается постановление об организации своевременного оповещения населения Дальнего Востока о цунами. Создание СПЦ в основном завершилось к 1958-1959 годам. Возможность возникновения цунами в результате землетрясения оценивается по магнитудно-географическому критерию. Землетрясение считается цунамиопасным, если его эпицентр попадает в цунамигенную зону, а интенсивность превышает заданное пороговое значение магнитуды. Этот принцип, сформулированный академиком С.Л. Соловьевым около 50 лет назад, и сейчас играет ключевую роль в деятельности СПЦ. Для землетрясений в Курило-Камчатской цунамигенной зоне M пороговая равно 7.0. В случае превышения этого значения при происшедшем в данной области землетрясении сообщение об угрозе цунами немедленно передается по схеме оповещения населению, предприятиям и организациям, расположенным в прибрежной зоне, а также судам в море, у причалов и на рейде.

Впервые тревога цунами на Южных Курильских островах была объявлена при рассмотренном выше сильном ($M=8.2$) землетрясении 7 ноября 1958 года, очаг которого находился на материковом склоне в 170 - 200 км к востоку от о. Итуруп. Специалисты сахалинской СПЦ еще не имели опыта определения угрозы возникновения цунами, к тому же на Курильских островах в то время не работала ни одна сейсмостанция. Хорошо оборудованная станция японской постройки в Курильске была закрыта на ремонт и уточнение характеристик прибо-

ров, «...несмотря на то, что цунами-аппаратура находилась в полной исправности и безотказно работала» (из отчета комиссии по расследованию). В праздничный день 7 ноября, в момент землетрясения, ввиду отсутствия дежурного, лента своевременно не была снята и обработана. В связи с этим никакие меры оповещения не были приняты. Комиссия также констатировала, что Управление гидрометеослужбы неудовлетворительно организовало наблюдения за возникновением и распространением цунами - ни на одной береговой гидрометеостанции не была точно зафиксирована высота цунами и время прихода. Запись на ленте мареографа имела только в одном пункте – Южно-Курильске.

Южно-Сахалинская сейсмическая станция своевременно зафиксировала и обработала записи, свидетельствующие о сильном землетрясении на Южных Курилах (привлекались также данные сейсмостанций в Углегорске, Магадане и Петропавловске-Камчатском), способном вызвать цунами. Но дежурные не сумели быстро передать сигнал на телеграф и в бюро погоды Сахалинского управления гидрометеослужбы из-за неисправности телефона АТС и отсутствия аппаратов для прямой линии, соединяющей телеграф и сейсмическую станцию.

Важную роль сыграла телеграмма Японского метеорологического агентства, сообщившая об угрозе цунами для тихоокеанского побережья Японии. На эту телеграмму оперативно отреагировали дежурные специалисты управления гидрометеослужбы, и тревога была объявлена для Южно-Курильского района за 15-18 минут до подхода цунами. Основная часть населения и больные из больницы были организованно эвакуированы в безопасные места, установлена охрана квартир, складов и учреждений. Цунами нанесло существенный материальный ущерб (см. раздел 3), но не привело к человеческим жертвам.

Существующая в настоящее время Служба предупреждения о цунами обеспечивается Росгидрометом совместно с Геофизической службой РАН, МЧС России, Министерством связи и массовых коммуникаций, администрациями

Источники цунамигенных землетрясений

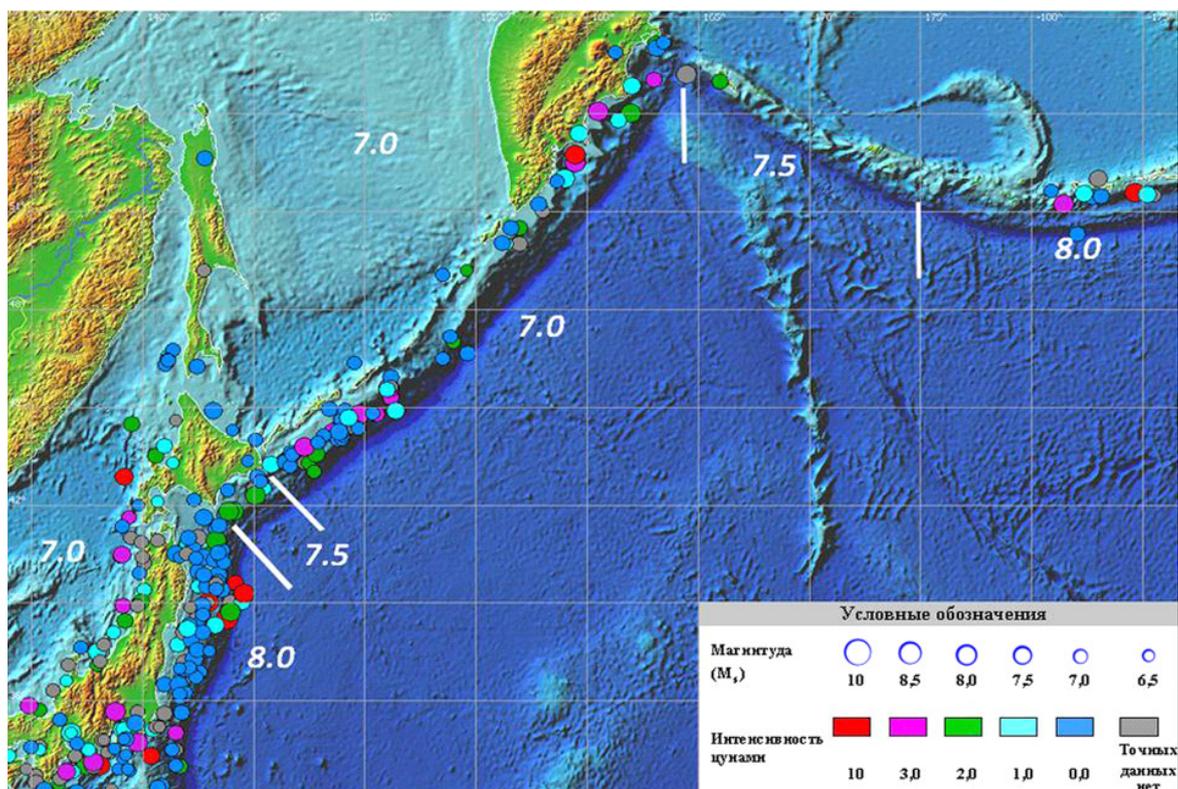


Рис. 4.1. Пространственное распределение пороговых магнитуд магнитудно-географического критерия цунамигенности по сейсмоактивным зонам северо-западной части Тихого океана. Кружками отмечены очаги цунамигенных землетрясений, их размер отвечает магнитуде, цветом указана интенсивность цунами (в м).

субъектов Дальневосточного региона Российской Федерации. Как отмечал еще более 40 лет назад академик С.Л. Соловьев, сложность междоуведомственных отношений можно отнести к одной из основных проблем СПЦ.

Недостаточная точность определения опасности цунами на основе сейсмологической информации является причиной значительного числа ложных тревог, что существенно осложняет деятельность СПЦ и приводит к экономическому ущербу при отсутствии цунами. Так, за период с 1958 по 1994 год тревога цунами объявлялась 51 раз, из которых оправданным прогноз был только в 19 случаях, что составляет 37% [Поплавский и др., 1997]. За весь период существования службы по 2010 год включительно тревога объявлялась 79 раз, из них ложных было 57, таким образом, оправдываемость снизилась до 28%. Примерно на таком же уровне находились показатели эффективности прогноза, основанного на сейсмологических данных,

и в большинстве зарубежных СПЦ. Определенную роль в снижении числа ложных тревог сыграли попытки детализации магнитудно-географического критерия [Золотухин, Ивельская, 2010]. Серия вычислительных экспериментов с различным положением источников цунами и магнитудами в диапазоне от 7 до 8 показала, что для района, прилегающего к центральной части Курильской гряды можно повысить магнитудный порог с единого значения 7 до 7.5. Введение этого правила позволило избежать большого числа ложных тревог при серии землетрясений, последовавших за мощным событием 15 ноября 2006 года. Только одно из этих землетрясений, с магнитудой $M=8.3$, имевшее место 13.01.2007, вызвало заметное цунами.

Однако основной прогресс, как в международной, так и в отечественной службе цунами связан с развитием сети телеметрических регистраторов цунами, прежде всего глубоководных буйковых станций DART, хотя в отечественной

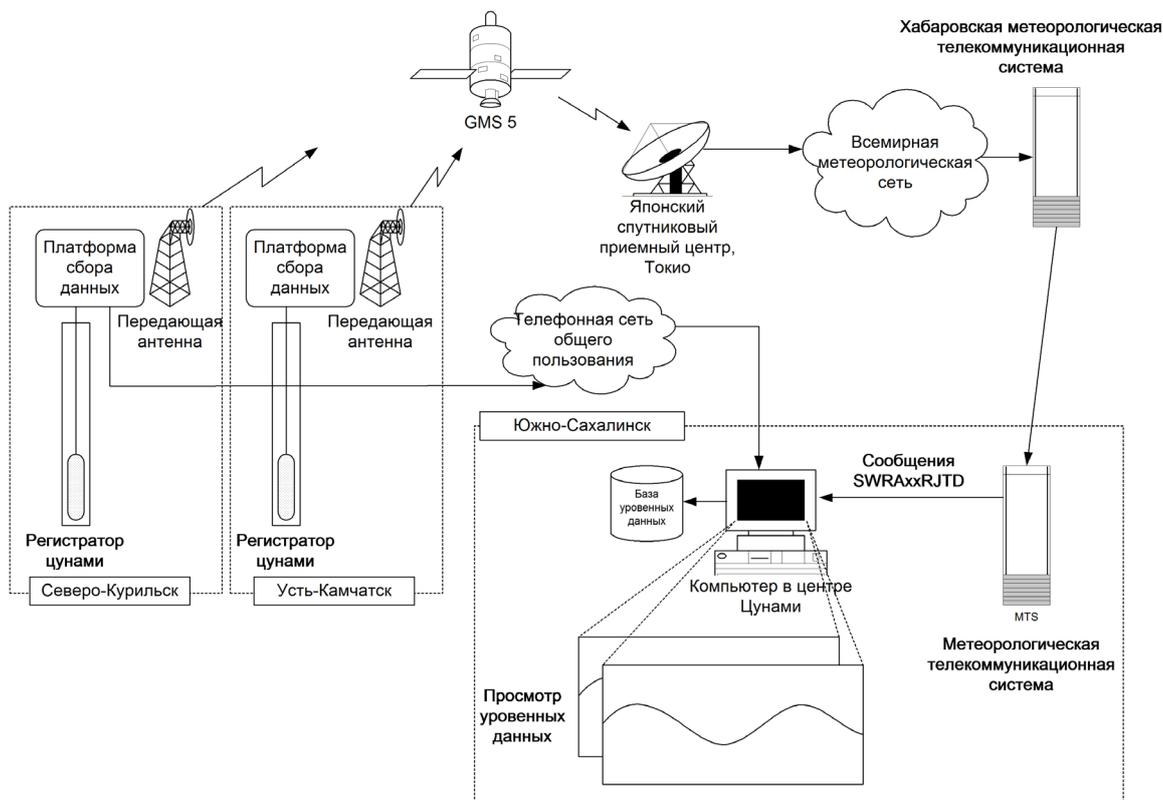


Рис. 4.2. Схема передачи данных о колебаниях уровня океана на компьютер дежурного оператора в Южно-Сахалинске.

СПЦ преобладают автоматические посты (АП), установленные на береговых гидрометеостанциях. Измеряется придонное гидростатическое давление, которое пересчитывается в высоту уровня моря. Полученные данные передаются в Центр цунами по каналам спутниковой связи (рис. 4.2), и дежурный оператор на мониторе своего компьютера может наблюдать за развитием волнового процесса в защищаемом регионе (рис. 4.3). Информация о параметрах цунами в открытом океане во многих случаях позволяет заблаговременно определить ожидаемые высоты волн на защищаемых участках побережья, оценить степень угрозы и более обосновано принимать решение о подаче (или не подаче) тревожного сообщения. При удаленном источнике обычно имеется достаточный запас времени, чтобы использовать данные глубоководных уровневных станций в численных расчетах распространения цунами, что позволяет получить еще более точные оценки ожидаемых высот волн на берегу.

Наличие цифровых записей цунами в открытом океане, не искаженных влиянием мелководных эффектов, помимо задач раннего об-

наружения цунами в целях предупреждения, послужило мощным толчком для развития представлений о физике данного опасного природного явления.

До недавнего времени службу цунами на территории Сахалинской области несли всего 2 сейсмические станции - «Южно-Сахалинск» и «Северо-Курильск», входящие в систему наблюдений ГС РАН и оснащенные устаревшим специальным аналоговым оборудованием. Основной недостаток – решение об опасности возникновения цунами от возникшего землетрясения принималось каждой сейсмической станцией автономно, обработка данных по сети станций не проводилась. А регистрация уровня моря и передача данных в Центр цунами осуществлялась одной станцией в Северо-Курильске.

В 2006 году для обеспечения своевременного, надежного и достоверного предупреждения населения, хозяйственных объектов об угрозе цунами Постановлением Правительства РФ была утверждена Федеральная целевая программа (ФЦП) «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природ-

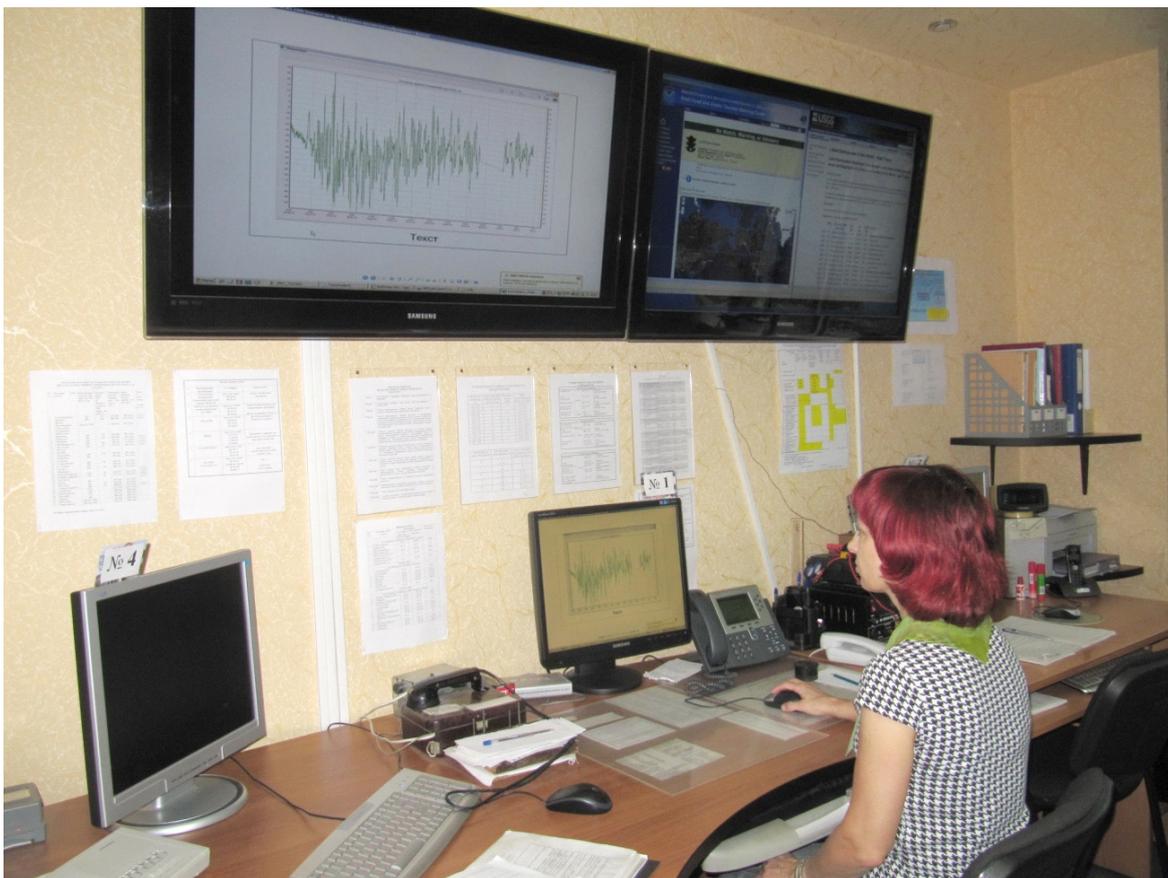


Рис. 4.3. Просмотр записи цунами на мониторе дежурного оператора Центра цунами Сахалинского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

ного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010». В результате выполнения в 2006-2010 гг мероприятий федеральной программы организована опорная широкополосная цифровая сейсмическая станция (ОШЦСС) службы предупреждения о цунами (СПЦ) «Южно-Сахалинск», которая состоит из центральной станции (ЦС) и 4 выносных пунктов на удалении от 30 до 70 км от ЦС. Установлены цифровые станции в Северо-Курильске, Курильске, Южно-Курильске и Малокурильском.

Введены в постоянную эксплуатацию центр сбора и обработки данных в г. Южно-Сахалинск (Центр цунами) и система инструментальных наблюдений за уровнем моря в составе автоматизированных постов (телеметрических регистраторов) «Корсаков», «Северо-Курильск», «Холмск», «Стародубское», «Поронайск», «Крильон». «Малокурильское», «Курильск» «Южно-Курильск» и «Невельск». В Приморском крае: АП «Находка», «Владивосток», «Рудная Пристань», «Сосуново». В

Камчатском крае: «Водопадная», «Никольское», «Петропавловск-Камчатский», «Оссора» и «Семьячки». Расположение береговых постов на побережье Дальневосточного региона приведено на рис. 4.4.

Развитие сети телеметрических регистраторов на дальневосточном побережье России является крупным шагом в развитии системы предупреждения о волнах цунами, способствующим снижению риска и смягчению последствий этого катастрофического природного явления. Оперативная информация о развитии волнового процесса в защищаемом регионе позволяет более обосновано подавать как сигнал о тревоге цунами, так и об ее отбое.

В феврале 2010 и марте 2011 года развернутая гидрофизическая подсистема СПЦ прошла серьезную проверку. Вначале произошло сильнейшее землетрясение у берегов Чили. Впервые в истории Российской Службы предупреждения о цунами в ходе проведения тревоги цунами в режиме реального времени поступали данные о

характере колебаний уровня моря в различных пунктах Дальневосточного региона, что позволило принимать четкие и взвешенные решения на основе объективной информации. Это прибрежные станции, и хотя записи цунами на них невозможно эффективно использовать для прогноза цунами, они важны для определения времени подачи сигнала об отбое тревоги цунами. Тем не менее, возможность следить за развитием ситуации в защищаемом регионе оказала большую помощь сахалинской СПЦ, когда волны цунами, зародившиеся у берегов Чили, достигли Курильских островов. Была объявлена тревога цунами, находящимся в портах судам была дана команда выйти в открытое море, а населению – подняться на возвышенность. Эти меры были оправданы: как на Северных, так и на Южных Курилах высоты волн были около 2 метров. Цунами такой интенсивности не представляет угрозы для объектов береговой инфраструктуры, но может быть опасно для оставшихся вблизи берега судов и находящихся в прибрежной зоне людей.

В ноябре 2010 года на материковом склоне Южных Курил, юго-восточнее острова Итуруп, была установлена первая в истории отечествен-

ной СПЦ глубоководная станция DART 21401 (см. рис. 4.4.), которая сыграла большую роль в оценке степени опасности Тихоку цунами 11.03.2011 г. Высота волны в открытом океане составляла 67 см, что указывало на высокую степень опасности для Южных Курильских островов. Это подтвердило обоснованность подачи сигнала «тревога цунами», выработанного на основе магнитудно-географического критерия по сейсмологическим данным. Причем параметры цунами удалось определить примерно за 20 минут до прихода волны в Малокурильскую бухту – первый порт на пути ее распространения у тихоокеанских берегов России.

Цунами представляло реальную опасность для рыбаков – любителей подледного лова. Так, в бухте Крабовая большое их число вынуждено было убежать на берег, когда под действием цунами начался взлом ледяного покрова в устье реки Анама. Мощные льдины были выброшены на территории портов, рыбокомбинатов и даже на улицы в Малокурильском, Крабовозаводском и Южно-Курильске [Кайстренко и др., 2011]. В Северо-Курильске пострадали несколько рыболовецких судов, команды которых не смогли запустить моторы и вывести их в открытое море.

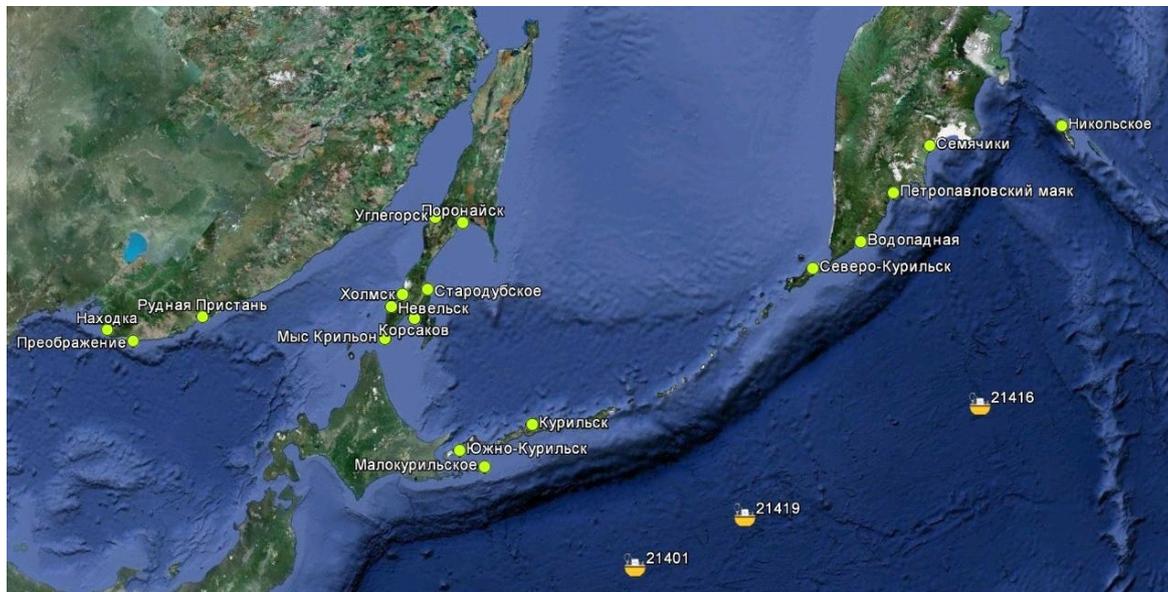


Рис. 4.4. Расположение береговых телеметрических комплексов на тихоокеанском побережье России и глубоководных станций DART в прилегающей части Тихого океана.

Характеристики цунами по данным инструментальных измерений

Регистрация цунами береговыми самописцами уровня моря

Инструментальные измерения колебаний уровня моря дают наиболее надежную информацию о характеристиках цунами – моментах прихода и высотах первой и максимальной волн, преобладающих периодах и длительности колебаний. Тщательный анализ записей цунами позволяет с одной стороны изучать особенности генерации волн в зоне подводного землетрясения, а с другой – влияние донного рельефа и топографии береговой черты в районе измерений, которое во многих случаях приводит к резкому резонансному усилению волн на определенных резонансных частотах.

До недавнего времени основным источником таких данных были записи береговых самописцев уровня моря – пример такой записи представлен на рис. 5.1. Центр цунами СахУГМС совместно с ИМГиГ ДВО РАН предприняли усилия по созданию цифрового архива записей цунами на Дальневосточном побере-

жье России, для создания которого было оцифровано около 300 лент. Оцифрованные записи обрабатывались по единой схеме – сначала приводились к дискретности 1 минута, а затем из них вычитался предвычисленный прилив.

Один из самых интересных результатов, полученных при анализе этих материалов, связан с особенностями проявления Чилийского цунами 24 мая 1960 года [Ивельская, Шевченко, 2006]. Полученные описанным выше образом ряды непериодических колебаний уровня при Чилийском цунами на станциях Южно-Курильск и Корсаков представлены на рис. 5.2.

Размах колебаний в Южно-Курильске составлял около 2 метров, в начальный период, когда наблюдались волны наибольшей высоты, преобладала низкочастотная составляющая. Можно предположить, что положение станции внутри Южно-Курильского пролива из-за ослабляющего влияния Малой Курильской гряды привело к заметному уменьшению интенсивности цунами по сравнению с тихоокеанским побережьем. Об этом свидетельствует и тот факт, что на станции Ханасаки, расположенной на сравнительно небольшом удалении на открытом побережье о.Хоккайдо, размах колебаний превысил 3 м. При этом общая структура записи имеет много общего с таковой на российской станции.

На самой северной станции о. Хонсю – Хачинохе, наблюдались наибольшие высоты волн – размах колебаний здесь достигал 5 метров. Так же, как и в двух рассмотренных выше случаях, в начальный момент (когда интенсивность цунами была максимальной) преобладали низкочастотные колебания. Однако на сравнительно небольшом удалении к югу, на станции Мияко, интенсивность цунами резко уменьшается – здесь размах колебаний даже меньше, чем на

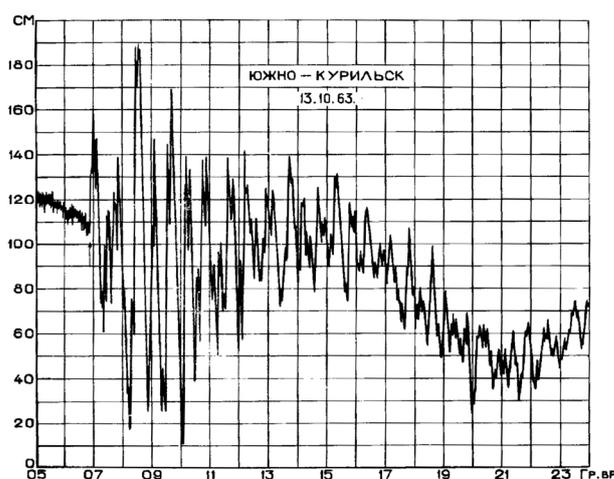


Рис. 5.1. Копия ленты берегового самописца уровня моря в Южно-Курильске, содержащая запись цунами 13 октября 1963 года.

закрытой Малой Курильской грядой станции Южно-Курильск. При этом и частотная структура сигнала значительно отличается от рассмотренных выше случаев – здесь отсутствуют низкочастотные вариации в начальном отрезке записи.

Такой характер распределения периодов и высот волн вдоль побережья Японии обусловлен влиянием прибрежного рельефа, а именно шельфового резонанса. Ранее И.В. Файном [1984] (см. также монографию [Ефимов и др., 1985]) на основе численных расчетов было показано, что в северной и южной части Курильской гряды, где шельф достаточно мелководный и протяженный, данный эффект ярко выражен, причем наибольшие значения коэффициента усиления амплитуды волны (в 5 - 6 раз) приходятся на периоды 80-90 мин. В центральной части гряды, где шельф короткий и приглубый, шельфовый резонанс выражен слабо, наблюдается провал частотной характеристики. Отметим, что в приведенном выше описании Чилийского цунами на Северных и Южных Курилах подчеркивались необычно медленные, плавные изменения уровня.

Аналогичная ситуация была выявлена и на побережье Японии. На участках с протяженным мелководным шельфом (Ханасаки, Хачинохе, Накаминато) отмечены мощные волны с периодами 80 – 90 мин, вызвавшие значительные разрушения в прибрежных населенных пунктах [Hatori, Takahashi, 1961], а в районе его сужения (Мияко, Камаиси) – ослабление частотной характеристики, низкочастотные колебания не зафиксированы, и материальный ущерб был незначительным.

Важное замечание состоит в том, что теоретически предсказанное усиление низкочастотной компоненты цунами на шельфе Северных и Южных Курил не было подтверждено ранее на практике. Очевидно, это связано с тем обстоятельством, что для проявления шельфового резонанса необходимо присутствие в спектре исходного сигнала соответствующей составляющей. В открытом океане периоду 80 мин отвечает длина волны около 1000 км. Для возбуждения волн цунами с такими пространственными масштабами необходим источник с близкими линейными размерами, что может наблюдаться лишь при самых сильных землетрясениях, к которым и относится анализируемое событие.

Низкочастотный характер Чилийского цунами способствовал тому, что волны проникли через проливы Курильской гряды с меньшим,

чем при большинстве близких землетрясений, ослаблением, и имели большие высоты – характерный пример приведен на записи колебаний в порту Корсакова (рис. 5.2)

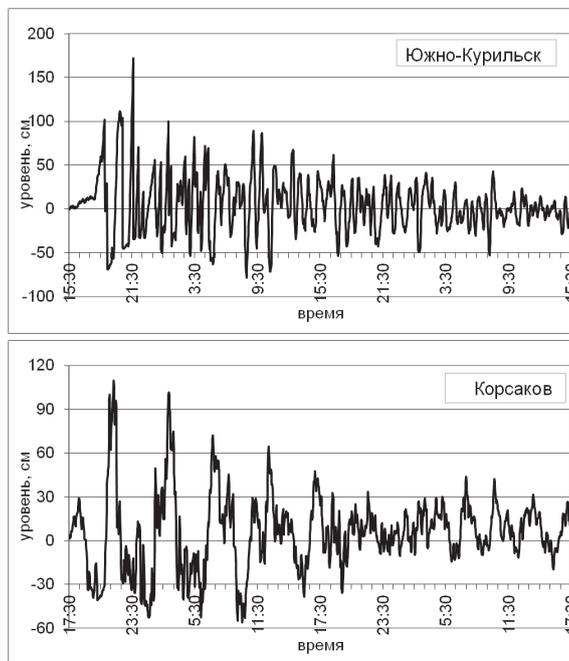


Рис. 5.2. Оцифрованные двухсуточные отрезки записи Чилийского цунами 23-24 мая 1960 в портах Южно-Курильска и Корсакова.

В последние годы основным материалом для изучения особенностей проявления цунами стали записи цифровых измерителей колебаний уровня моря. ИМГиГ ДВО РАН в конце 1960-х – начале 1970-х гг. был пионером в разработке специальной аппаратуры для дистанционного измерения длинных волн в диапазоне периодов цунами – регистраторов придонного гидростатического давления. Инициатором этих работ был академик С.Л. Соловьев, главным организатором экспериментальных исследований - В.М. Жак (фото на рис. 5.3). В сентябре 1969 года были проведены одни из первых в нашей стране инструментальные измерения длинных волн в диапазоне периодов цунами [Жак, Соловьев, 1971]. В феврале 1981 года на шельфе о.Шикотан была осуществлена первая в мире регистрация цунами датчиком, установленным на глубине около 100 м, показано заметное увеличение высот волн на берегу по сравнению с глубоководной станцией [Дыхан и др., 1981]. Длительное время исследовательская регистрация велась нерегулярно, но после цунами 15 ноября 2006 года (на Курилах

была получена только одна запись на бумажной ленте в бухте Малокурильская) институт возобновил мониторинг цунами на Южных Курильских островах. В настоящее время автономные и кабельные регистраторы ИМГиГ ДВО РАН установлены для исследовательских целей, эти датчики в оперативном прогнозе не участвуют. Полученные на них записи можно использовать только для апостериорного изучения особенностей проявления цунами – определения моментов прихода и высот первой и максимальной волн, основных периодов колебаний и т.д. Но в данный момент эти станции дополняют сеть регистраторов СПЦ, что позволяет изучать особенности проявления цунами на различных участках побережья Курильской гряды.

2009 - 2011 годы оказались богатыми на опасные события. Были получены записи цунами от одного близкого (Симушир, 15 января 2009 г.) и нескольких удаленных землетрясений – Индонезийское 3 января; Самоа 29 сентября и Вануату 7 октября 2009 г., Чилийское 27 февраля 2010 г., а также менее далекого Тохоку цунами 11 марта 2011 г.

Рассмотрим подробно характеристики двух наиболее сильных цунами, измеренных в северной (датчики СПЦ) и южной (автономные станции ИМГиГ ДВО РАН) частях Курильской островной гряды.



Рис. 5.3. С.Л. Соловьев (в центре) и В.М. Жак (справа) обсуждают планы постановок гидрофизических станций на шельфе о. Шикотан.

Чилийское цунами 27 февраля 2010 года

Первое из цунами, зарегистрированное сразу несколькими телеметрическими регистраторами СПЦ, было реально опасным. Землетрясение с моментной магнитудой $M_w=8.8$ (USGS) произошло в 06:34 UTC 27 февраля у берегов Чили. Эпицентр землетрясения находился в точке с координатами 35.846° ю.ш. и 72.719° з.д., глубина очага составила около 35 км. Это землетрясение вызвало волны цунами значительной высоты, которые представляли серьезную угрозу для большей части побережья Тихого океана, включая дальневосточное побережье России. В этой связи вспоминается сильнейшее землетрясение 22 мая 1960 года, произошедшее полвека назад у побережья Чили, которое вызвало волны цунами высотой до 6-7 метров на берегах Курильских островов и Камчатки.

Время распространения цунами от источ-

ника до дальневосточных берегов России составило около 21 часа, волны цунами вначале достигли Командорских островов, затем Камчатки и Северных Курил, существенно позже – Южных Курильских островов. Первое вступление цунами было отмечено на станции Никольское (о.Беринга) 28 февраля в 3:15 UTC. Однако необычный для станций открытого побережья характер и малые амплитуды колебаний (максимальная высота волны 24 см) в данном пункте заставили отнестись к использованию этих материалов с осторожностью.

Гораздо более информативной для решения вопросов оперативного прогноза оказалась станция Водопадная на юго-восточном побережье Камчатки. Первая волна (положительный импульс высотой 34 см) зафиксирован здесь в 3:40, на 25 минут позже, чем в Никольском. Первая из волн с достаточно большой высотой

(89 см) достигла этой станции спустя 1 час 25 мин, в 5:05. Максимальная волна была зафиксирована еще на 55 мин позже, ее высота составила 118 см.

Еще одна станция, наблюдения на которой сыграли важную роль в работе СПЦ – Северо-Курильск. Регистратор длинных волн расположен в порту, который находится на берегу Второго Курильского пролива и удален от океанского побережья. Поэтому первая волна (также как и в Никольском, слабый положительный импульс) здесь отмечена в 04:28 UTC, на 48 минут позже, чем на станции Водопадная. После нескольких сравнительно слабых колебаний, в 8:20 UTC, то есть почти через четыре часа после вступления цунами, была зафиксирована волна с максимальной высотой 228 см (рис. 5.4). Это очень значительное запаздывание, по существовавшим нормативам СПЦ за это время должна была выдать отбой тревоги цунами.

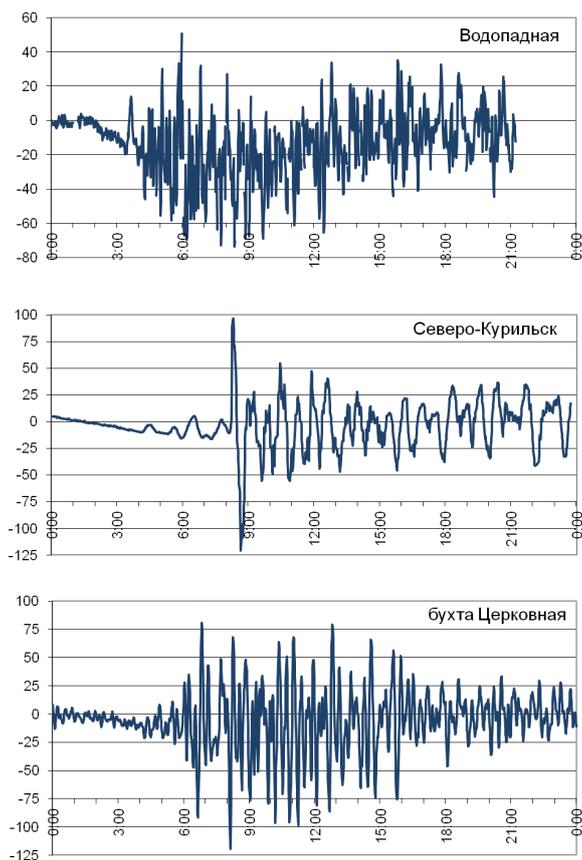


Рис. 5.4. Отрезки записи колебаний уровня моря (вычетен прилив) за 28 февраля 2010 года на станциях СПЦ Водопадная, Северо-Курильск и датчике ИМГиГ в бухте Церковная.

Аналогичная ситуация возникла при регистрации Симуширского цунами 15 ноября 2006 года в бухте Малокурильская (опасная волна высотой 1,5 м была зафиксирована примерно через 3,5 часа после вступления). Наличие телеметрических регистраторов и возможность оперативного контроля развития волнового процесса в подвергающихся опасности районах в определенной мере снимает остроту данной проблемы.

Тем не менее, причина формирования запаздывающих опасных волн чрезвычайно важна и интересна. С целью изучения данной проблемы были привлечены записи Чилийского цунами на двух глубоководных станциях DART (21419 и 21416), расположенных в районе Средних и Северных Курил (рис. 5.5). Различие в характере колебаний на этих станциях оказалось весьма значимым: на DART 21416 характер волнового процесса весьма близок к наблюдаемому в Северо-Курильске – сравнительно слабые колебания после первой волны, затем волна с высотой гораздо большей, чем на второй станции. Правда временной сдвиг между первой и максимальной волнами составлял на 4, а 2 часа. Результаты численного моделирования (рис. 5.6) показали, что слабые волны подошли к Северо-Курильску, распространяясь по глубоководным Алеутскому и Камчатскому желобам, и обогнали волны, двигавшиеся через центральную часть океана и прошедшие над глубоководным регистратором. Формирование запаздывания опасной волны начинается в открытом океане под влиянием неоднородностей донного рельефа (интерференция на группе небольших островов в экваториальной части и фокусировка за счет влияния подводного Императорского хребта).

На южном фланге Курильской гряды телеметрические регистраторы еще не установлены, в настоящее время инструментальные данные о характере проявления цунами в данном районе можно получить только при помощи автономных станций ИМГиГ ДВО РАН после их подъема. Соответственно, в оперативных целях эти материалы не использовались.

В бухте Церковная момент прихода цунами также не сложно определить – в 4:53, практически в то же самое время, зафиксирована волна с высотой 22 см (от подошвы до гребня). Интенсивные колебания с высотами волн более 1 м наблюдались до 16 часов, а на обычный уровень они не вышли до конца суток. Первое значительное колебание с высотой 165 см от-

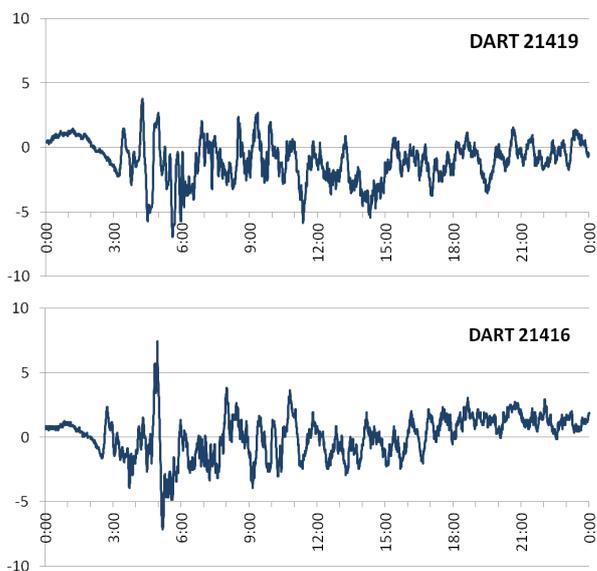


Рис. 5.5. Отрезки записи колебаний уровня моря (вычтен прилив) за 28 февраля 2010 года на глубоководных станциях DART, установленных вблизи Средних (21419) и Северных (21416) Курил.

мечено почти на два часа позже, в 6:50, а наибольшая волна с высотой 184 см – в 8:16. И если первая хорошо согласуется с результатами наблюдений на океанском побережье Хоккайдо [Ивельская и др., 2010], то вторая наблюдалась на Шикотане примерно на час раньше.

В Малокурильской бухте из-за постоянного присутствия колебаний основной моды с периодом около 19 мин вступление цунами идентифицировать всегда весьма сложно. Амплитуды волн в данном бассейне увеличивались сравнительно быстро, и в 6:38 было зафиксировано колебание с размахом около 80 см. Максимальная волна имела высоту 91 см и наблюдалась почти на два часа позже, в 8:29.

Чилийское цунами проявилось в широком диапазоне периодов – от 3 минут до 3 часов. Наиболее значимое повышение энергии колебаний отмечено в низкочастотной области спектра, на периодах от получаса до полутора часов, что характерно для удаленных цунами при землетрясениях значительной интенсивности (и большими размерами очага).

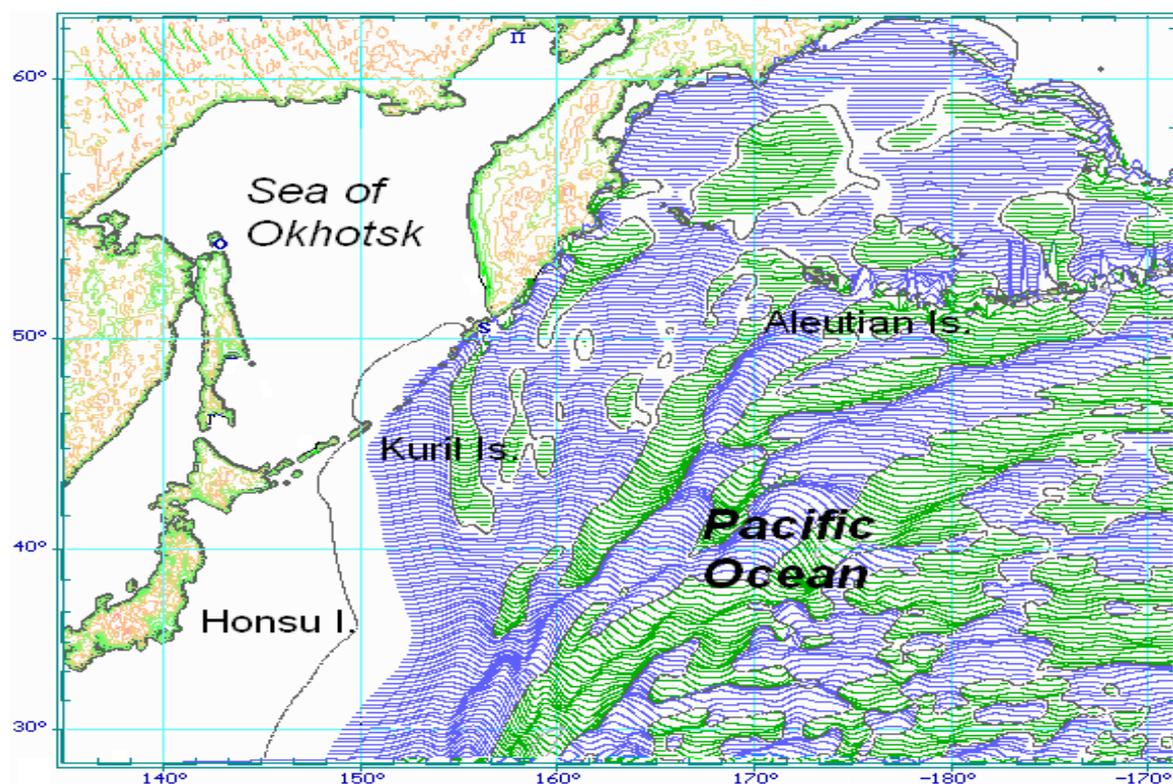


Рис. 5.6. Численное моделирование подхода волн цунами к тихоокеанскому побережью России при Чилийском землетрясении 27 февраля 2010 года.

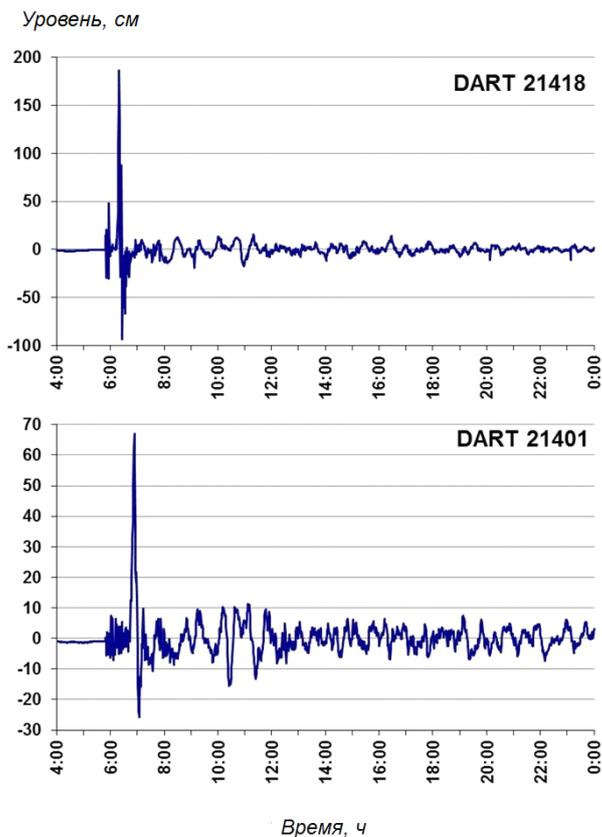


Рис. 5.8. 20-часовые отрезки записи Тохоку цунами на глубоководных станциях DART, установленных вблизи Японии (21418), Южных (21401) и Средних (21419) Курил 11 марта 2011 года.

Цунами было зарегистрировано глубоководными датчиками DART, два из которых находятся вблизи Курильской гряды, а также многочисленными телеметрическими регистраторами, установленными на береговых гидрометеорологических станциях Дальневосточного региона России. Эти данные позволили определить характеристики цунами – моменты прихода и высоты волн, преобладающие периоды и продолжительность колебаний на различных участках побережья, оценить влияние параметров источника и локальной топографии в формировании волнового поля. Рассмотрим записи цунами, полученные на глубоководных станциях, которые расположены в северо-западной части Тихого океана, вблизи острова Хонсю и Курильской гряды. Рассматривались отрезки продолжительностью 20 часов (с 4:00 до 24:00 11 марта), причем из измеренных значений уровня вычитался предвычисленный прилив. На всех датчиках был отмечен сходный характер колебаний (5.8) – вначале мощ-

ная одиночная волна, затем продолжительные вариации уровня гораздо меньшей интенсивности, амплитуда которых не превышала 10 см.

Во всех случаях наблюдались высокочастотные колебания до прихода главной волны – это типично для регистраторов придонного гидростатического давления, которое изменяется при колебаниях морского дна во время прохождения сейсмических поверхностных волн (волн Рэлея). На самый близкий к очагу землетрясения датчик 21418 волна цунами пришла в 6:11 UTC, основной максимум отмечен в 6:19 (отклонение от нулевого среднего уровня составило 187 см).

На DART 21401, установленный за пределами глубоководного желоба в районе о.Итуруп, цунами пришло существенно позже, в 6:43. Максимальная высота волны (+67 см, очень большая по сравнению даже с опасным Чилийским цунами) отмечена в 6:53, более чем за 20 минут до прихода волны в бухту Мало-Курильская. Для работы СПЦ данные именно этой станции оказались наиболее важными. Затем волна достигла наиболее удаленной станции 21419, которая располагается в районе Средних Курильских островов, максимальное положительное отклонение (54 см) здесь наблюдалось в 7:16.

Для изучения основных периодов колебаний, вызванных цунами, применялась методика спектрально-временного анализа, предназначенная для изучения изменений спектральных амплитуд во времени. Расчет производился для диапазона периодов от 2 до 100 мин (частоты от 0.5 до 0.01 цикл/мин), матрица спектральных амплитуд нормировалась на значение 30 см для датчика 21418 и 10 см для двух других. Результаты расчетов представлены на рис. 5.9.

Обращает внимание определенное различие в спектральных характеристиках на разных станциях. Так, на DART 21418 сигнал был в целом существенно более высокочастотным, главный максимум приходится на периоды 6 - 8 мин, можно выделить и второй, на периодах 15-20 мин. Также следует отметить выраженную волновую дисперсию – высокочастотные колебания запаздывают по сравнению с более длиннопериодными составляющими. Подобные эффекты практически невозможно выявить на прибрежных станциях из-за сильного влияния отражений и преломлений волн в зоне переменной глубины и при наличии отражающей береговой границы.

Спектрально-временные диаграммы, рассчитанные по наблюдениям на датчиках 21401

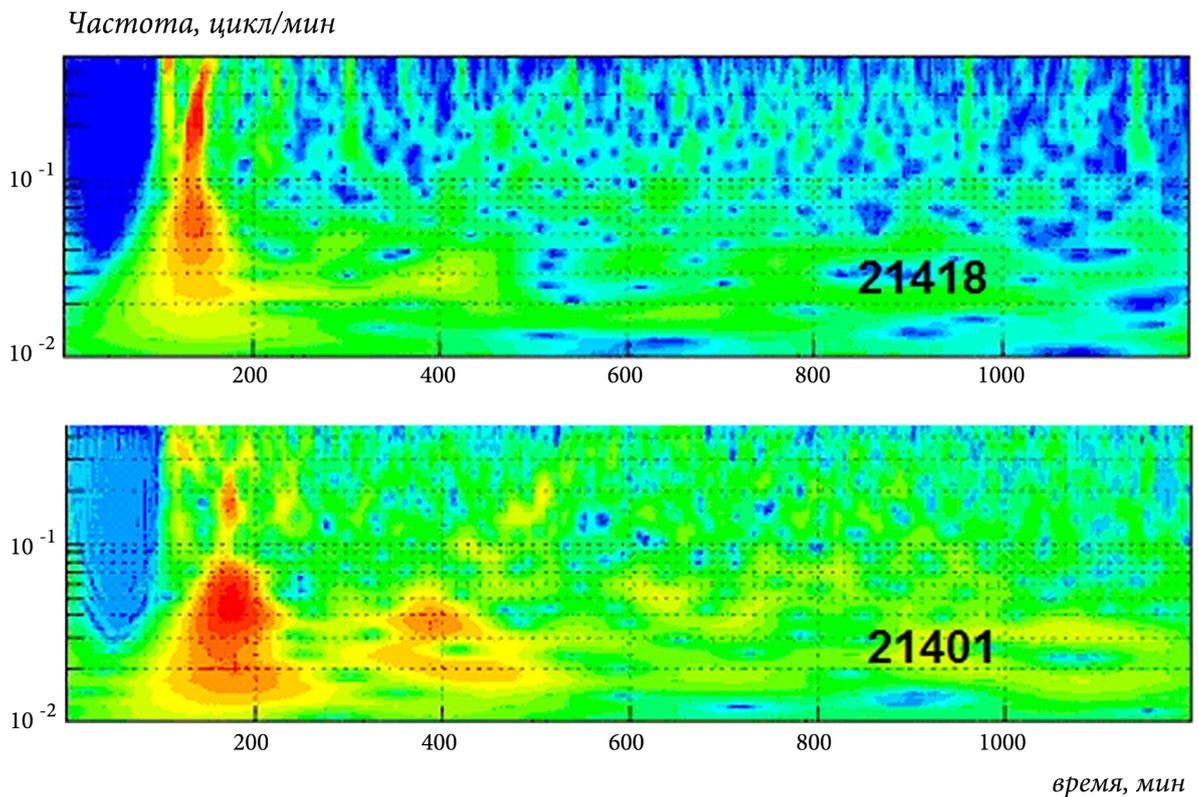


Рис. 5.9. Спектрально-временные диаграммы колебаний уровня на глубоководных станциях DART.

и 21419, практически идентичны, и в целом по сравнению с DART 21418, на них преобладали более низкочастотные колебания. Так, главный максимум приходился на периоды 20-30 мин, заметная энергия отмечена в низкочастотной части спектра, на периодах 50-80 мин.

Такое существенное различие в характере распределения энергии типично для цунами и является следствием вытянутости источника – в направлении большой оси очага распространяются более длинные, а малой – более короткие волны. Данный пример является одним из наиболее ярких подтверждений данного правила.

На Южных Курильских островах в конце 2010 года были установлены три береговых телеметрических регистратора СПЦ – в Малокурильском, Южно-Курильске и Курильске. Однако станция в бухте Малокурильская не работала из-за технической неисправности. Запись берегового самописца уровня моря оборвалась в 16:30 по Гринвичу из-за того, что в аппарате закончились чернила. Правда, наиболее интересная часть вызванных цунами колебаний была, по-видимому, зафиксирована. Лента мареографа была оцифрована с дискретностью 1 мин, полученные данные использова-

лись для статистического и спектрального анализа. Из 8 автономных станций ИМГиГ 6 были утрачены из-за сильных течений, вызванных в прибрежной зоне Тохоку цунами. Данные были получены только в Южно-Курильске и Рейдово (о. Итуруп, охотоморское побережье).

На рис. 5.10-5.11 представлены графики 20-часовых отрезков непериодических колебаний уровня моря на указанных станциях. В бухте Малокурильская первая волна была достаточно мощной, положительное отклонение составило 84 см (зафиксировано в 7:09), а отрицательное – 67 см в 7:24. Максимальная высота волны отмечена на два часа позже, в 9:09, ее высота составила 150 см, значительное понижение уровня (-79 см) наблюдалось на несколько минут раньше, в 9:04. Таким образом, размах колебания от подошвы волны до ее гребня составил 229 см. Интересно отметить, что характер проявления цунами 11 марта в бухте Малокурильская заметно отличался от типичного для данного бассейна, когда в записях доминируют резонансные колебания с периодом около 19 мин и выраженной групповой структурой (скорее к этому типу более близка запись в Курильске). В данном случае наблю-

уровень, см

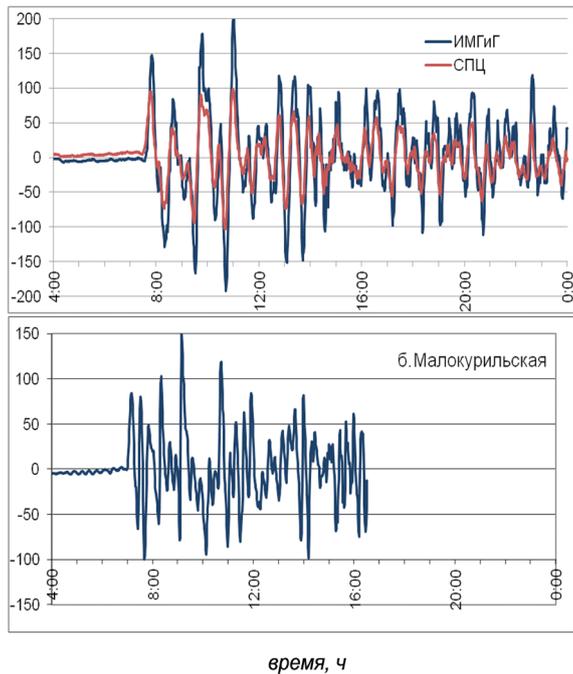


Рис. 5.10. 20-часовые отрезки записи колебаний уровня моря на береговых станциях Южно-Курильск (телеметрический регистратор СПЦ и автономная станция ИМГиГ) и Малокурильская (оцифрованная запись мареографа) при Тохоку цунами 11 марта 2011 года.

уровень, см

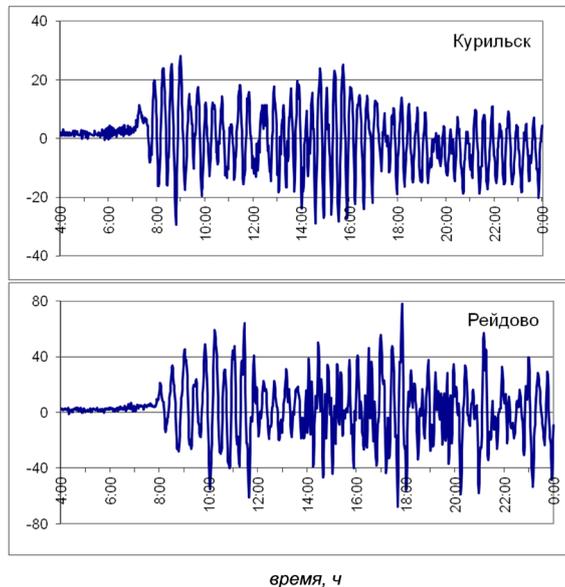


Рис. 5.11. 20-часовые отрезки записи колебаний уровня моря на береговых станциях Курильск (телеметрический регистратор СПЦ) и Рейдово (автономная станция ИМГиГ) при Тохоку цунами 11 марта 2011 года.

дались не очень регулярные всплески интенсивности колебаний на всем анализируемом отрезке записи, хотя период фундаментальной моды был основным. При этом отмечены не характерные для этой бухты низкочастотные вариации уровня с периодом около 2 часов.

В Южно-Курильске работало два прибора – телеметрический регистратор СПЦ и автономная станция ИМГиГ, на которых выявлены идентичные, но заметно отличающиеся по интенсивности колебания. На датчике СПЦ, который прикрыт от прямого подхода волн недавно удлиненным молом, их высоты были существенно меньше. Отмечено явное преобладание сравнительно низкочастотных колебаний. Волна достигла порта Южно-Курильска в 7:26, первый значительный максимум (95 и 148 см соответственно) отмечен в 7:45, последовавший за ним минимум был зафиксирован в 8:17. Наибольший размах колебаний наблюдался значительно позже, экстремально низкий уровень (-103 и -192 см) в 10:39, максимально высокий (98 и 199 см) – в 10:57. В целом спадание энергии колебаний в Южно-Курильской бухты было медленным, вариации с амплитудой более полуметра наблюдались в течение полутора суток.

На двух станциях на охотоморском побережье о. Итуруп характер вызванных цунами колебаний уровня существенно различался. В заливе Китовом (Курильск) выявлены устойчивые резонансные колебания с периодом около 20 мин – такое явное их доминирование не наблюдалось ранее в этом пункте. Максимальный размах колебаний (около 30 см) зафиксирован в первой группе волн. В заливе Простор (Рейдово) преобладали более низкочастотные колебания, а максимальный размах имел гораздо большую величину (146 см) и был отмечен существенно позже, в 17:50 UTC. Эти различия, очевидно, обусловлены влиянием местного рельефа дна и топографии береговой черты.

Полученные на основе инструментальных данных характеристики цунами очень важны для изучения физики данного явления и широко используются для верификации методов численного моделирования, которое в последние годы достигло значительно прогресса. Он обусловлен бурным развитием вычислительной техники, которая позволяет использовать для расчетов детальные цифровые карты глубин, учитывающие особенности донного рельефа и топографии береговой черты. Это позволяет с удовлетворительной точностью воспроизводить исторические цунами и прорабатывать сценарии при происходящих цунамигенных землетрясениях.

Количественная оценка цунамиопасности

Вторым, помимо Службы предупреждения, видом мер по снижению риска негативного воздействия цунами на объекты береговой инфраструктуры является расчет цунамиопасности (возможной высоты волны на данном участке побережья повторяемостью 1 раз в 50 или 100 лет) и создание соответствующих карт. Такие оценки необходимы для оптимального выбора места для размещения новых промышленных объектов в прибрежной зоне и/или разработки необходимых мер по их защите на этапе проектирования.

Методика построения карт цунамиопасности основана на построении региональной функции повторяемости высот цунами, параметры которой определяются по информации о заплесках исторических цунами. Обычно такая информация известна для населенных пунктов и мест, где проводились специальные исследования по сбору информации об исторических цунами.

Оценка риска цунами в конкретной точке (на малом участке) побережья требует знания функции повторяемости цунами в этой точке. Функция повторяемости цунами – средняя частота цунами, заплеск которых превышает пороговое значение h [Kaistrenko, 2011]. Эта функция является монотонно убывающей и при $h > 0,5$ метра хорошо аппроксимируется экспонентой:

Функция повторяемости цунами зависит

$$\varphi(h) = f \cdot e^{-\frac{h}{H^*}}$$

от двух эмпирических параметров:

параметр f - имеет физический смысл частоты сильных цунами и является региональным, медленно изменяющимся от одной до другой точки побережья;

параметр H^* - так называемая характеристическая высота цунами, имеющая размерность длины. Она характерна для каждого конкретного пункта побережья и имеет сильную вдольбереговую изменчивость.

Использование метода наименьших квадратов позволяет получить оценки параметров модели f и H^* вместе с их дисперсиями для пунктов с надежными рядами натуральных данных.

На рис. 6.1. представлены эмпирические распределения высот волн цунами для населенных пунктов Южных Курил и их аппроксимация линейной зависимостью. Проектировщикам для определения необходимых прочностных характеристик новых объектов необходима обычно максимальная высота цунами с повторяемостью 1 раз в 100 лет, для которой можно получить в данном приближении удовлетворительные результаты. В этом случае необходимая расчетная высота цунами определяется по формуле $h_{100} = H^* \ln(100 \cdot f)$.

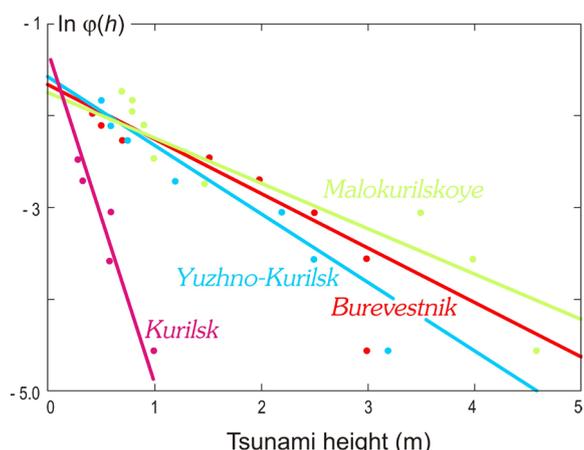


Рис. 6.1. Эмпирические функции повторяемости высот волн цунами для населенных пунктов Южных Курил и их аппроксимация линейной зависимостью.

В результате анализа имеющихся данных выявлено, что средняя частота сильных цунами в южной части Курильской гряды наиболее высока и составляет 17 случаев в столетие. В северном направлении величина данного параметра уменьшается, для Северных Курил почти в два раза (9 – 10 случаев в столетие), и еще сильнее - для побережья полуострова Камчатка (7 случаев в столетие).

Поскольку пунктов с надежными данными о проявлениях цунами немного, полученные для них оценки возможных высот распространялись на прилегающие участки побережья на основе результатов моделирования всех сильнейших цунами в каждом из изучаемых районов.

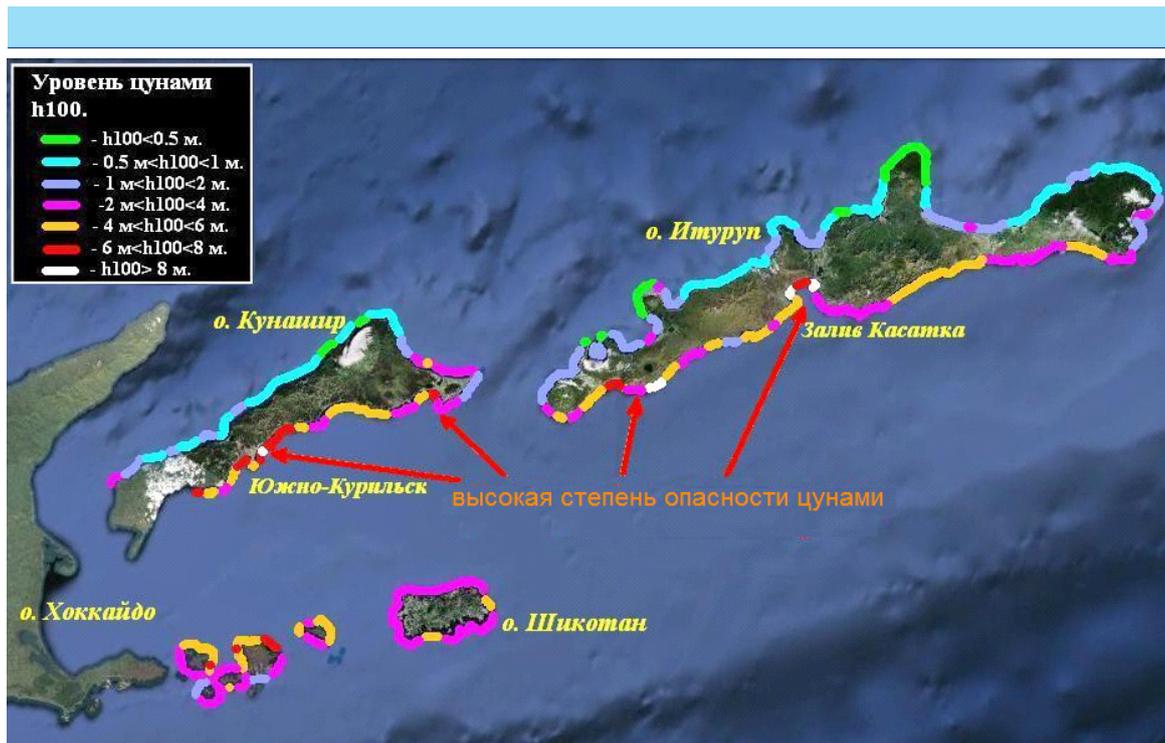


Рис. 6.2. Карты распределения высот волн цунами повторяемостью 1 раз в 100 лет (h_{100}) вдоль побережья Южных Курильских островов.

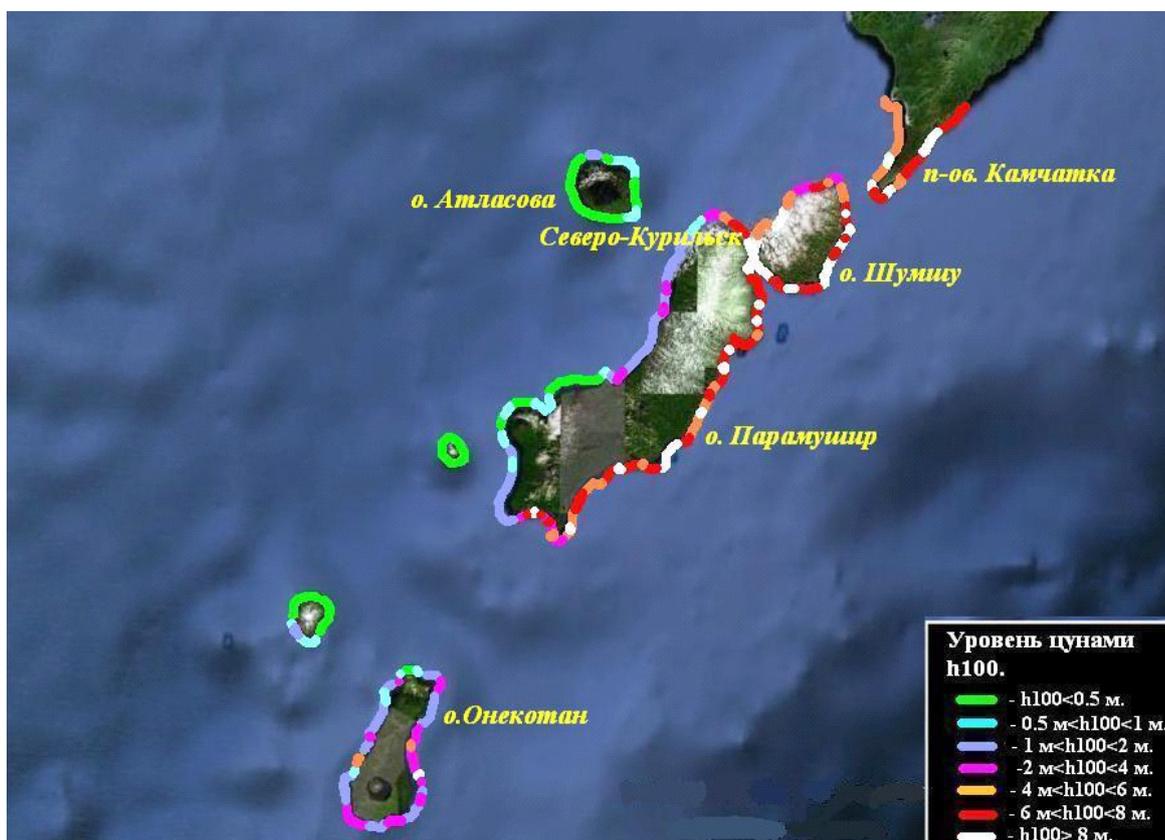


Рис. 6.3. Карты распределения высот волн цунами повторяемостью 1 раз в 100 лет (h_{100}) вдоль побережья Северных Курильских островов.

Для Южных Курильских островов моделировались цунами от четырех близких (7 ноября 1958 г, 13 октября 1963 г, 12 сентября 1969 и 5 октября 1994 г), а также одного удаленного (Чили, 22 мая 1960 г) землетрясений. Интенсивность проявления других цунами была существенно меньше, и на параметры функции повторяемости они не оказывали существенного влияния. Расчеты проводились по упрощенной модели очага, которая определялась магнитудой и глубиной гипоцентра [Поплавский, Храмушин, 2008]. Использовалась аппроксимация реального рельефа с пространственным шагом 1 км, что позволило обеспечить расчет высот цунами редкой повторяемости с шагом вдоль берега около 2 км. Результаты расчетов приведены на рис. 6.2, из которого видно, что район Южно-Курильска (в особенности к северу от поселка), а также побережье залива Касатка о. Итуруп, где находится портпункт Бу-

ревестник, характеризуются высокой степенью цунамиопасности.

Для Северных Курил моделировались только два близких события: Камчатское цунами 5 ноября 1952 г. и Карагинское цунами 22 ноября 1969 г., учитывалось также удаленное Чилийское цунами 22 мая 1960 г. Остальные цунами не оказывали существенного влияния на параметры функции повторяемости высот волн цунами. Следует отметить, что побережье Второго Курильского пролива, где проживает практически все население района (прежде всего, поселок Северо-Курильск) также относится к районам с очень высокой степенью опасности цунами (рис. 6.3). Гораздо менее опасные участки охотоморского побережья о. Парамушир, где ранее также имелись населенные пункты, в настоящее время практически безлюдны.

Заключение

Исследования цунами проводятся в ИМГиГ ДВО РАН и Сахалинском управлении по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды более 50 лет, в ходе этих работ накоплен уникальный фактический материал о проявлениях этого опаснейшего явления не только на Курильских островах. Достижения последнего периода связаны главным образом с детальным изучением характеристик цунами (высот и периодов волн) на основе цифрового архива записей цунами, а также развития сети автономных донных регистраторов цунами и появившихся недавно телеметрических станций Службы предупреждения. Информация о развитии волнового процесса в защищаемом регионе, поступающая на компьютеры дежурных операторов в реальном времени, позволяет повысить эффективность деятельности СПЦ за счет снижения числа ложных тревог и принимать более обоснованные решения о подаче сигналов тревоги цунами или ее отбоя.

Разработанная в ИМГиГ методика количественной оценки цунамиопасности и построенные на ее основе карты вдольберегового распределения высот волн цунами редкой повторяемости позволяют принимать адекватные решения при выборе места размещения новых объектов в цунамиопасных районах и обеспечения необходимых прочностных характеристик на этапе их проектирования.

Предпринимаемые усилия направлены на снижение риска разрушения прибрежных населенных пунктов и гибели людей на Курильских островах.

Литература

Атлас Курильских островов / РАН. Ин-т географии, Тихоокеан. ин-т географии ДВО РАН, РФФИ; редкол.: В.М. Котляков (пред.), Н.Н. Комедчиков (гл. ред.) и др.; отв. ред.- картограф Е.Я. Федорова.- М.-Владивосток: ИПЦ «ДИК», 2009.- 516 с.: ил., карт.+ диск.- Библиогр.: с. 492-505.- Указ. геогр. назв.: с. 506-507.

Дыхан, Б.Д., Жак, В.М., Куликов, Е.А., Лаппо, С.С., Митрофанов, В.Н., Поплавский, А.А., Родионов, А.В., Соловьев, С.Л., Шишкин, А.А. Первая регистрация цунами в открытом океане // ДАН СССР. - 1981. - Т.257, №5. - С. 1088-1092.

Жак, В.М., Соловьев, С.Л. Дистанционная регистрация слабых волн типа цунами на шельфе Курильских островов // ДАН СССР. - 1971. - Т. 198, №4. - С. 816-817.

Золотухин, Д.Е., Ивельская, Т.Н. Пространственная детализация магнитудно-географического критерия цунамиопасности землетрясения в районе центральных Курильских островов // Проблемы анализа риска. - 2010. - Т. 7, № 2. - С. 24-32.

Ивельская, Т.Н., Шевченко, Г.В. Усиление низкочастотной составляющей Чилийского цунами (май 1960 г) в северо-западной части Тихого океана // Метеорология и гидрология. - 2006. - №2. - С. 69-81.

Ивельская, Т.Н., Храмушин, В.Н., Шевченко, Г.В. Чилийское цунами 27 февраля 2010 года: проверка состояния службы предупреждения // Проблемы анализа риска. - 2010. - Т. 7, № 2. - С. 34-47.

Кайстренко, В.М., Шевченко, Г.В., Ивельская, Т.Н. Проявления цунами Тохоку 11 марта 2011 г. на Тихоокеанском побережье России // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2011. - Т. 38, № 1. - С. 41 — 64.

Лаверов, Н.П., Лаппо, С.С., Лобковский, Л.И., Баранов, Б.В., Кулинич, Р.Г., Карп, Б.Я. Центрально-Курильская «брешь»: строение и сейсмический потенциал // ДАН. - 2006. - Т. 408, № 6. - С. 818-821.

Соловьев, С.Л., Го, Ч.Н. Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. - М.: Наука, 1974. - 310 с.

Соловьев, С.Л. Землетрясения и цунами 13 и 20 октября на Курильских островах. - Южно-Сахалинск: СахКНИИ СО РАН, 1965. – 102 с.

Файн, И.В. Частотные свойства Курильского шельфа // Генерация цунами и выход волн на берег: посвящается 100-летию Международных Географических Исследований / отв. ред.: С.Л. Соловьев, В.М. Кайстренко; Результаты исследований по международным географическим проектам. - М. : Радио и связь, 1984. - С. 80-83.

Проявление цунами 4 октября 1994 года на Шикотане / В.М. Кайстренко, В.К. Гусяков, В.А. Джумагалиев, Г.С. Дыхан, А.И. Ивашенко, Г. Йех, Л.Н. Каго, А.А. Клочков, Е.Н. Пелиновский, Г.С. Предтеченский, Е.В. Сасорова, В.В. Титов, А.А. Харламов, Е.В. Шельтинг // Проявления конкретных цунами. Цунами 1993 и 1994 годов на побережье России / ред. В.М. Кайстренко. - Южно - Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. - С. 55-73.

Проявления цунами 4 октября 1994 года на побережье Курильских островов / Ю.П. Королев, Л.Д. Жукова, Н.Д. Золотухина, А.А. Клочков, Е.А. Куликов, В.Н. Куракин, А.А. Кругляков, Б.В. Левин, А.А. Поплавский, Н.С. Терентьев // Проявления конкретных цунами. Цунами 1993 и 1994 годов на побережье России / ред. В.М. Кайстренко. - Южно – Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997.- С. 74 – 92.

Поплавский, А.А., Храмушин, В.Н., Непон, К.И., Королев, Ю.П. Оперативный прогноз цунами на морских берегах Дальнего Востока России / отв. ред. А.И. Иващенко. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. - 273 с.

Поплавский, А.А., Храмушин, В.Н. Методы оперативного прогноза цунами и штормовых наводнений. – Владивосток: Дальнаука, 2008. - 176 с.

Лобковский, Л.И., Куликов, Е.А., Рабинович, А.Б., Иващенко, А.И., Файн, И.В., Ивельская, Т.Н. Землетрясения и цунами 15 ноября 2006 г и 13 января 2007 г в районе Средних Курил: оправдавшийся прогноз // ДАН. – 2008. – Т. 418, №6. – С. 829 - 833.

Иващенко, А.И., Гусяков, В.К., Джумагалиев, В.А., Йех, Г., Жукова, Л.Д., Золотухина, Н.Д., Кайстренко, В.М., Като, Л.Н., Клочков, А.А., Королев, Ю.П., Кругляков, А.А., Куликов, Е.А., Куракин, В.Н., Левин, Б.В., Пелиновский, Е.Н., Поплавский, А.А., Титов, В.В., Харламов, А.А., Храмушин, В.Н., Шельтинг, Е.В. Шикотанское цунами 5 октября 1994 г. // ДАН. - 1996. - Т. 348, №4. - С. 532-538.

Kaistrenko, V. Tsunami Recurrence versus Tsunami Height Distribution Along the Coast // Pure and Applied Geophysics. – 2011. - Vol.168, №11. - P. 2065-2069.

Kaistrenko, V., Sedaeva, V. 1952 North Kuril Tsunami: New Data from Archives // Tsunami Research at the End of a Critical Decade / Ed. G.T.Hebenstreit Kluwer.- Dordrecht; Boston; London, 2001. - P. 91-102.

MacInnes, B.T., Pinegina, T.K., Bourgeois, J., Razzhegaeva, N.G., Kaistrenko, V.M., Kravchunovskaya, E.A. Field survey and geological effects of the 15 November 2006 Kuril tsunami in the middle Kuril Islands // Pure and Applied Geophysics.- 2009. – Vol.166, № 1-2. - P. 9–36.