Российская Акадешия Ę

Дальневосточное отделение

Институт морской геологии и геофизики СКБ средств автоматизации морских исследований

ОПЕРАТИВНЫЙ ПРОГНОЗ ЦУНАМИ НА МОРСКИХ БЕРЕГАХ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА России



УДК 551.446.33/62:681.3

Поплавский А.А., Храмушин В.Н., Непоп К.И., Королев Ю.П.

Оперативный прогноз наводнений на морских берегах Дальнего Востока России:

Владивосток, Южно-Сахалинск: ДВО РАН, 1997. 272 с.

Книга состоит из двух частей с приложениями.

В части 1 исследуются условия, возможности и способы достижения необходимой для эвакуации населения заблаговременности предупреждения о цунами, когда источник волн и предупреждаемые объекты находятся близко друг к другу, в реальной географической обстановке дальневосточных побережий России. Показывается, что обеспечение безопасности населения требует не только определенных изменений конфигурации наблюдательных подсистем Системы оперативного предупреждения о цунами, но и учета ее реальных возможностей давать заблаговременные предупреждения о цунами в конкретные населенные пункты. Предлагаются методики прогнозной оценки опасности цунами по минимальным данным о землетрясении и их уточнения по данным наблюдений минимального числа гидрофизических станций.

В части 2 рассматриваются вопросы использования вычислительного моделирования длинноволновой динамики океана с целью выполнения прогнозов и предупреждения об опасных морских явлениях, при этом основное внимание уделяется использованию реализованных вычислительных моделей в процессе проведения тревоги цунами. Приводятся материалы и документы о функционировании Сахалинской службы предупреждения о цунами. В приложениях подробно описываются комплексы программ для персонального компьютера типа IBM PC, предназначенные для проведения вычислительных экспериментов и моделирования цунами, приливов и приливных течений, а также взаимодействия океана и атмосферы с целью выполнения прогнозов штормовых нагонов и тягунов в портах. Программное обеспечение предлагаются к свободному использованию всеми заинтересованными службами и организациями.

Книга представляет интерес для научных работников, специализирующихся в области океанологических исследований, для лиц и организаций, занимающихся оперативным прогнозом опасных морских явлений, таких как цунами и штормовые нагоны и ликвидацией их последствий в составе соответствующих служб (центральные и территориальные подразделения Гидрометеослужбы и МинЧС Российской Федерации).

Книга издается при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 97.05.66037 «Математическое и вычислительное моделирование приливного режима и режима течений в Охотском море».

Ответственный редактор: А.И. Иващенко.

Рецензенты: Кайстренко В.М., Грабовский А.И.

Утверждено к печати Ученым советом Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН.

ISBN 5-7442-1022-9

© ИМГиГ, СКБ САМИ, 1997 г.

Содержание

Введе	чие	3
ЧАСТЬ 1 ОПЕРАТ	АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОЙ И ГИДРОФИЗИЧЕСКОЙ ПОДСИСТ ИВНОГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ С ПОЗИЦИИ ЗАБЛАГ ВРЕМЕННОСТИ	EM O-
Глава 1.	Критерии качества функционирования и эффективность системы	
	предупреждения о цунами	13
1.1.	Заблаговременность предупреждения о цунами. Условия заблаговременности	13
1.2.	Критерии качества работы и источники ошибок СПЦ	17
1.3.	Эффективность работы СПЦ, как ее "коэффициент полезного действия"	20
1.4.	Риск при ичнами и социальная эффективность СПЦ	22
1.5.	Экономическая эффективность СПЦ	24
1.6.	Выводы	27
Глава 2.	Некоторые свойства полей времен пробега цунами и их разностей	29
2.1.	Оптимальная установка гидрофизической станции в бассейне с	
	горизонтальным плоским дном	30
2.2.	Поля времени добегания цунами до пары точек в бассейне с плоским	
	наклонным дном	37
2.3.	Некоторые практические приемы анализа времен добегания и их	
	разностей в реальных бассейнах с точки зрения достаточной	
	заблаговременности доставки тревожного сообщения в населенные	
	пункты	39
Глава З.	Заблаговременность предупреждения о цунами в ближней зоне	
	Российской СПЦ	42
3.1.	Юго-западный беринговоморский сейсмический регион	43
3.2.	Камчатский сейсмический регион	54
3.3.	Курильский сейсмический регион	71
3.4.	Япономорский сейсмический регион	80
3.5.	Выводы	97

Глава 4.	 Цунами как макросейсмический эффект подводного землетрясения 	
4.1.	Вероятность возбуждения цунами землетрясением произвольной	
	магнитуды как вероятность возникновения в его эпицентре 9-	
	бальных сотрясений	. 100
4.2.	Определение вида зависимости начальной высоты цунами от	
	магнитуды и глубины очага землетрясения	. 104
4.3.	Геометрия макросейсмического источника и начальная энергия	
	цунами	. 108
4.4.	Выводы	. 112
Глава 5.	Способ оперативного прогноза цунами по данным удаленных	
	уровенных станций	. 113
5.1.	Общие соображения	. 113
5.2.	Вывод соотношений взаимности для нестационарных длинных волн	. 115
5.3.	Оценка цунами для осесимметричного источника	. 119
5.4.	Оценка цунами для неоднородного источника	. 121
5.5.	Способ оценки цунами по данным удаленных уровенных станций	. 122
Заключе	ние к первой части	. 124

ЧАСТЬ 2 ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛИННО-ВОЛНОВОЙ ДИНАМИКИ ОКЕАНА В ОПЕРАТИВНОМ РЕЖИМЕ И ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЭКСПЕРТНЫХ РАБОТ

Вводн	дные замечания		
Глава 1.	Вычислительные эксперименты. Задачи и проблемы	133	
1.1.	Вычислительные модели и методы моделирования в океанологии	136	
1.2.	Интерпретация океанологических данных и результатов		
	вычислений	139	
1.3.	Выполненные научные разработки и нерешенные проблемы	139	
1.4.	О методах обеспечения качества численного моделирования		
	длинноволновых процессов	144	
Глава 2.	Математические и вычислительные модели	146	
2.1.	Кинематическая модель волновых фронтов и лучей	146	
2.2.	Уравнения длинных волн в полных потоках	148	
2.3.	Условия и критерии моделирования	149	
2.4.	Эмуляция плоского наката	151	
Глава З.	Использование вычислительного моделирования в действующих		
	службах предупреждения об опасных морских явлениях	153	
3.1.	Действующий регламент проведения тревоги цунами	153	
3.2.	Предложения об использовании вычислительных экспериментов при		
	проведении тревоги цунами	155	
3.3.	Регламент вычислений для уточненного прогноза цунами.	157	

3.4.	Пример оценки заблаговременности предупреждения	
	гидрофизической подсистемы цунами для острова Сахалин	159
3.5.	Пример оперативного моделирования цунами 5 октября 1994 г	161
3.6.	Опыт вычислительного моделирования приливного режима в	
	Охотском море	166
3.7.	Поверочное моделировании штормового нагона 7-8 ноября 1995	
	года	171
3.8.	Экспериментально-вычислительная оценка длинноволновых	
	процессов на Сахалинском шельфе	175
<i>3.9</i> .	Предложения по техническому оснащению Сахалинской службы	
	предупреждения об опасных морских явлениях	179
Глава 4.	Анализ эффективности сахалинской Службы предупреждения о	
	иунами за периол ее существования	183
4.1.	О приниипах оценки качества работы Службы предупреждения о	
	$\frac{1}{P} = \frac{1}{P} = \frac{1}$	183
4.2.	чу Показатели работы гидрофизической подсистемы и в иелом	
	Службы за 1958-1994 годы	184
4.3.	О прямых оценках экономической эффективности (ушерба) от	
	функционирования гидрофизической подсистемы и Службы в	
	иелом	187
4.4.	Выводы	190
Глара 5	Анациа дейстрий Центра Цунами и отдельных ареньер Службы при	
1 ливи Ј.	Анализ действий центра цунами и отдельных звеньев служов при	102
5 1	тревогах цунами за период 1980-1995 годы.	192
<i>J.1.</i> 5 2	О функциях Центра цунами.	192
<i>J.2.</i> 5.2	Показатели работы центра и целом Службы за 1980-1995 годы	195
5.5.	О причинах ухуошения работы Служоы и основных ее поосистем в	104
5 1	послеонее оесятилетие	194
5.4.	Анализ ошиоок и сооев различных звеньев Служоы при тревогах	107
5 5		197
5.5.	Основные неооститки осиствующей служов преоупрежоения о	200
5.6	цунами, их причины и слеоствия	200 204
5.0. 5.7	Преоложения по улучшению служові цунами	204
5.7.	Поосистеми связи и оповещения	200
Глава 6.	Краткие инструкции по практическому использованию	
	вычислительных моделей и программных комплексов	207
6.1.	Расстановка мариографных постов наблюдения	207
6.2.	Редактирование батиметрических карт	208
6.3.	Кинематические расчеты волновых фронтов и лучей	209
6.4.	Моделирование распространения волны цунами	210
65	Моделирование приливного режима	213
0.5.	поселирование приливное ревсияна	

Приложение А. ANI - программный модуль вычислительного
моделирования гидродинамики океана 216
1. Особенности и дополнительные функции графической среды 221
2. Расстановка постов наблюдения и картографические измерения 223
3. Сохранение обновленных данных 224
4. Редактирование и интерполяция батиметрических карт 224
5. Процедура расчетов и построения кинематических полей
6. Проведение полного вычислительного моделирования
7. Доступ к исторической информации о землетрясениях и цунами
Приложение Б. MARIO - утилита ведения временных рядов в океанологии 240
1. Система команд
2. Параметры числового ряда: < E > edit
3. Настройка изображения: < S > Screen
4. Редактирование ряда: <enter>247</enter>
5. Три комплекса математических преобразований: < F >
6. Ввод / Вывод инородных данных: $< I > input; < O > output 251$
7. Форматы данных: < R > Read; < W > Write
8. Структура базы данных для приливных гармоник
Приложение В. Справочные материалы о тревогах проведенных
Сахалинским Центром Цунами в 1986-1995 годах 257
1. Список землетрясений с магнитудой 7.0 и более по Курило-
Камчатской впадине, Японскому и Охотскому морям за период
1986-1995 гг, Информация о которых поступала в Центр Цунами из
различных источников
2. Хронометраж действий дежурных смен центра цунами при
некоторых тревогах цунами за период 1986-1995 г
3. Анализ отдельных тревог цунами
Список литературы

Памяти Сергея Леонидовича Соловьева посвящается

Введение

Предлагаемая вниманию специалистов по цунами книга состоит из двух частей: **часть 1** - "Анализ сейсмической и гидрофизической подсистем оперативного предупреждения о цунами с позиций заблаговременности"; и **часть 2** - "Вычислительное моделирование длинноволновой динамики океана в оперативном режиме и при выполнении экспертных работ".

В первой части делается попытка систематического исследования наиболее неблагоприятной ситуации, в которой может оказаться население и хозяйство подверженных цунами побережий, когда очаг сильного землетрясения - потенциальный источник цунами - располагается в непосредственной близости к каким-либо пунктам и хозяйственным объектам, и Система оперативного предупреждения о цунами (всюду далее - СПЦ) не всегда будет иметь достаточно времени для выработки и доставки заблаговременного предупреждения о цунами в эти пункты. Возможность возникновения такой ситуации вполне реальна, что явствует из следующих двух примеров. Так, при землетрясении 26 мая 1993 года в Японском море, японская служба оперативного предупреждения о цунами передала сигнал тревоги в систему оповещения через 13 минут после начала его регистрации. Однако первая волна подошла к ближайшему (к источнику цунами) участку побережья через 9-10 минут и унесла несколько десятков жизней [Гусяков В.К. и др., 1988]. При Шикотанском землетрясении 4 октября 1994 года весь остров Шикотан, оказавшийся в плейстосейстовой области землетрясения, опустился примерно на 60 см. Волна цунами должна была начать накатываться на берег практически одновременно с землетрясением. Это подтверждается свидетельствами очевидцев.

Специалисты по цунами давно обратили внимание на малую эффективность существующих СПЦ в случаях близких к прикрываемым пунктам источников. В регионах, где такие случаи возможны, рекомендуется [Bernard, 1990, Bernard at al, 1988] создавать локальные СПЦ, которые реагировали бы на опасное событие быстрее, чем существующие. Международная СПЦ имеет характерное время реакции на событие ~1 час, для действующих национальных служб это время составляет ~10 минут. Локальные СПЦ должны реагировать в течение ~2 минут.

Скорость реакции СПЦ на возникающее землетрясение есть лишь одно из трех условий, обеспечивающих реальную полезность тревожных сообщений для прикрыва-

емых пунктов. Два другие - скорость их доставки и длительность эвакуации населения (а также движимого имущества) в безопасные места. Учет действия всех названных факторов в понятии «заблаговременность» предупреждения о цунами (в данном случае равносильном понятию «полезность» предупреждения) и стал одной из основных задач первой части данной книги.

Соответственно, центральная проблема, вокруг которой концентрируется излагаемый материал, есть проблема заблаговременного предупреждения о цунами. Различным аспектам этого вопроса и посвящены главы 1 - 5.

В главе 1 дается строгое определение понятия заблаговременности и выводятся два условия достаточной заблаговременности оперативного предупреждения о цунами, получаемого, соответственно, по сейсмическим и гидрофизическим данным. Географический смысл этих условий состоит в том, что к каждому прибрежному населенному пункту последовательно примыкают со стороны акватории три области, каждая точка которых, принятая в качестве "пробного" источника цунами, либо не удовлетворяет этим условиям, либо удовлетворяет только одному из них (сейсмическому), либо удовлетворяет обоим. Соответственно, мы называем их *сейсмической зоной молчания* СПЩ (сокращенно, СЗМ), *гидрофизической зоной молчания* (сокращенно, ГЗМ), когда заблаговременный прогноз цунами может быть получен только по данным сейсмических наблюдений, и *зоной достоверного прогноза* (когда он, в принципе, может быть получен как по сейсмическим, так и по гидрофизическим данным).

Если источник пересекает сейсмическую зону молчания какого-либо пункта, то это означает, что даже при самом благоприятном стечении обстоятельств (СПЦ выдала правильный прогноз с максимальной возможной оперативностью) волна цунами достигнет его до того, как в нем будет завершена эвакуация, а значит тревожное сообщение в этот пункт будет доставлено не заблаговременно.

Если источник не пересекает названную зону, но пересекает гидрофизическую зону молчания, то в соответствующий населенный пункт может быть доставлено заблаговременно только тревожное сообщение, выработанное по данным сейсмических наблюдений.

Если же он целиком помещается в зоне достоверного прогноза, то в населенный пункт может быть заблаговременно доставлено тревожное сообщение, выработанное на основе сейсмического прогноза, проконтролированное наблюдениями за уровнем океана.

Очевидно, что один и тот же источник цунами может находиться в разных условиях по отношению к разным населенным пунктам, различающихся по заблаговременности и качеству передаваемого СПЦ прогноза. Отсюда становится очевидной необходимость подачи индивидуальных (адресных) сообщений в каждый населенный пункт. В главе предложен вариант способа оценки критериев качества функционирования СПЦ с учетом выполнения индивидуальных условий заблаговременности тревожного сообщения для каждого из предупреждаемых населенных пунктов, а также вводится понятие о социальной и экономической эффективности СПЦ, как коэффициенте ее полезного действия, в сравнении со случаем, когда она отсутствует (не функционирует).

Строгий учет возможности неблагоприятных случаев незаблаговременных предупреждений при оценке критериев качества и эффективности СПЦ показывает, что высокая эффективность СПЦ не может быть достигнута только за счет улучшения качества ее работы, определяемого научно-техническим уровнем ее оснащения (*mexнuчeский фактор*). На него существенно влияют еще по крайней мере два независимых фактора, которые необходимо учитывать.

Первый, названный нами *географическим фактором* (или *географическими условиями*) функционирования СПЦ, определяется взаимным расположением населенных пунктов и ближайших к ним вероятных источников цунами и, в конце концов, тем, каковы времена пробега цунами до населенных пунктов от ближайших к ним вероятных источников, позволяют ли временные нормативы работы СПЦ достичь необходимой заблаговременности прогнозов цунами.

Второй, названный нами *культурным фактором* (или *культурными условиями*) функционирования СПЦ, определяется отношением населения и местных властей к существующей опасности цунами и необходимости дополнительных затрат на специальные исследования и работы, направленные на ее ослабление, начиная с выбора мест строительства новых объектов и кончая таким выбором и обустройством мест эвакуации по тревоге, которые обеспечивали бы минимальное время ее выполнения.

Игнорирование вышеназванных факторов в лучшем случае не позволит достичь максимальной ("теоретической") эффективности СПЦ, а в худшем - может привести к тому, что следование ее прогнозам будет приносить больше экономического ущерба, чем полное игнорирование опасности цунами.

Неблагоприятное действие географического фактора может быть минимизировано выбором наиболее подходящей, с позиции заблаговременности, конфигурации наблюдательных (сейсмической и гидрофизической) подсистем. Это становится возможным благодаря тому, что конфигурация введенных выше *зон* молчания для каждого населенного пункта фиксирована при фиксированной конфигурации наблюдательных подсистем СПЦ. Следовательно эти зоны могут быть заранее построены и изучены, и на основании этого могут быть выработаны какие-то практические рекомендации по изменению конфигурации наблюдательных подсистем и алгоритмического наполнения СПЦ, направленные на уменьшение возможного числа незаблаговременных прогнозов цунами.

Построение и исследование зон заблаговременности сводится к построению и исследованию полей времен добегания цунами до населенных пунктов и разностей времен добегания цунами до пар точек населенный пункт - станция измерения уровня моря. Возможности такого исследования на простейших моделях бассейнов с плоским дном показываются в **главе 2.** Там же приводятся некоторые полезные практические приемы исследования и выбора рациональной, с точки зрения заблаговременности, конфигурации гидрофизической подсистемы СПЦ в реальных бассейнах.

В главе 3 с позиций заблаговременности анализируются географические условия, в которых находятся прикрываемые Российской СПЦ населенные пункты и другие объекты, и показывается, что многие из них часто не могут быть обеспечены заблаговременными прогнозами цунами, выработанными по данным сейсмологических наблюдений при существующих конфигурации и временных нормативах работы СПЦ. При этом, для большинства этих пунктов принципиально невозможно полностью избежать таких случаев незаблаговременного прогноза. Отсюда следуют некоторые практические предложения (выраженные в самом общем виде), касающиеся дополнения существующей сейсмической подсистемы СПЦ новыми пунктами сейсмологических наблюдений и регламента их работы в случае регистрации сильного близкого землетрясения.

В этой же главе изучаются принципиальные возможности гидрофизической подсистемы СПЦ (независимо от ее конкретной существующей конфигурации) и показывается, что они сильно различаются в разных подрегионах зоны ответственности Российской СПЦ. Здесь же даются некоторые предварительные рекомендации по рациональному размещению ее датчиков. Эта глава по существу представляет собой попытку исследования влияния географического фактора на работу Российской СПЦ.

Глава 4 посвящена обоснованию нескольких вариантов алгоритма количественной оценки опасности цунами по минимальным данным сейсмологических наблюдений, когда известны лишь положение эпицентра и магнитуда землетрясения. Эти и подобные алгоритмы являются единственным средством оперативного прогноза высоты цунами, когда источник находится в пределах гидрофизической зоны молчания в непосредственной близости к границе сейсмической зоны молчания.

Гидрофизический метод прогноза цунами будет наиболее полезен для оперативного прогноза в том случае, если он будет независим от сейсмических данных об источнике цунами. В **главе 5** для волн цунами показывается справедливость *принципа взаимности*, известного из акустики, и на этой основе предлагаются теоретические основы метода прогноза максимальной высоты цунами в окрестности ее переднего фронта, вблизи того или иного участка берега по данным наблюдений одной или трех станций измерения уровня океана (в зависимости от принимаемых самых общих априорных предположений о форме начального возвышения в источнике цунами), требующий только информации о положении источника. Разработку алгоритма и его программное воплощение еще предстоит выполнить. Заметим, что сейчас данные наблюдений за уровнем океана используются в оперативной работе лишь для качественного подтверждения факта возникновения цунами после землетрясения и для отбоя тревоги цунами, но *не для прогноза количественных характеристик волны* у побережий.

Основное содержание части 2 посвящено решению гидродинамических задач, связанных с прогнозами опасных морских явлений, раскрываются особенности вычислительного моделирования цунами, штормовых нагонов и приливного режима, ставятся проблемы и задачи, решение которых необходимо для внедрения автоматизированных информационных систем и вычислительного моделирования динамики океана в повседневную практику оперативных служб наблюдения за состоянием моря. В этой же части приводится подробное описание действующей на Сахалине службы предупреждения о цунами, показываются методы ее совершенствования, обсуждаются проблемы и способы их решения с целью повышения эффективности и надежности этой службы, действующей в тесной увязке со службой сейсмических наблюдений и системой оперативной связи и оповещения. Обсуждается регламент и варианты использования информационной системы исследователя-океанолога и автоматизированного рабочего места (АРМ) инженера-океанолога, в том числе в реальных условиях работы оперативных служб наблюдения за состоянием моря (подразделения Сахалинского управления гидрометслужбы). Эта часть снабжена собственными вводными замечаниями, в которых достаточно подробно описаны ее содержание и структура.

Авторы в разной степени участвовали в работе над материалами всех разделов книги. Ответственность за возможные ошибки и текстуальные недочеты распределяется между ними следующим образом: Введение, Главы 1 - 4, Заключение Части 1 - Поплавский, Глава 5 Части 1 - Королев, Часть 2 - Храмушин и Непоп.

Авторы приносят глубокую благодарность Исааку Вениаминовичу Файну, когдато работавшему в лаборатории цунами ИМГиГ, в то время ДВО АН СССР, который начинал эту работу еще в 1986 году, и продолжающий плодотворное сотрудничество с нами до сего дня. И.В. Файн не только заложил базис вычислительных работ лаборатории цунами и составил первый в нашем институте вариант упомянутого выше АРМ для анализа времен пробега и динамики волн цунами, но и предложил некоторые практические приемы рационального, с точки зрения заблаговременности, размещения станций измерения уровня океана. Авторы благодарны преподавателям и сотрудникам научно-исследовательского сектора математического факультета Иркутского Университета В.А. Терлецкому и Н.И Пекуровой, выполнивших по просьбе авторов небольшое, но очень полезное исследование экстремальных свойств времен добегания цунами и их разностей, формы их изолиний в бассейнах с плоским горизонтальным и наклонным дном, заведующему лабораторией цунами ИМГиГ В.М. Кайстренко и всем сотрудникам этой лаборатории за внимание и терпение при обсуждении результатов этой работы по мере их представления на семинарах лаборатории.

Авторы испытывают глубокую благодарность к недавно (в 1994 году) и безвременно умершему академику С.Л. Соловьеву, инициатору и родоначальнику работ по цунами в нашем институте и бывшему безусловным лидером в области цунами в нашей стране. Без его мощного влияния ни один из авторов просто не стал бы специалистом в области цунами, поэтому памяти его и посвящается данная книга. Это посвящение лишь в самой малой степени отражает то огромное уважение, которое мы испытываем к этому незаурядному человеку.

Книга издается при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 97.05.66037 «Математическое и вычислительное моделирование приливного режима и режима течений в Охотском море».

Часть 1. Анализ сейсмической и гидрофизической подсистем оперативного предупреждения о цунами с позиций заблаговременности

Глава 1. Критерии качества функционирования и эффективность системы предупреждения о цунами

С вопросами, которым посвящена настоящая глава, мы впервые вплотную столкнулись при работе над технико-экономическим обоснованием проекта Российской СПЦ, разрабатывавшегося в 1985-1988 г.г. [ТЭО-2, 1987] и монографией [Поплавский, Куликов, Поплавская, 1988], написанной в те же годы. Излагаемый ниже материал является развитием некоторых идей, изложенных в цитированных работах.

1.1. Заблаговременность предупреждения о цунами. Условия заблаговременности.

Под заблаговременностью тревожного сообщения, доставленного в некоторый населенный пункт, здесь понимается величина

$$Gt = tt - tw, \tag{1.1}$$

где tt - момент подхода волны цунами к этому населенному пункту и tw - момент получения в нем тревожного сообщения о цунами. С точки зрения населения (потребителя такого сообщения) заблаговременность будет *достаточной*, если

$$Gt \ge Te, \tag{1.2}$$

где Те - есть минимальное время, необходимое для эвакуации населения и движимого имущества, а записанное неравенство есть условие *достаточной заблаговременности предупреждения о цунами*, доставляемого в рассматриваемый населенный пункт. Всюду ниже, для краткости, мы будем вместо слов "достаточная заблаговременность" употреблять просто слово "заблаговременность", а в тех случаях, когда условие (1.2) будет нарушаться, будем говорить о "незаблаговременном" предупреждении.

В общем случае, когда СПЦ имеет как сейсмическую, так и гидрофизическую подсистемы наблюдения, при сильном землетрясении в населенном пункте можно ожидать поступления двух тревожных сообщений: от сейсмической подсистемы (сейсмический метод прогноза) в момент tws и от гидрофизической подсистемы в момент twh > tws. Поэтому и условий заблаговременности должно быть два - по одному на каждую из названных подсистем.

Распишем подробнее условия заблаговременности для простейшего случая, когда СПЦ имеет в своем составе одну сейсмическую и одну уровенную станцию и прикрывает единственный населенный пункт.

Момент подхода волны цунами к берегу вблизи населенного пункта
$$tt = t0 + Tt$$
, (1.3)

где t0 - момент возникновения (цунамигенного) землетрясения и Tt - время пробега цунами (от источника) до населенного пункта.

Тревожное сообщение от сейсмической подсистемы поступит в населенный пункт не ранее момента

$$tws = t0 + tp + Tres + Tcom, \qquad (1.4)$$

где tp - время пробега продольной волны землетрясения до сейсмической станции; Tres - интервал времени, необходимый для регистрации сейсмического сигнала, его обработки и передачи тревожного сообщения в каналы связи или длительность реакции сейсмической подсистемы на полезный (сейсмический) сигнал; Tcom - время прохождения сообщения до населенного пункта по каналам связи.

Подставляя (1.4) и (1.3) в (1.2),с учетом (1.1) получим

$$Tt - tp - Tres - Tcom \ge Te \tag{1.5}$$

или, перенося в правую часть неравенства величины, характеризующие оперативность работы сейсмической подсистемы и связи, и обозначив сумму Tres + Tcom + Te = Ts, получим

$$Tt - tp \ge Ts. \tag{1.5a}$$

Обычно бывает, что tp << Tt, тогда этой величиной можно пренебречь и записать приближенное условие заблаговременности сейсмического прогноза цунами

$$Tt \ge Ts. \tag{1.56}$$

Величина Tres, очевидно, не является константой, а зависит от расстояния между эпицентром землетрясения и сейсмической станцией. Мы, однако, всюду ниже, если не будет сделано соответствующей оговорки, будем полагать эту величину постоянной, равной нормативному времени обработки сейсмической информации в случае близкого землетрясения, принятому в данной (Российской) СПЦ. Эта же величина, является минимальным временем пробега цунами, от источника до населенного пункта, при котором еще возможна заблаговременная доставка в него предупреждения о цунами. Ниже мы будем называть его временной дистанцией минимальной необходимой заблаговременности.

Тревожное сообщение от гидрофизической подсистемы может поступить в населенный пункт не ранее момента

$$twh = t0 + Tl + Treh + Tcom, \qquad (1.6)$$

где - Tl -время пробега волны цунами (от источника) до станции измерения уровня океана; Treh - длительность реакции гидрофизической подсистемы на полезный (цунами-) сигнал.

Подставляя (1.6) и (1.3) в (1.2), с учетом (1.1), перенося вправо сумму величин, характеризующих оперативность работы гидрофизической подсистемы и связи и обо-

значая ее Treh + Tcom + Te = Th, получим условия заблаговременности для гидрофизического прогноза цунами:

$$Tt - Tl \ge Th. \tag{1.7}$$

Величина Treh, также как и Tres, не является константой, а зависит, прежде всего, от периода регистрируемой волны цунами и конкретного алгоритма распознавания по-



лезного сигнала, то есть эта величина достаточно неопределенная. Всюду ниже мы будем полагать, для определенности, Treh=Tres.

Условия (1.5), (1.5а) и (1.7) очевидны: временная пауза между началом регистрации полезного сигнала и подходом волны цунами к берегу должна быть достаточно большой, чтобы СПЦ обработала полезный сигнал, выработала и передала по каналам связи тревожное сообщение, а население эвакуировалось бы до начала стихийного бедствия. Столь же очевидно, что они могут выполняться не всегда. Построив для населенного пункта изолинии времени добегания, равного правой части неравенства (1.5а), и разности времен добегания до населенного пункта и уровенной станции, равной правой части неравенства (1.7), мы получим наглядное представление о возможном географическом положении вероятных источников цунами, вообще не удовлетворяющих условиям заблаговременности, удовлетворяющих только условиям (1.5а), и удовлетворяющих обоим условиям и (1.5а) и (1.7).

Рис.1. Схематическое изображение возможного взаимного расположения границ сейсмической (1) и гидрофизической (2) зон молчания СПЦ для пункта Р и источника (3-7). Станция измерения уровня располагается в точке F.

Ограниченные этими изолиниями географические зоны (см рис 1) назовем, соответственно, сейсмической зоной молчания (СЗМ) Системы предупреждения о цунами, для данного населенного пункта, гидрофизической зоной молчания (ГЗМ) и зоной достоверного прогноза (ЗДП). Источник, находящийся в пределах сейсмической зоны молчания или пересекающий ее (источники 3 и 4 на рис.1), вообще не удовлетворяет условиям заблаговременности, так как время добегания от него до населенного пункта будет меньше Ts (то-есть находится ближе к населенному пункту, чем изолиния Tt=Ts). Источник, находящийся за пределами этой зоны, но пересекающий гидрофизическую зону молчания (источники 5 и 6 на рис.1), удовлетворяет сейсмическим условиям заблаговременности (1.5а), но не удовлетворяет гидрофизическим условиям (1.7). Для него СПЦ может выдать заблаговременно только сейсмический прогноз цунами. Источник, находящийся целиком в зоне гидрофизического прогноза (источник 7 на рис.1), удовлетворяет обоим условиям заблаговременности (1.5а, 1.7) и относительно него СПЦ не только в состоянии прогнозировать цунами по данным сейсмических наблюдений, но и проконтролировать его наблюдениями за уровнем океана. Здесь и ниже мы предполагаем, что наличие гидрофизических станций автоматически обеспечивает прогнозные оценки высоты волны цунами в каждом из прикрываемых населенных пунктов по данным текущих наблюдений уровня океана.

В общем случае, когда СПЦ прикрывает i=1,2,..., I населенных пунктов и имеет в своем составе j=1,2,..., J сейсмических и k=1,2,..., K уровенных станций, условия заблаговременности запишутся так:

$$Tt(i) - Tp(j) > Ts(i),$$
 (1.8a)
 $Tt(i) - Tl(k) > Th(i)$ (1.86)

или, принимая, что Система сработает, если полезный сигнал зарегистрируют хотя бы одна ближайшая к эпицентру землетрясения (источнику цунами) сейсмическая и одна уровенная станции и полагая, что правые части неравенств (1.8) являются константами (то есть не зависят от индексов i), получим:

$$Tt(i) - \min\{Ts(j)\} > Ts \tag{1.9a}$$

$$Tt(i) - \min\{Tl(k)\} > Th.$$
(1.96)

Из изложенного материала следуют два важных вывода. Первый состоит в том, что каждый прибрежный населенный пункт имеет сейсмическую и гидрофизическую зоны молчания, такие, что относительно источников цунами, их пересекающих, СПЦ физически не в состоянии выдать в этот населенный пункт заблаговременно соответствующий (сейсмический или гидрофизический) прогноз. Такая неблагоприятная ситуация будет реально возможной прежде всего для тех населенных пунктов, чья сейсмическая зона молчания пересекает зону вероятных источников цунами.

Выявление таких населенных пунктов и определение конфигурации указанных пересечений даст представление о реальных возможностях СПЦ обеспечивать заблаговременными прогнозами цунами свою зону ответственности, поскольку такие "не пустые" сейсмические зоны молчания являются источником неизбежных ошибок СПЦ. Знание их конфигурации позволяет попытаться предпринять какие-то дополнительные профилактические меры для обеспечения безопасности соответствующих населенных пунктов. Существование "не пустых" сейсмических и гидрофизических зон молчания является свидетельством неблагоприятного воздействия упомянутого во введении географического фактора на качество работы СПЦ.

Второй вывод становится очевидным при внимательном рассмотрении структуры констант, стоящих в правых частях неравенств (1.5), (1.5а), (1.7). Каждая из них является суммой трех величин - Tres или Treh, Tcom и Te. Первые две из них являются техническими константами СПЦ и подсистемы связи, а последняя - минимальное время выполнения эвакуации - является "технической константой" населенного пункта. Поэтому *реальная заблаговременность прогнозов цунами, выдаваемых СПЦ, определяется не только качеством работы, собственно, СПЦ и связи, но и готовностью населенных пунктов к экстренной эвакуации.* В этом, в частности, проявляется воздействие "культурного" фактора на качество функционирования СПЦ.

1.2. Критерии качества работы и источники ошибок СПЦ

Под критериями качества работы СПЦ обычно понимают [ТЭО-2, 1987] вероятности ложной тревоги и пропуска цунами, а также заблаговременность предупреждения о цунами. В качестве оценок названных вероятностей принято пользоваться отношениями числа ложных тревог к полному числу поданных в течение фиксированного интервала времени и числа пропущенных цунами к полному числу происшедших событий в тот же интервал времени. Что касается заблаговременности, то относительно нее лишь подразумевается, что она должна быть *достаточной*, однако соответствующий критерий не определен и, поэтому никак не оценивается. При этом предупреждение считается оправдавшимся, если хотя бы в одном населенном пункте, в пределах конкретной зоны ответственности, наблюдалась заметная волна цунами.

Единственным методом прогноза цунами, реализованным на практике, является сейсмический, когда оперативно оценивается положение эпицентра и магнитуда землетрясения. К классу цунамигенных относятся землетрясения, происшедшие под дном акватории и имеющие магнитуду М≥Мп (для Курило-Камчатских землетрясений Мп=7). Данные гидрофизических наблюдений, когда последние выполняются СПЦ, используются не для прогноза высоты волны у конкретных участков берега, а лишь для подтверждения факта возникновения цунами, а также для определения момента отбоя тревоги. Таким образом вероятности ошибок СПЦ (критерии качества работы СПЦ), есть вероятности ошибок сейсмического метода прогноза цунами, оцениваемые без учета заблаговременности доставляемых в населенные пункты тревожных сообщений.

Как это можно видеть из рис.1, для правильного учета заблаговременности предупреждений при оценке критериев качества работы СПЦ следовало бы изменить порядок подачи тревоги цунами на прикрываемое СПЦ побережье, а именно, перейти от общего для всей зоны или ее конкретного района ответственности сигнала тревоги к индивидуальным сигналам лишь в те населенные пункты, которые подвергаются реальной опасности цунами. Такой порядок подачи тревожных сообщений отвечает наиболее типичной ситуации, когда волны цунами представляют опасность лишь на берегах в ближней окрестности источника (слабые цунами возникают гораздо чаще катастрофических), следовательно, при одном и том же цунами в разные населенные пункты должны подаваться сигналы разного содержания: "цунами возможно" и "цунами не будет".

Соответственно, множество элементарных событий, над которым должны оцениваться вероятности ложной тревоги и пропуска цунами есть множество сообщений типа "цунами не будет", "возможно цунами", поступающих в каждый из i=1,2,..., I населенных пунктов в течение интервалов времени $t_0(m) < t < t_T(m,i)$ - Те. (Здесь m=1,2,..., М - порядковый номер землетрясения, происшедшего в течение фиксированного интервала времени Т). Как и выше, tt(m,i) - ожидаемый момент подхода вероятной волны цунами от m-го землетрясения к пункту i, а Те - длительность эвакуации по тревоге цунами. Отсутствие в указанный интервал времени тревожного сообщения эквивалентно сообщению: "цунами не будет".

В зависимости от того, какую из трех зон: СЗМ, ГЗМ или зону достоверного прогноза конкретного населенного пункта пересекает источник цунами, различными будут и вероятности ложной тревоги и пропуска цунами.

Действительно, когда вероятный источник цунами пересекает сейсмическую зону молчания какого-либо населенного пункта, истинное предупреждение поступит в него не заблаговременно. Мы полагаем здесь, что незаблаговременное предупреждение эквивалентно пропуску цунами потому, что при незаблаговременном предупреждении резко возрастает риск для жизни и здоровья людей в случае, если оно окажется истинным, и, следовательно, нельзя гарантировать спасения от катастрофы в результате такого предупреждения. И для таких источников вероятность пропуска равна, следовательно, 1. Вероятность ложной тревоги в этом случае не меняется и равна вероятности ложной тревоги при сейсмическом методе прогноза цунами.

Когда вероятный источник цунами пересекает ГЗМ, вероятности ложной тревоги и пропуска цунами есть вероятности ошибок сейсмического метода прогноза цунами.

Когда вероятный источник находится в зоне достоверного прогноза, тревожные сообщения должны быть практически безошибочными. Соответствующие вероятности ошибок прогноза должны быть приняты равными нулю.

Учет заблаговременности предупреждения фактически сведется к оценке средневзвешенной вероятности ошибки того или иного рода по относительному числу случаев попадания очага землетрясения в ту или иную из рассмотренных зон. Можно выполнить указанную оценку следующим образом.

18

Сначала определяются численности N1 нецунамигенных (нецунамиопасных ни для какого пункта из числа прикрываемых) и N2 цунамигенных (цунамиопасных хотя бы для одного из прикрываемых пунктов) из числа N происшедших в течение выбранного интервала времени T сильных землетрясений, а также количества землетрясений $n1 \le N1$ и $n2 \le N2$, относительно которых система выдала, соответственно, ложные прогнозы и имела пропуски цунами. Пользуясь этими величинами, можно оценить вероятности ложной тревоги и пропуска цунами, которые определяют качество сейсмического метода прогноза, безотносительно к заблаговременности его доставки в населенные пункты. При этом вероятность ложной тревоги может оцениваться двумя различными способами: как отношение числа ложных тревог к общему числу не цунамигенных событий (так делается в статистической теории распознавания)

$$\alpha s = \frac{n!}{N1} \tag{1.10}$$

и как отношение числа ложных тревог к числу поданных (так делается в практике российской СПЦ)

$$\delta s = \frac{n!}{N2 - n2 + n!}.\tag{1.11}$$

Вероятность пропуска цунами составит

$$\beta s = \frac{n2}{N2}.\tag{1.12}$$

Вероятности ошибок тесно связаны с понятиями: «обеспеченность» явления цунами достоверными прогнозами и «оправдываемость» прогнозов. Обеспеченность есть 1-β, а оправдываемость - 1-δ.

Теперь для каждого пункта і подсчитываются численности землетрясений N(i,1), не удовлетворяющих сейсмическому условию заблаговременности, N(i,2), ему удовлетворяющих, но не удовлетворяющих гидрофизическому условию заблаговременности и N(i,3), удовлетворяющих этому последнему условию, и определяются соответствующие весовые коэффициенты

$$q(i,m) = \frac{N(i,m)}{N}, \ m = 1,2,3.$$
(1.13)

Весовые коэффициенты можно оценивать и иным способом, как отношения площадей пересечения соответствующих зон и цунамигенной зоны к площади последней. Искомые средневзвешенные оценки вероятности ложной тревоги и пропуска цунами в каждом населенном пункте і будут следующими

$$\alpha(i) = [q(i,1) + q(i,2)]\alpha s, \qquad (1.14a)$$

 $\delta(i) = [q(i,1) + q(i,2)]\delta(s,$ (1.146)

$$\beta = q(i,1) + q(i,2)\beta s.$$
 (1.146)

Очевидно дальнейшее обобщение формул (1.14) для получения средних по всей зоне ответственности значений критериев качества работы СПЦ с учетом заблаговременности тревожных сообщений: соответствующие оценки вероятности ошибки есть средние значения по всем прикрываемым пунктам.

Значения *cs* и *βs* определяются исключительно уровнем понимания явления цунами, заложенного в алгоритмическое (и программное) обеспечение той или иной СПЦ, а также ее и подсистемы связи техническим уровнем. Это внутренние характеристики качества функционирования СПЦ.

Учет условий заблаговременности предупреждений при оценке вероятностей ошибок СПЦ привел к появлению в соответствующих формулах весовых коэффициентов вида (1.13). Величина первого из них q(i,l), определяет априорную вероятность того, что, при произвольном положении источника, тревожное сообщение о цунами поступит в пункт і незаблаговременно. Случаи, когда такая возможность реализуется, и будут источником неизбежных ошибок СПЦ. Конкретные значения этого коэффициента для каждого из прикрываемых пунктов, возможно, являются важным показателем опасности цунами на соответствующих участках побережья, при условии, СПЦ функционирует. (Когда она не функционирует, q(i,1) = 1).

Коэффициент q(i,2) имеет смысл вероятности случая, когда качество работы СПЦ будет совпадать с «теоретическим» качеством сейсмологического метода прогноза цунами.

Наконец, коэффициент q(i,3) имеет смысл вероятности случая, когда прогноз цунами может осуществляться с использованием как сейсмологической так и гидрофизической информации, то есть наиболее надежно.

В соответствии со сказанным со сказанным, основным источником ошибок СПЦ будут события, происходящие в пределах сейсмической и гидрофизической зон молчания прикрываемых населенных пунктов. При фиксированной конфигурации наблюдательных подсистем (сейсмической и гидрофизической) эти зоны молчания могут быть построены и изучены заранее, что будет способствовать определению направлений дальнейшего совершенствования СПЦ.

1.3. Эффективность работы СПЦ, как ее "коэффициент полезного действия"

Рассмотренные выше критерии качества работы СПЦ, оцениваемые с учетом заблаговременности предупреждений, не зависят от "реальной пользы", получаемой потребителем прогнозов. Представляется важным ввести такую, учитывающую полезность для потребителя, характеристику качества работы СПЦ - ее *действенность* или эффективность. При определении этого понятия применительно к СПЦ мы существенно использовали идею сравнения результатов ее действия со случаем, когда она не функционирует (отсутствует). Пусть A(i,n) есть некоторая величина, характеризующая предполагаемый ущерб, который могла бы нанести волна цунами в пункте i, возникшая вследствие землетрясения n, в отсутствие СПЦ, а величина a(i,n) - тот же ущерб, но в случае, когда СПЦ существует и функционирует. Тогда величина

$$R(i,n) = \frac{A(i,n) - a(i,n)}{A(i,n)}$$
(1.15)

будет характеризовать *относительный предотвращенный* в результате действий СПЦ, местных властей и населения *ущерб* при единичном землетрясении. Такого типа величины мы и предлагаем в дальнейшем именовать эффективностью или коэффициентом полезного действия СПЦ.

Дальнейшие обобщения этого понятия на различные ансамбли событий очевидны. Эффективность СПЦ по отношению к населенному пункту і за интервал времени Т, в течение которого произошло N землетрясений, по которым СПЦ приняты ответственные решения, будет характеризовать величина

$$R(i) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} R(i, n).$$
(1.16)

Эффективность СПЦ по отношению ко всей зоне ее ответственности за интервал Т будет характеризовать величина

$$R = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^{i=I} R(i).$$
(1.17)

Очевидно, что необходимо различать эффективность СПЦ по отношению к сохранению человеческих жизней или *социальную эффективность* и по отношению к сохранению различных хозяйственных объектов или экономическую эффективность, так как стоимость человеческой жизни не всегда может быть выражена в денежных единицах. В первом случае фактический и предотвращенный ущерб необходимо оценивать как соответствующие *риски* (гибели). Во втором можно пользоваться оценками соответствующих экономических ущербов.

Введенные понятия социальной и экономической эффективности позволяют оценивать в относительных единицах предотвращенного ущерба реальную полезность деятельности СПЦ по отношению к отдельному населенному пункту и к зоне ответственности в целом, в различные интервалы времени, а также сравнивать эффективности разных СПЦ.

1.4. Риск при цунами и социальная эффективность СПЦ.

Риск или потенциальный риск определяется как вероятность гибели от воздействия некоторого неблагоприятного фактора в течение определенного интервала времени. Можно предложить следующую схему оценки цунами-риска. Будем полагать, что максимальная угроза жизни при цунами, как, впрочем, и угроза различных разрушений и нанесения ущерба, создается потоком воды, образующимся на "сухом" берегу при накате (и откате) волны цунами на берег в течение периода волны отсчитываемого от момента пересечения ею невозмущенного уреза воды, когда высота ее максимальна. При этом она существенно зависит от высоты потока h.

Независимо от того, из скольких периодов состоит конкретный волновой цуг цунами, он не будет представлять непосредственной опасности для человека, если максимальная его высота не будет превышать первых двух-трех десятков сантиметров. Некоторый урон здоровью может быть нанесен опосредованно, благодаря охлаждению организма и возможной благодаря этому простуде, однако, в дальнейшем мы будем пренебрегать такой возможностью. Критическая ситуация возникает тогда, когда человек уже не в состоянии удержаться на ногах в набегающем потоке и вынужден плыть. Примем, что соответствующая критическая глубина потока $h^* = 1$ м. (Каждый, кто бывал в экспедициях или в туристических походах, знает, что при переходе вброд через небольшие горные или таежные речки, бывает трудно, но возможно, удержаться на ногах, когда обе ноги погружаются по колено, на глубину около 0.5 метра и практически невозможно удержаться на ногах, погрузившись в воду по пояс, на глубину около 1 метра, даже при очень малых скоростях течения). При больших глубинах ситуация качественно меняется мало: умеющий плавать и не растерявшийся человек плывет, не умеющий плавать или растерявшийся - начинает тонуть на любой глубине, превышающей 1 м. Реальная опасность для жизни, конечно, возрастает, но не так сильно, как можно было бы ожидать. В силу приведенных рассуждений, по-видимому, допустимо представить цунами-риск при единичном цунами как функцию глубины потока на берегу в виде ступенчатой функции Хевисайда

$$H(h-h^*) = \frac{0, h-h^* < 0}{1, h-h^* \ge 0},$$
(1.18)

где: h = η 0-hh, η 0- высота волны на урезе воды и hh - средняя высота населенного пункта над уровнем моря (гипсометрическая отметка населенного пункта).





Значит риск при единичном цунами, в зависимости от высоты потока, создаваемого цунами на берегу, можно представить формулой P(h)=H(h-h*). Сказанное иллюстрирует рис 2.

Пусть, далее, Q(i, η_0) есть интегральная функция распределения вероятности подхода хотя бы одной волны цунами к населенному пункту і с высотой, равной или большей η_0 , в течение длительного интервала времени Т (закон повторяемости цунами вблизи пункта i). Тогда значение этой функции для $\eta_0^* = h^* + hh$ определит искомый безусловный (при отсутствии СПЦ) цунами-риск в населенном пункте i (в течение интервала времени Т)

$$P(i) = Q(i, \eta_0^{*}). \tag{1.19}$$

"Условный" риск (при условии, что СПЦ функционирует) будет равен произведению $\beta(i)P(i)$. Здесь и ниже мы будем полагать, что вероятности ошибок СПЦ оценены с учетом условий заблаговременности по формулам (1.14). Тогда социальная эффективность СПЦ по отношению к пункту і в соответствии с формулой (1.15).

$$Rr(i) = \frac{P(h^*) - \beta(i)P(h^*)}{P(h^*)} = 1 - \beta(i).$$
(1.19)

Согласно последнему выражению, социальная эффективность СПЦ по отношению к населенному пункту і, численно равна вероятности заблаговременного и правильного предупреждения о цунами (оправдываемость прогноза относительно) этого пункта. Важной в практическом отношении может оказаться сама величина цунами-риска P(i), оцененная индивидуально для каждого прибрежного населенного пункта в зоне ответственности СПЦ. Районирование побережья по этой величине может быть полезно при планировании его освоения.

1.5. Экономическая эффективность СПЦ

Ниже мы будем полагать, что в каждом населенном пункте тем или иным путем могут быть оценены следующие виды экономического ущерба, связанные с явлением цунами и действиями СПЩ (индекс і для сокращения записи опускаем):

Am - средний за интервал времени T ущерб от одного цунами при отсутствии СПЦ (эта величина также будет ущербом от цунами в случае, когда действующая СПЦ совершит ошибку - пропуск цунами, как составная часть этого вида ущерба здесь должна быть учтена и страховая стоимость жизни и здоровья попавших под воздействие цунами людей);

Ain - средний неизбежный ущерб от цунами (то есть такой, который возникает при цунами независимо от действий СПЦ вследствие разрушения и повреждения не эвакуируемых объектов, находящихся в зоне вероятного воздействия цунами, а так же вследствие гибели и ущерба здоровью людей, ущерба движимому имуществу из-за невозможности заблаговременной их эвакуации).

Aw - стоимость мероприятий по тревоге цунами (не зависящая от того, оправдывается она или нет), то есть прямые расходы на эвакуацию и ущерб от простоя промышленных предприятий, вызванного ею.

Тогда условный ущерб (то есть ущерб от цунами, возникающий *при условии*, что СПЦ функционирует) за интервал времени Т от всех N1 не цунамигенных, и N2 цунамигенных землетрясений, зарегистрированных СПЦ, выразится как сумма следующих величин: n2 Am - ущерб от пропущенных цунами, (N2-n2)·Ain - неизбежный ущерб от цунами, о которых было выдано истинное и заблаговременное предупреждение, и (N2n2+n1) Aw - суммарная стоимость эвакуационных мероприятий по всем выданным тревогам. В результате получим

$$Acd = n2 \cdot Am + (N2 - n2) \cdot Ain + (N2 - n2 + n1) \cdot Aw$$

$$(1.20)$$

или, учитывая связь численностей n1, n2, N1, N2 с вероятностями ошибочных решений α, β, δ,

$$Acd = \beta \cdot N2 \cdot Am + (1 - \beta) \cdot Ain + [(1 - \beta) \cdot N2 + \alpha \cdot N1] \cdot Aw.$$
(1.20a)

Положив в (1.20a) α=0 и β=1, что соответствует случаю отсутствия СПЦ (тревоги не подавались, следовательно и ложных трвог не было, и все цунами оказались пропущенными), безусловный, при отсутствии СПЦ, ущерб

$$Apd = N2 \cdot Am \tag{1.21}$$

Разность Ae = Apd - Acd есть ущерб от цунами в рассматриваемом населенном пункте, предотвращенный в результате действий СПЦ. Подставляя в формулу (1.15) выражения для Apd и Acd из (1.20), (1.21) и произведя необходимые упрощения с учетом (1.10 - 1.12) получим выражение для экономической эффективности СПЦ:

$$\operatorname{Re} = (1 - \beta) \cdot \frac{Ae - Aw}{Am} - \alpha \cdot \frac{N1}{N2} \cdot \frac{Aw}{Am}$$
(1.22)

Первое из слагаемых в правой части (1.22) есть относительный ущерб, *предотвращенный в результате действий СПЦ* в отдельном населенном пункте при единичном цунами за вычетом стоимости эвакуационных мероприятий при единичной (оправдавшейся) тревоге, второе - стоимость эвакуационных мероприятий по всем ложным тревогам, отнесенная к числу цунамигенных землетрясений.

Эта формула наглядно демонстрируют то обстоятельство, что экономическая эффективность СПЦ определяется воздействием нескольких (трех) независимых факторов. Соответственно, в ней можно выделить три группы величин.

Во-первых, это число N2 (отношение N2/N1) цунамигенных землетрясений, происшедших в регионе ответственности СПЦ в течение фиксированного интервала времени Т - величина, характеризующая «цунамиактивность» этого региона. Это - природно-географический фактор. (При этом не следует забывать, что величина N1 - число нецунамигенных землетрясений, по которым СПЦ принимает *ответственное* решение, зависит и от конкретной технологии ее работы, и, следовательно, зависит также и от научно-технического фактора).

Во-вторых, это вероятности ошибочных решений α и β - «технические» параметры СПЦ - отражают воздействие, прежде всего, научно-технического фактора. (При этом не следует забывать о влиянии на них и географического и культурного факторов, что было показано выше).

Третья группа величин - суть экономические показатели ущерба.

Неизбежный ущерб это ущерб, наносимый цунами после того, как на *предупре*жденном о предстоящей катастрофе побережье выполнена эвакуация населения и движимого имущества.

Величина неизбежного ущерба Ain зависит прежде всего от качества строительства капитальных объектов, технологически привязанных к урезу воды (портовые сооружения, водозаборные сооружения атомных электростанций, оконечные пункты приема сырья и сдачи продукции рыбозаводов) и от того, применены ли специальные цунамизащитные мероприятия, выполняется ли общее требование о выносе из цунамиопасных зон побережья объектов, технологически не связанных с урезом воды, а так же от возможности быстрой эвакуации в безопасные места прежде всего людей, а также морских и сухопутных транспортных средств и других объектов движимого имущества. Потенциальный ущерб Apd всегда включает в себя Ain, так как он возникает вследствие цунами, о котором не получено заблаговременного предупреждения. Таким образом, Apd ≥ Ain, и величина их разности определяется, прежде всего, действием культурного и, во вторую очередь, - географического факторов.

Стоимость эвакуационных мероприятий Aw определяется, в основном, действием культурного фактора.

В случае идеально работающей СПЦ и при условии, что сейсмическая и гидрофизическая зоны молчания населенного пункта не содержат вероятных источников цунами, экономическая эффективность

$$\operatorname{Re}(\alpha = \beta = 0) = \frac{Ae - Aw}{Am}$$
(1.23)

Только случае, когда опасность цунами может быть сознательно учтена местными властями, и при благоприятных географических условиях, экономическая эффективность СПЦ достигнет своего максимального "теоретического" значения, равного 1, когда отношения (Ae/Am) \rightarrow 1 и (Aw/Am) \rightarrow 0. Если же местная администрация полностью пренебрегает опасностью цунами, возможен случай, когда Ain = Apd (Ae=0). Тогда экономическая эффективность достигнет своего минимального (отрицательного) значения, равного по модулю отношению стоимости эвакуации по тревоге цунами к среднему потенциальному ущербу от одного цунами (при отсутствии СПЦ). Когда Re<0, возникает как раз тот случай, когда действия работающей без ошибок СПЦ будет наносить экономический ущерб.

Из (1.22) легко получается условие эффективной работы СПЦ (когда Re>0):

$$Ae - Aw > \frac{\alpha}{1 - \beta} \bullet \frac{N1}{N2} \bullet Aw, \qquad (1.24)$$

означающее, что средний за интервал времени Т относительный предотвращенный ущерб от одного цунами, за вычетом расходов на проведение эвакуации, должен быть больше суммарной (за интервал Т) стоимости мероприятий по ложным тревогам цунами, отнесенной к числу случаев *предсказанных* цунами. Смысл формулы (1.24) становится совершенно прозрачным, если положить в ней $\alpha = \beta = 0$ (идеально работающая СПЦ). В этом случае СПЦ будет работать экономически эффективно, если средний предотвращенный ущерб при единичном цунами окажется больше расходов на эвакуацию по тревоге.

При определении экономической эффективности СПЦ нами никак не учитывались расходы на ее создание, модернизацию и эксплуатацию, так как хотелось выделить в чистом виде ее экономическую *полезность* и этим ограничиться. Анализ указанных расходов привел бы к появлению нового понятия, которое указывало бы на экономическую *целесообразность* ее создания и (или) модернизации. Рассмотрение подобных вопросов далеко выходит за рамки нашей компетенции. Фактически же указанный учет привел бы к появлению в правой части выражения (1.20) дополнительного слагаемого - соответствующих средних затрат (отнесенных к числу N = N1 + N2 событий), что, в свою очередь, привело бы к дополнительному уменьшению величины Re.

1.6. Выводы

Попытка учесть при оценке качества функционирования СПЦ условия заблаговременности предупреждения о цунами приводит к представлению о сейсмической и гидрофизической зонах молчания и зоне уверенного прогноза СПЦ в акваториях, примыкающих к каждому из прикрываемых ею населенных пунктов. Упомянутые зоны молчания, если их пересекает зона вероятных источников цунами, являются основным источником ошибок СПЦ. Наиболее тяжелыми могут оказаться *неизбежные* ошибки, связанные с незаблаговременной доставкой предупреждения о цунами в тот или иной населенный пункт от источников, пересекающих сейсмическую зону молчания какихлибо населенных пунктов. Такой случай мы будем в дальнейшем называть неблагоприятной ситуацией.

Строгий учет заблаговременности тревожных сообщений, получаемых в каждом населенном пункте требует перехода к адресной их подаче только в те пункты, которые реально подвергаются опасности цунами с указанием степени опасности. Последнее требует уточнения понятия "опасное цунами."

Адресная подача тревожных сообщений влечет за собой усложнение способов оценки критериев качества работы СПЦ. При этом становится явным то обстоятельство, что реальная безопасность населения и хозяйства в прибрежной полосе определяется отнюдь не только действиями СПЦ (технологический фактор), но и влиянием географического и культурного факторов. Другими словами, реальная безопасность при цунами может быть достигнута лишь совместными усилиями СПЦ и местных административных органов.

Этот вывод следует и из анализа формул для оценки экономической и социальной эффективности СПЦ, как ее "коэффициента полезного действия".

Представление о зонах молчания позволяет конкретизировать основные направления дальнейших исследований, в какой-то мере обозначенных и в данной книге. К ним необходимо отнести следующие направления.

Исследование сейсмических зон молчания, определение вероятности возникновения неблагоприятной ситуации (незаблаговременного предупреждения) для каждого из прикрываемых населенных пунктов. По существу это должно быть районирование прикрываемого СПЦ побережья по заблаговременности получаемых на нем предупреждений о цунами.

Исследование возможностей уменьшения времени Ts (Tres) за счет упрощения (огрубления) алгоритма принятия решения в неблагоприятной ситуации.

Исследование гидрофизических зон молчания для существующей расстановки уровенных станций и поиск рациональной (оптимальной) их расстановки, минимизирующей площади пересечения гидрофизических зон молчания и цунамигенной зоны.

Поиск резервов повышения информативности сейсмического (магнитудного) - самого быстрого метода прогноза цунами - за счет более полного использования априорной информации.

Поиск более быстрых, по сравнению с существующими, алгоритмов гидрофизического прогноза цунами.

Глава 2 Некоторые свойства полей времен пробега цунами и их разностей

В настоящей главе описываются некоторые *геометрические* свойства изолиний полей времен пробега цунами и их разностей от точечных источников в бассейнах простейшей формы, на основании которых строится примерная стратегия анализа размещения сейсмических и уровенных станций СПЦ с позиции достаточной заблаговременности предупреждения о цунами. Это позволяет также создавать более или менее рациональные планы размещения станций измерения уровня океана в условиях реальных акваторий. В общем случае, при достижении данной цели, необходимо учитывать конкретные технические характеристики уровенной станции; затраты на ее установку, а значит, удаленность станции от берега и глубину, на которой она ставится; гидрометеорологические условия района постановки, влияющие на ее живучесть; конфигурацию зоны вероятных источников цунами и, возможно, многие другие факторы. В таком, достаточно полном объеме, задача об оптимальной расстановке уровенных станций (например, в смысле минимизации ущерба от незаблаговременных прогнозов и совокупных затрат на установку и эксплуатацию станций) при произвольной батиметрии становится малодоступной для исследования с помощью математических методов.

По-видимому, следует начинать с максимально упрощенной задачи, чтобы попытаться решить ее аналитически, а, затем уже, учитывая полученные результаты, пытаться обобщать их на более сложные случаи. Такое упрощение достигается здесь за счет перехода к простейшим моделям бассейна (с горизонтальным и наклонным плоским дном) и рассмотрения простейшей задачи об установке одной уровенной станции, обеспечивающей минимальную площадь гидрофизической зоны молчания для одного населенного пункта. Наиболее полно и строго поля времен пробега и разности времен пробега цунами до пары точек, их экстремальные свойства в бассейнах с плоским горизонтальным, наклонным и "полосовым" дном уже проанализированы [Бернштейн, 1992]. Значительная часть приводимых ниже результатов содержится в цитированной работе, и, тем самым, они как бы получают независимое подтверждение. Это позволяет нам описывать их кратко, не углубляясь в достаточно трудные для понимания математические тонкости обсуждаемых задач.

Рассчитывая времена *пробега* от некоторых точек, мы в то же время получаем информацию о временах *добегания* цунами до этих точек, что возможно в силу *кине-матического принципа взаимности*, формулировка которого тривиальна: время пробега цунами из точки А (источник) в точку В (приемник) тождественно равно времени пробега из точки В (источник) в точку А (приемник). Это утверждение эквивалентно следующему: фронт волны цунами, соответствующий фиксированному времени *пробе*-

га Т из точки А, как источника, есть геометрическое место таких источников цунами, время *добегания* волны из которых до точки А равно Т.

Менее очевидно, но также справедливо следующее утверждение: разность времен пробега цунами из точек A и B (источники) в точке C (приемник) тождественно равна разности времен добегания цунами в точки A и B (приемники) из точки C (источник). Это эквивалентно утверждению, что изолиния фиксированной разности времен *пробега* цунами бT от точек A и B представляет собой геометрическое место источников цунами разность времен *добегания* от которых до точек A и B равна бT. В силу этого утверждения, вычисляя разности времен пробега цунами от выбранной пары точек (источников) мы получаем информацию о разностях времен добегания до этой пары точек (как приемников).

2.1. Оптимальная установка гидрофизической станции в бассейне с плоским горизонтальном дном

Пусть в плоском бассейне постоянной глубины H, где скорость распространения цунами есть $V = \sqrt{gH}$, задана точка береговой линии P, которую мы будем отождествлять с населенным пунктом.



Рис 3. Схема, иллюстрирующая построение границы гидрофизической зоны молчания СПЦ для времени **T** в окрестности пункта **P** и станции в точке **F** в бассейне постоянной глубины.

Предположим для простоты, что минимальная временная дистанция необходимой заблаговременности - Ts=Th=T, тогда сейсмическая зона молчания (см. Главу 1) будет представлять собой часть круга, ограниченного береговой линией, с радиусом R = VT.

Пусть, далее, в точке F (см рис 3) на фиксированном расстоянии L от P установлена гидрофизическая станция. Рассмотрим геометрическое место точек, обладающее тем свойством, что разность времен добегания цунами до населенного пункта P и места установки гидрофизической станции F, от каждой из них есть величина постоянная и равна T. Такое геометрическое место, очевидно, есть гипербола с фокусами в точках P и F, так как постоянство разностей времен добегания T от текущей точки гиперболы до выбранных точек влечет за собой постоянство разности R = VT соответствующих расстояний. Эта гипербола и будет границей гидрофизической зоны молчания СПЦ (состоящей из одной гидрофизической станции в точке F), принадлежащей пункту P.

В декартовой системе координат XOY с центром, расположенным на середине отрезка PF, и осью OX, направленной вдоль него, уравнение рассматриваемой гиперболы примет канонический вид:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1,$$
(2.1)

где

$$a = \frac{VT}{2} = \frac{R}{2},$$

$$b^{2} = c^{2} - a^{2},$$

$$c = \frac{L}{2}.$$

(2.2)

Для частного случая береговой линии, представленной единственной точкой Р (маленький остров), поле разностей времен добегания до точек Р и F представляется семейством софокусных гипербол с параметром $-1 \le \frac{a}{c} \le 1$. Пример такого семейства показан на рис.4.

Перечислим основные свойства этого семейства, в нашем случае очевидно вытекающие из геометрических свойств гиперболы, но которые по крайней мере частично сохраняются при переходе к более сложным типам формы дна бассейна.

Имеет место пространственная симметрия изолиний разностей времен добегания. Изолинии положительной разности времен добегания до рассматриваемых точек (положим для определенности, что в этом случае точка F - станция - первой фиксирует вступления волны цунами), соответствует изолиния равной по модулю отрицательной разности (когда в пункте P вступление цунами регистрируется раньше чем в F), и это просто две разные ветви одной и той же гиперболы. Ось симметрии (ось Oy на рис 4) одновременно является изолинией нулевой разности времен пробега. При переходе к более сложным формам рельефа дна пространственная симметрия, изолиний разности, конечно, не сохраняется, но остается симметрия самих разностей в бассейне с любым дном.



Рис 4. Изолинии разностей времен пробега от двух фиксированных точек для различных значений параметра $\frac{a}{c}$ пропорционального величине разности времен добегания цунами до точек P и F (формула (2.2)).

Каждая изолиния симметрична также относительно центрального луча, исходящего из F и проходящего через P. Максимальное по модулю значение разности не превышает времени пробега цунами от точки F до точки P, и достигается оно в нашем случае (когда $a=\pm c$) для источников, располагающихся на оси OX справа от точки F и слева от точки P вплоть до $x \rightarrow \pm \infty$.

В полярной системе системе координат (р, ф) с началом в Р и полярной осью, проходящей через F, уравнение границы гидрофизической зоны молчания (гиперболы (2.1)) примет следующий вид

$$\rho = \frac{L^2 - R^2}{2(L\cos\varphi - R)} = R \frac{e^2 - 1}{2(e\cos\varphi - 1)}$$
(2.3)

где: $e = \frac{L}{R} \ge 1$ - эксцентриситет гиперболы.

Когда е = 1 (и, следовательно L=R), ветви гиперболы смыкаются на полярной оси (оси Ох на рис 4), и она вырождается в луч, выходящий из точки F в сторону возрастания ρ , совмещенный с полярной осью. В этом случае заблаговременность T достигается только для источников располагающихся только на этом луче. Поэтому гидрофизическая станция, обеспечивающая прогноз цунами в пункте P с заблаговременностью T

или больше, должна устанавливаться за пределами принадлежащей ему сейсмической зоны молчания.

Из формулы (2.3) легко получаем минимальное расстояние от населенного пункта до границы гидрофизической зоны молчания (в (2.3) полагаем ф=0)

$$\rho_{\min} = R \frac{e+1}{2}.\tag{2.4}$$

Из свойств гиперболы (2.1) также следует, что время

$$T_{\max} = \frac{L}{V} \tag{2.5}$$

составляет максимальную заблаговременность предупреждения о цунами по данным $\Gamma \Phi C$, установленной на удалении L от населенного пункта, достижимую для источников, находящихся за на полярной оси за пределами сейсмической зоны молчания.

Площадь гидрофизической зоны молчания, ограниченная гиперболой (2.1, 2.3) и береговой линией, может быть конечной лишь в случае, если акватория, примыкающая к P, заключается в пределах угла $\Phi < \pi$ с вершиной в P. Если, при этом, мы устремим точку F к границе сейсмической зоны молчания (это равносильно стремлению эксцентриситета гиперболы (2.1, 2.3) к единице), то указанная площадь будет неограниченно возрастать. Аналогичная картина, очевидно, будет иметь место и при неограниченном удалении точки F от точки P (стремлении расстояния L и эксцентриситета е к бесконечности). Приведенные соображения подсказывают нам, что в пределах рассматриваемой акватории должно существовать положение точки F (положение гидрофизической станции), при котором площадь гидрофизической зоны молчания становится минимальной. Если положить, что возникновение цунами с равной вероятностью возможно в любой точке акватории, то именно при этом (оптимальном) положении уровенной станции вероятность получения в пункте P заблаговременного предупреждения о цунами будет максимальной.

На рис 5 приведены зависимости отношения площади гидрофизической зоны молчания к величине a^2 при различных значениях k=tg($\Phi/2$), указанных на рисунке, от эксцентриситета гиперболы, которые демонстрируют существование вышеупомянутого минимума. Нетрудно видеть, что, при фиксированном значении a, площадь ГЗМ тем больше, чем больше угол Φ .

Теперь, исходя из вышесказанного, можно строго сформулировать задачу оптимального расположения одной гидрофизической станции. по отношению к одному населенному пункту

В пределах угла Φ<π с вершиной в точке Р отыскать положение фокуса F гиперболы (2.3), обеспечивающее минимум площади криволинейного треугольника, ограниченного сторонами этого угла и гиперболой. Другими словами, требуется отыскать соответствующие (решающие поставленную задачу) направление полярной оси, проходящей через фокус F относительно сторон угла Ф и положение на ней точки F (расстояние между точками P и F).



Рис 5. Графики зависимости отношения площади гидрофизической зоны молчания к величине a^2 от $e = \frac{L}{R}$ (эксцентриситета гиперболы) и $k = tg\Phi$, где Φ - угол с вершиной в населенном пункте P.

Исследование этой задачи было выполнено по нашей просьбе В.А. Терлецким и Н.И. Пекуровой из Иркутского университета для бассейнов с плоским горизонтальным и наклонным дном и этими результатами мы, с глубокой благодарностью, воспользовались в настоящем и следующем разделах. Ими, в частности, строго показано, что, при произвольном фокусном расстоянии L, искомый минимум площади достигается, когда полярная ось координат направлена вдоль биссектрисы угла Ф.

Наиболее просто аналитическое решение задачи об оптимальном фокусном расстоянии, при симметричном относительно полярной оси сторон угла Ф, удается получить лишь приближенно, рассматривая вместо криволинейного прямолинейный треугольник РАМ (рис 3), площадь которого равна

$$S_{PAM} = \frac{(L^2 - R^2)(L + R)\sin\frac{\Phi}{2}}{8(L\cos\frac{\Phi}{2} - R)}.$$
 (2.6)

Заметим, что *S*_{*PAM*} составляет, приближенно, половину площади гидрофизической зоны молчания.

Эта площадь достигает минимума при единственном значении фокусного расстояния

$$L^{*} = R \frac{3 + \cos\frac{\Phi}{2} + \sqrt{(7\cos\frac{\Phi}{2} + 9)(1 - \cos\frac{\Phi}{2})}}{4\cos\frac{\Phi}{2}}.$$
 (2.7)

Как показывают расчеты на ЭВМ, относительное отклонение приближенного значения L^* , вычисленного по формуле (2.6), от истинного, найденного путем численного решения задачи для криволинейного треугольника РАМ, находится в пределах 5%, а относительное расхождение площадей соответствующих треугольников не превышает 1%. Это позволяет, при необходимости, использовать соответствующие формулы для оценочных расчетов.

На рис 6 показаны формы границы гидрофизической зоны молчания при трех вариантах расположения станции измерения уровня на биссектрисе угла Φ : на оптимальном расстоянии от P в точке F, на расстоянии, несколько меньшем оптимального, в точке F₁, и на расстоянии, несколько большем оптимального, в точке F₂. Отрезок гиперболы MM' соответствует оптимальному расположению станции. Непоименованный отрезок в верхней полуплоскости чертежа соответствует положению станции в точке F₁, а аналогичный отрезок в нижней полуплоскости чертежа соответствует положению станции в точке F₂. Знаки + и - указывают, соответственно, на увеличение или уменьшение общей площади ГЗМ при перемещении станции из точки F в точку F₁ и F₂. Видно, что суммарная площадь при этом увеличивается в обоих случаях.

Анализируя вышеприведенные формулы нетрудно заметить, что площадь гидрофизической зоны молчания, минимальное расстояние от населенного пункта до ее границы, расстояние от пункта до станции растут с ростом Ф. То есть, чем шире раствор угла, вмещающий акваторию, примыкающую к населенному пункту, тем дальше от населенного пункта должна располагаться уровенная станция и тем обширнее будет зона молчания.

Отметим еще раз, что найденный минимум площади ГЗМ достигается при симметричном расположении ее морской границы (гиперболы (2.1, 2.3)) относительно оси O_x, а, следовательно, при расположении станции F на этой оси.



Рис. 6. Форма границы ГЗМ при трех различных положениях уровенной станции в точках F, F₁ и F₂.

Рассмотрим теперь случай, когда населенный пункт располагается на острове, настолько малом по сравнению с радиусом R сейсмической зоны молчания, что его можно представить в виде точки. Из предыдущего материала следует, что для обеспечения замкнутой зоны молчания вокруг такого острова необходимо не менее трех уровенных станций, чтобы обеспечить выполнение условия $\Phi < \pi$ для каждой из них. Располагая их в вершинах правильного многоугольника (число вершин и сторон такого многоугольника должно быть, очевидно, равно числу станций) с центром в P, на оптимальных расстояниях мы получим замкнутую совместную зону их молчания в виде правильного криволинейного многоугольника с числом сторон, совпадающим с числом станций. Каждая из них минимизирует часть площади зоны молчания в "своем" секторе, где она должна начать регистрацию цунами раньше других. Следовательно, все вместе они должны обеспечить минимальную площадь объединенной зоны молчания при заданном числе станций.

Площадь объединенной ГЗМ при фиксированном времени Т и оптимальной установке каждой станции будет тем меньше, чем больше станций участвует в прикрытии пункта, совпадая, в пределе при $M \rightarrow \infty$, с площадью СЗМ.

Описанный выше простейший пример с использованием многих уровенных станций для прикрытия одного пункта подсказывает нам полезный прием анализа времен
добегания цунами и их разностей, реализованный в комплексе программ ANI (см.часть 2).

Пусть tP - время пробега цунами до населенного пункта и tj - времена пробега цунами до каждой из j=1,2,...,М уровенных станций. Как видно из вышеприведенных рассуждений, для построения границы совместной гидрофизической зоны молчания, образуемой этими станциями, для выбранного населенного пункта нет необходимости анализировать все попарные разности времен добегания до них в каждой точке бассейна, а достаточно рассмотреть только одну разность tP-tjmin, где tjmin - минимальное по j=1,2,...,М время для текущей точки бассейна.

Волна от источников из области бассейна, в которой для фиксированного ј время tj минимально, будет зарегистрирована на станции j раньше, чем на остальных. Естественно назвать такую область областью минимального времени добегания до станции j или областью (районом) ответственности j-той станции. Вся акватория, таким образом, разделится на M таких областей, по числу станций измерения уровня. В случае бассейна постоянной глубины форма и размеры таких областей определяются только их взаимным расположением. В частном случае расположения станций в вершинах правильного многоугольника с центром в населенном пункте, они будут представлять собой секторы с углом при вершине $\Phi=2\pi/M$, расходящиеся от населенного пункта, а сами станции будут располагаться на биссектрисах этих секторов.

В реальном бассейне их форма будет определяться также еще и конкретной топографией его дна: чем он глубже в окрестности установки станции ј по сравнению с другими, тем обширнее по размерам будет соответствующий район ответственности этой станции при прочих равных условиях. В случае, когда каждая точка его с равной вероятностью может быть источником цунами, легко могут быть выбраны безусловно лучшие места установки уровенных станций из заданной их совокупности. Ими будут те, что имеют наиболее обширные районы ответственности.

Рассуждая подобным образом относительно заданной совокупности населенных пунктов, мы приходим к представлению об областях минимального времени добегания цунами до каждого из них, на которые делится примыкающий к ним реальный бассейн. Населенные пункты, имеющие максимальные площади таких областей могут рассматриваться в качестве возможных мест установки уровенных станций.

2.2. Поля времени добегания и разности времен добегания цунами до пары точек в бассейне с плоским наклонным дном.

Поля времени пробега и разности времен пробега до пары точек в бассейне с плоским наклонным дном, как уже было сказано, строго и очень подробно исследованы в [Бернштейн, 1992]. Здесь мы приводим лишь необходимый минимум сведений, адресуя заинтересованного читателя к цитированной работе. Рассмотрим бассейн с прямолинейной линией берега, совпадающей с координатной осью ОҮ и плоским наклонным дном, так что глубина воды H=kx и скорость распространения волны цунами $V = \sqrt{gH} = \sqrt{gkx}$. Лучи цунами от источника, расположенного в начале координат, представляют собой, как известно [Марчук и др., 1989, В.А. Бернштейн 1992], семейство циклоид с общей начальной точкой (в начале координат), которое может быть представлено в параметрическом виде

$$x(\xi) = R(\xi, t)(1 - \cos \xi), \qquad (2.9)$$
$$y(\xi) = R(\xi, t)(\xi - \sin \xi),$$

где: ξ∈[0,2*π*], t - время пробега волны вдоль луча и R(ξ,t) - радиус циклоиды. Последний определяется из формулы:

$$R(\xi,t) = \frac{gkt^2}{2\xi^2}.$$
(2.10)

Фиксируя время пробега t и полагая его равным T - временной дистанции необходимой заблаговременности, получим параметрические уравнения фронта волны (от источника, расположенного в начале координат) и, одновременно, уравнения границы сейсмической зоны молчания для пункта, расположенного в начале координат:

$$x(\xi) = \frac{gkT^{2}(1 - \cos\xi)}{2\xi^{2}},$$

$$y(\xi) = \pm \frac{gkT^{2}(\xi - \sin\xi)}{2\xi^{2}}$$
(2.11)

Наиболее удаленная от начала координат точка границы сейсмической зоны молчания находится на оси ОХ (ось симметрии зоны). Соответствующее расстояние (назовем его «продольным» диаметром) обозначим *D*1. Максимальный «поперечный» диаметр зоны в направлении, перпендикулярном оси ОХ обозначим *D*2. Эти величины равны, соответственно, $D1 = \frac{gkT^2}{4}$, $D2 = \frac{gkT^2}{\pi}$. Как видно из структуры приведенных выражений, их отношение не зависит ни от параметра бассейна k, ни от параметра фронта T.

В силу трансцендентности выражений для лучей и фронтов, аналитическое выражение для границы гидрофизической зоны молчания - изолинии разностей времен добегания до начала координат и произвольной точки в таком бассейне получено быть не может. Косвенными методами можно установить два главных ее свойства: конечность площади ГЗМ при любом расположении станции относительно населенного пункта на конечном расстоянии от него, и существование единственного минимума этой площади. Указанный минимум достигается при расположении станции на оси ОХ (оси симметрии сейсмической зоны молчания) на расстоянии от населенного пункта в два раза превышающем "продольный" диаметр сейсмической зоны молчания (независимо от наклона дна k и временной дистанции необходимой заблаговременности T). Площадь ее быстро возрастает при любом смещении станции от этой точки как в обе стороны от оси симметрии так и в сторону берега, и медленно растет при удалении ее от берега. При этом зависимость площади гидрофизической зоны молчания от расстояния между населенным пунктом (началом координат) и уровенной станцией (располагаемой на оси Ox) качественно не отличается от подобной зависимости для плоского бассейна, изображенной на рис.5. А именно, эта площадь стремится к бесконечности, когда уровенная станция находится границе сейсмической зоны молчания, по мере удаления станции от нее, быстро достигает минимума (на расстоянии ~2D1), а, затем, площадь ГЗМ начинает медленно расти.

Задача об оптимальном расположении уровенной станции F относительно пункта P, как уже отмечалось, имеет единственное решение, когда уровенная станция располагается на оси симметрии C3M и Г3M (на оси Ox, проходящей через населенный пункт P), в обоих рассмотренных случаях бассейна с плоским горизонтальным и наклонным дном. Указанная ось симметрии совпадает с положением центрального луча цунами, выходящего из точки P, обладающего, в частности, тем очевидным свойством, что время добегания цунами вдоль него T(x,y=0) до произвольной точки M(x,y=0) есть minT(x,y) по y. Очевидно, также, что расстояние до границы C3M (изохроны T=const) в направлении центрального луча будет максимальным. Эти свойства центрального луча, сохраняющиеся при переходе к бассейнам с более сложной конфигурацией дна, позволяют отыскивать луч, близкий к центральному, при численном моделировании цунами в реальных бассейнах, после чего легко отыскивается методом (небольшого числа) проб оптимальное положение уровенной станции относительно населенного пункта на центральном луче.

2.3. Некоторые практические приемы анализа времен добегания цунами и их разностей в реальных бассейнах с точки зрения достаточной заблаговременности доставки тревожного сообщения в населенные пункты.

Из вышеизложенного материала вытекает ряд очевидных приемов анализа времен добегания цунами до населенных пунктов и станций измерения уровня океана и их попарных разностей.

Основной целью такого анализа является, очевидно, выявление и описание возможных случаев *неблагоприятного географического расположения вероятных источников цунами*, при которых тревожное сообщение о цунами, выработанное по данным сейсмических или гидрофизических наблюдений, поступит в те или иные населенные пункты заведомо не заблаговременно, что эквивалентно пропуску цунами. Такие случаи, которые мы далее будем называть *неблагоприятной географической ситуацией*, когда прогноз цунами выполняется по сейсмическим данным, следует квалифицировать как потенциальные пропуски цунами, и их можно выявить и описать априори, как случаи пересечения цунамигенной зоны и сейсмической зоны молчания того или иного населенного пункта. Следовательно, первое, что необходимо сделать в исследуемой реальной акватории, это построить сейсмические зоны молчания СПЦ для всех существующих и проектируемых прибрежных населенных пунктов и других важных объектов и выделить среди них такие, которые имеют обширные площади пересечения с цунамигенной зоной. Это и будут области вероятных источников цунами, которые неизбежно будут пропущены действующей СПЦ.

Полученная информация может стать основанием для таких изменений конфигурации наблюдательной сети и алгоритма работы сейсмической подсистемы, при которых экономилось бы время, затрачиваемое на регистрацию и обработку записи землетрясения при возникновении неблагоприятной географической ситуации. Ход рассуждений при отыскании наивыгоднейшего (с позиции заблаговременности предупреждения о цунами) положения сейсмической станции примерно следующий. Необходимая длительность регистрации и автоматической обработки землетрясения, будет несколько больше времени пробега до точки регистрации максимума поперечной (поверхностной) волны. Последнее будет минимальным, когда регистрация ведется непосредственно в эпицентре землетрясения. Относительного минимума для населенного пункта, не находящегося в эпицентре, оно будет достигать в при организации регистрации самом населенном пункте. Отсюда вывод: сейсмическая станция должна находиться непосредственно в прикрываемом пункте.

Информация о положении и размерах областей пересечений сейсмических зон молчания с цунамигенной зоной может быть полезной для администрации соответствующих населенных пунктов как побудительный мотив для выработки мер по экономии времени, необходимого для эвакуации населения по тревоге. Наконец, построение сейсмической зоны молчания и выяснение, того, как она соотносится с цунамигенной зоной для мест предполагаемого нового строительства должно стать элементом общей оценки долговременной опасности цунами, которая при этом должна выполняться.

Гидрофизическое прикрытие пунктов, имеющих обширные, пересекающиеся с цунамигенной зоной, районы ответственности, практически бесполезно при близком расположении источников. Однако такие пункты могут оказаться весьма подходящими для установки уровенных станций, прикрывающих другие населенные пункты.

Рациональное размещение уровенных станций для гидрофизического прикрытия пунктов, имеющих относительно небольшие СЗМ в пределах цунамигенной зоны, должно, по возможности, отвечать следующим требованиям: уровненные станции

40

должны находиться в непосредственной близости к возможным эпицентрам цунамигенных землетрясений (то есть в пределах цунамигенной зоны; для подобной постановки существует серьезное ограничение, связанное с опасностью разрушения станции при сильном землетрясении), устанавливаться в наиболее глубоких точках акватории (здесь также существует ограничение, связанное с техническими возможностями такой постановки) или вблизи берегов, располагающихся ближе всего к глубоким ее частям и, при этом они не должны попадать ни в одну из СЗМ прикрываемых населенных пунктов. В любом случае точки, выбранные для размещения уровенных станций, должны иметь, по возможности, максимальные размеры районов ответственности.

В необходимых случаях можно попытаться решить задачу оптимального размещения одной или нескольких уровенных станций для прикрытия одного или нескольких близко расположенных населенных пунктов. Минимизировать при этом необходимо лишь часть площади ГЗМ, попадающую в пределы цунамигенной зоны.

В простейшем случае, когда совместная C3M таких пунктов имеет малый по сравнению с характерным размером цунамигенной зоны "продольный" диаметр, а Г3M также целиком размещается в ней, можно ограничиться одной уровенной станцией, ее положение следует искать на центральном луче цунами, выходящем из рассматриваемого пункта на расстоянии несколько меньшем двух "продольных" диаметров от него.

Развитие подсистемы наблюдений СПЦ за уровнем моря с целью использования ее данных для оперативного предупреждения о цунами от близких к прикрываемым населенным пунктам источников с позиции достижения необходимой заблаговременности предупреждения имеет смысл лишь в том случае, когда по данным текущих гидрофизических наблюдений можно оперативно осуществить прогноз высоты цунами у конкретных ближайших участков побережья в первые же минуты после начала землетрясения. К этому времени известны только его координаты и магнитуда. Как показано в главе 5, такой прогноз, по-видимому, возможен.

Глава 3. Заблаговременность предупреждений о цунами в ближней зоне Российской СПЦ.

В данной главе описываются результаты исследования реальных возможностей Российской СПЦ доставлять заблаговременно предупреждения о цунами в прикрываемые населенные пункты в случае близких источников, располагающихся, в ее собственной зоне ответственности. Эта зона включает в себя в качестве подзон (с севера на юг) юго-западный Беринговоморский, Камчатско- Командорский, Курильский и Япономорский сейсмические регионы. По существу исследовалось влияние *географического фактора* на заблаговременность предупреждения о цунами, а, в результате возникли некоторые рекомендации по развитию наблюдательных сетей СПЦ и по уточнению регламента ее работы в тревожном режиме в случае близких источников. Эти рекомендации приводятся в конце главы.

Каждый раздел настоящей главы посвящен одной из названных подзон и построен по следующему общему плану. Вначале приводится батиметрическая карта подзоны ответственности и приводится список прикрываемых населенных пунктов. Затем даются самые общие представления о конфигурации области эпицентров цунамигенных землетрясений (карта эпицентров) и делается попытка, когда это возможно, как-то ее оконтурить. Эта область в дальнейшем принимается в качестве зоны вероятных источников цунами, и, далее исследуется относительное положение и размеры сейсмических зон молчания СПЦ, принадлежащих каждому из населенных пунктов. Из последних выделяются неблагополучные в смысле заблаговременности предупреждения о цунами и определяются районы возможного расположения эпицентров цунамигенных землетрясений, способных создать это неблагополучие. Единственная возможность улучшить ситуацию в неблагополучных населенных пунктах - установить там сейсмическую станцию, которая была бы обязана принимать решение о подаче тревоги цунами самостоятельно в случае регистрации близкого землетрясения из соответствующего опасного района. На этом и базируются те простейшие рекомендации по улучшению работы Российской СПЦ, которые приводятся в заключительном разделе настоящей главы.

Далее исследуется возможность рационального размещения уровенных станций в подзоне и делаются те или иные общие выводы. При этом мы не пользовались специальными приемами теории оптимизации планов, и, в основном, ограничивались рассмотрением случая размещения прибрежных уровенных станций (короткие кабельные линии). Последнее ограничение - отказ от систематического рассмотрения вариантов с автономными станциями открытого моря - связано и с проблематичностью их практического использования в составе Российской службы предупреждения о цунами, а также с тем, что, как мы увидим далее, использование их для раннего предупреждения о цунами от близких источников оказывается малоэффективно в зоне ответственности Российской СПЦ.

Максимальное время обработки сейсмического сигнала в случае близкого землетрясения в Российской СПЦ не должно превышать 10 минут с момента начала регистрации землетрясения и до момента начала передачи тревожного (о цунами) сообщения в каналы связи. Нормативное время доставки его потребителям составляет 2 минуты. Сколько времени требуется на эвакуацию населения в каждом населенном пункте, получившем предупреждение, нам неизвестно. Здесь мы полагаем что минимальная достаточная для эвакуации заблаговременность предупреждения о цунами составляет 15 минут при готовности средств и мест эвакуации. В результате мы получаем некое минимальное время пробега цунами до населенного пункта - 27 минут, при котором СПЦ еще будет в состоянии доставить в населенный пункт заблаговременное тревожное сообщение. Это время можно было бы назвать иначе временной дистанцией заблаговременности (между населенным пунктом и источником цунами) или временной дистанцией безопасности. В те населенные пункты, до которых волна цунами добежит за время, меньшее 27 минут, тревога поступит не заблаговременно. Это, обеспечивающее заблаговременное предупреждение, минимальное время пробега цунами и будет использоваться нами при определении границ сейсмических зон молчания конкретных населенных пунктов.

3.1. Юго-западный беринговоморский сейсмический регион.

На побережье Камчатки, примыкающем к Берингову морю, а также к Тихому океану располагается довольно много мелких населенных пунктов и других объектов, список и координаты которых любезно предоставлен Камчатским областным управлением Гидрометеослужбы (Ю.А. Заякин). Список пунктов, находящихся на побережье Берингова моря, вместе с координатами ближайших к ним точек акватории приводится в таблице 1.

Таблица 1.

N⁰	Наименование пункта	Широта	Долгота	Глубина
ПП		морской точки	морской точки	воды, м
		(C)	(B)	
		o / //	o / //	
1	ГМС мыс Африка	56 16 25	163 19 47	31
2	Рыбозасольная сезонная база в	57 20 14	162 54 35	13
	устье реки Озерная			
3	ГМС мыс Озерной (устье реки	57 42 09	163 16 46	33
	Ольховая)			
4	Село Ука	57 55 04	162 08 31	6
5	Село Хайлюля	58 08 54	162 00 00	8
6	Село Ивашка	58 32 47	162 16 03	7
7	Село Панкара	58 35 55	162 20 45	7
8	Село Дранка	58 45 18	162 34 51	2
9	Село Макарьевское	58 51 32	162 44 15	1
10	Село Кострома	59 10 07	163 12 27	6
11	Поселок Оссора (ГМС)	59 18 00	163 05 07	0
12	Села Нагорный и Тымлат	59 29 35	163 13 12	2
13	Село Красный и рыбоконсерв-	59 47 10	163 30 41	5
	ный завод в устье реки Кичига			
	Село Анапка	59 56 14	163 44 47	5
14	Поселок Ильпырский и	59 58 12	164 16 57	2
	рыбозавод			
15	Село Ольховая	60 04 13	164 26 21	6
16	Село Песчаное	59 54 09	164 39 42	3
17	Рыбозавод на мысе Ильпырский	59 44 02	164 53 03	25
18	Село Гека	60 04 30	165 15 14	0
19	Село Вывенка	60 08 09	165 30 39	11
20	Село Медвежка	60 17 07	165 44 45	3
21	Село Олюторка	60 18 26	166 06 11	6
22	ГМС бухта Лаврова	60 19 21	167 05 47	7
23	Поселок Пахача	60 32 26	169 13 05	10
24	Поселок Апука	60 23 10	169 37 09	13
25	ГМС Красная	61 14 14	172 45 33	2
26	Село Ягодное (о.Карагинский)	58 51 49	163 33 08	31
27	Карагинский островной	50 03 33	163 41 13	38
	рыбозавод			
28	Возможное положение станции			
	измерения уровня	58 52 48	164 32 44	16
29	-"-	59 48 41	166 08 04	8
30	-"-	59 59 09	170 26 35	15
31	-"-	55 23 12	165 58 17	141
32	-"-	56 40 06	163 14 31	39
33	-"-	60 28 22	171 02 53	85

На рис 7 показано географическое положение морских точек, близких к этим населенным пунктам (далее именно эти точки мы будем отождествлять с самими насе-

ленными пунктами) и точек возможной установки станций измерения уровня на батиметрической карте исследуемого региона.



Рис. 7. Батиметрическая карта юго-западной части Берингова моря и размещение населенных пунктов (1-27) и возможных точек установки уровенных станций (1,3,28-33). Изображены изобаты глубин 100, 500, 1000, 2000, 3000 и 4000 метров.

К большинству из них (к пунктам 4 -21, 27, 28) примыкают обширные районы мелководья с глубиной воды H<100 м. Менее протяженные мелководные акватории примыкают к пунктам 22 - 25 и к пунктам 1 - 3 непосредственно примыкает глубоководная зона (глубины свыше 500 м). Можно ожидать, что к первой группе пунктов примыкают самые маленькие, ко второй - более крупные и - к третьей самые обширные сейсмические зоны молчания. Соответственно, будет сильно отличаться ситуация с заблаговременностью получаемых в них предупреждений о цунами.

На рис 8 показана карта эпицентров цунамигенных землетрясений, происшедших в рассматриваемом районе и непосредственной близости к нему.

Как видно из этого рисунка, пункты 1 - 3 находятся непосредственно в зоне эпицентров или, по принятым здесь представлениям, - в зоне вероятных источников цунами то есть в явно неблагоприятной географической ситуации. Пункты 4-11, 26,27 находятся вблизи границы этой зоны. Указанные пункты тоже могут иногда попадать в неблагоприятную ситуацию.



Рис.8. Карта эпицентров цунамигенных землетрясений юго-западного беринговоморского сейсмического региона.

На рис. 9 показаны изохроны минимального времени добегания цунами до пунктов 1 - 27, и на рис. 10 аналогичное поле для пунктов 2, 4-27 (на втором рисунке исключены из расчета пункты 1,3, чтобы продемонстрировать сейсмическую зону молчания пункта 2).



Рис.9. Поле изохрон минимального времени добегания цунами до пунктов 1 - 27. Здесь и на последующих рисунках изохроны, соответствующие временам пробега 30 минут и более, проведены через 5 минут. Более частым проведением изохрон (через 1 минуту) выделены 27-минутные сейсмические зоны молчания.



Рис. 10. Поле изохрон минимального времени добегания цунами до пунктов 2, 4-27

Как мы и ожидали, самые обширные сейсмические зоны молчания имеют пункты 1 - 3, причем они целиком размещаются в зоне вероятных источников цунами. Соответственно эти пункты имеют высокую вероятность оказаться в неблагоприятной ситуации незаблаговременного получения предупреждения о цунами. Существенно в лучшем положении находятся пункты 4 - 11, 26, 27, так как имеют очень мало протяженные зоны молчания, и цунамигенное землетрясение должно произойти в непосредственной близости к ним, чтобы возникла неблагоприятная ситуация с предупреждением о цунами. Наконец, пункты 12 - 25, безусловно могут быть обеспечены заблаговременными прогнозами действующей СПЦ.

Гидрофизическое прикрытие пунктов 1 - 3 вряд ли имеет практический смысл изза больших размеров соответствующих сейсмических зон молчания (как показано в главе 2, размеры гидрофизической зоны молчания всегда существенно больше размеров сейсмической зоны молчания при любом разумном числе станций измерения уровня) и больших размеров соответствующих областей пересечения их с цунамигенной зоной. В силу этого же обстоятельства названные пункты имеет смысл проверить в качестве возможных мест установки уровенных станций. Поэтому они исключаются из нижеследующего анализа возможностей гидрофизического метода прогноза цунами в качестве населенных пунктов, но точки 1 и 3 анализируются в качестве возможных мест установки уровенных станций.

На рис. 11 показаны "районы ответственности" пунктов 4 - 27, то есть те области акватории, включающие какой-либо один пункт из рассматриваемых, из которых в этот пункт волна цунами должна подойти раньше, чем к остальным.



Рис. 11. "Районы ответственности" пунктов 4 - 27.

Из этого рисунка видно, что самый обширный район ответственности, включающий в себя практически всю цунамигенную зону, имеет пункт 17. Это обстоятельство существенно упрощает задачу отыскания рациональной расстановки уровенных станций для рассматриваемых пунктов, так как она сводится к задаче отыскания таковой для одного пункта, а именно, пункта 17 (практически при любом положении источника волна цунами прибудет к этому пункту раньше, чем к остальным).

Предварительный выбор мест возможной установки гидрофизических станций (точки 1, 3, 28-33) осуществлялся без учета положения цунамигенной зоны. На батиметрической карте выделялись места, в которых, из-за тех или иных особенностей рельефа дна моря (крутой наклон дна моря непосредственно у берега, наличие подходящих к берегу подводных ложбин), глубоководная его часть (изобата 3000 м) ближе всего подходит к берегу, и там выбиралась соответствующая точка наблюдения. Так были выбраны точки 1, 3, 28, 31, 32 (в районах участков берега с крутым наклоном дна) и точки 29 и 33 (вблизи вершин глубоководных ложбин). Точка 30 специально выбрана заведомо неправильно, чтобы продемонстрировать, что она окажется отброшенной при последующем анализе. Сразу можно сказать, что эти точки как места для организации уровенных наблюдений заведомо неравноценны. Очевидно, что те из них, которые расположены в самой цунамигенной зоне и в непосредственной близости к ней окажутся лучше более удаленных. Однако для получения более точных оснований для выбора того или иного места необходимо проанализировать форму изолиний разности времен добегания цунами до пункта 17 и каждой из вышеназванных точек наблюдения (рис. 12 -19).



Рис. 12. Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 17 и точки 31. Значения разности указаны на изолиниях. Изолиния разности, равной 27 минутам, есть граница гидрофизической зоны молчания пункта 17, обеспечиваемой станцией в точке, располагаемой в точке 31. Сравнивая этот рисунок с рис 8, можно заметить, что цунамигенная зона и соответствующая ГЗМ пересекаются в окрестности мыса Озерной.



Рис. 13 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 17 и точки 1. Аналогично случаю на предыдущем рисунке гидрофизическая зона молчания и цунамигенная зона пересекаются.



Рис. 14. Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 17 и точки 32. Гидрофизическая зона молчания и цунамигенная зона все еще пересекаются, хотя площадь области их пересечения заметно уменьшилась.



Рис. 15. Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 17 и точки 3. Граница гидрофизической зоны молчания практически не пересекает цунамигенную зону, но проходит очень близко к ней.



Рис. 16. Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 17 и точки 28. Гидрофизическая зона молчания находится за пределами цунамигенной зоны (то есть они не пересекаются). Эта точка является наилучшим местом установки одной уровенной станции для гидрофизического прикрытия населенных пунктов 4 - 27.



Рис. 17. Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 17 и точки 29. Гидрофизическая зона молчания содержит в себе всю цунамигенную зону. Уровенная станция, установленная в этой точке, ни при каком положении вероятного источника не обеспечит заблаговременного прогноза цунами в прикрываемые пункты 4 - 27.



Рис. 18 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 17 и точки 30. Аналогично предыдущей точке (29) она не пригодна для установки уровенных наблюдений с позиции заблаговременности предупреждения о цунами.



Рис. 19. Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 17 и точки 33. Эта точка также непригодна для постановки уровенных наблюдений с позиции заблаговременности предупреждения о цунами.

Из внимательного изучения этих рисунков следует, что лучшим из рассмотренных местом для установки станции измерения уровня, из рассмотренных, является точка 28, обеспечивающая заблаговременное предупреждение пункта 17 о волнах цунами, возникших в пределах юго-западного беринговоморского сейсмического региона. Но так как, в абсолютном большинстве случаев, именно этот пункт раньше других должен подвергаться воздействию цунами, предупреждение, заблаговременное для него будет заблаговременным и для других пунктов. То, что это утверждение справедливо, показывает рисунок 20, на котором показаны изолинии разностей минимального времени добегания цунами до населенных пунктов 4 - 27 и времени добегания до точки 28.



Рис. 20. Изолинии разностей минимального времени добегания цунами до пунктов 4 - 27 и времени добегания до точки 28.

Сравнивая его с рис.16, замечаем, что коллективная гидрофизическая (27- минутная) зона молчания пунктов 4-27, создаваемая точкой 28, лишь незначительно отличается от индивидуальной - пункта 17 в ближней окрестности каждого из них.

Уже при анализе реальных возможностей Российской СПЦ в первой же подзоне ее ответственности мы сталкиваемся с некоторыми важными особенностями ее работы, которые оказываются общими и для всей зоны ответственности. Перечислим их.

Населенные пункты, находящиеся на границе зоны вероятных источников цунами или вблизи нее, не всегда могут быть заблаговременно предупреждены о возможных волнах цунами. Выработанное в СПЦ в точном соответствии с существующим регламентом предупреждение будет доставлено заведомо не заблаговременно в те населенные пункты, чьи сейсмические зоны молчания пересекает конкретный источник цунами. Если, при этом, сейсмические зоны молчания достаточно протяженны и, тем более, сравнимы по размерам с зоной вероятных источников цунами (как, например, сейсмические зоны молчания пунктов 1 и 3 на рис.9), соответствующие пункты просто "выпадают" из списка прикрываемых СПЦ, так как она очень часто прикрыть их не сможет.

К безусловно неблагополучным необходимо отнести пункты 1, 2, 3, имеющие обширные СЗМ в пределах цунамигенной зоны. Пункты 4-10,26,27 с разной степенью уверенности можно отнести к пунктам, находящимся в зоне риска получить незаблаговременное предупреждение о цунами (они непосредственно примыкают к цунамигенной зоне). Оставшиеся пункты (11-25) при любом положении источника цунами в пределах цунамигенной зоны безусловно обеспечиваются действующей СПЦ заблаговременными прогнозами.

Гидрофизическая подсистема, при любой конфигурации и числе уровенных станций не улучшит положения в "неблагополучных" населенных пунктах, так как размер гидрофизической зоны молчания всегда существенно больше сейсмической зоны молчания. В случае близких источников цунами она всегда будет играть вспомогательную роль, уточняя сейсмологический прогноз цунами заблаговременно лишь для некоторых населенных пунктов и определяя момент отмены тревоги для всех.

3.2. Камчатский сейсмический регион.

Согласно общепринятой классификации, Камчатский сейсмический регион входит составной частью в Курило-Камчатскую сейсмоактивную зону. Последняя относится к самым сейсмоактивным регионам мира и характеризуется высокой цунамиактивностью.

Таблица 2

N⁰		Широта	Долгота	Глуб
		морской	морской	ина
ПП	Наименование пункта	точки (С)	точки(В)	воды
		0 /	0 /	М
1	Гидрометеостанция (ГМС) мыс Лопатка	50 52	156 42	8
2	Контрольно-наблюдательный пункт (КНП) Кам-	51 36	157 46	15
	чатрыбпрома (мыс Желтый)			
3	Рыбозасольная сезонная база (РСБ) бухта Ходут-	51 49	158 03	18
	ка и ГМС бухта Водопадная			
4	РСБ бухта Асача и РСБ бухта Лиственничная	52 19	158 27	26
5	Пункт водоснабжения бухта Русская	52 24	158 28	67
6	РСБ бухта Жировая	52 34	158 26	11
7	РСБ в бухтах малая и большая Саранная	52 46	158 32	17
8	Город Петропавловск-Камчатский	52 57	158 27	12
9	Поселок Халактырка	53 00	158 51	13
10	РСБ в устье реки Налычево	53 09	159 16	12
11	РСБ в устье реки Островная	53 14	159 32	10
12	РСБ Большая Медвежка	53 19	159 58	8
13	РСБ Жупаново	53 41	159 53	6
14	РСБ в устье реки Березовая	53 50	159 51	6
15	РСБ в устье реки Карымская	59 59	159 52	8
16	Кордон Кроноцкого государственного заповедни-	54 07	159 59	5
	ка - (КГЗ) Жупаново и ГМС Семячик			
17	ГМС Кроноки	54 33	161 07	22
18	Кордон КГЗ мыс Козлова	54 30	161 42	27
19	маяк мыс Кроноцкий	54 45	162 07	9
20	Кордон КГЗ мыс Каменистый	54 49	162 09	17
21	Кордон КГЗ в устье реки Большая Чажма	55 05	161 52	12
22	РСБ в устье реки Сторож	55 23	161 42	102
23	Поселок Усть-Камчатск	56 07	162 14	82
24	ГМС мыс Африка	56 11	163 18	140
25	Поселок Никольское	55 10	165 55	35

В таблице 2 представлены данные о положении морских точек в непосредственной близости к населенным пунктам и другим объектам, которые Камчатская СПЦ должна оперативно предупреждать о возникающей угрозе цунами в соответствии с приведенными выше временными нормативами.

На рис 21 показано географическое положение этих точек на батиметрической карте исследуемого региона. На батиметрической карте можно отметить следующие особенности рельефа дна акватории, которые и определят, в основном, картину времен добегания цунами до рассматриваемых пунктов.



Рис. 21 Батиметрическая карта и населенные пункты на Тихоокеанском побережье Камчатки.

Обширная зона относительного мелководья примыкает к северным Курильским островам и югу Камчатки, что легко видеть по изобатам 100 и 500 м, что должно обусловить сравнительно небольшие размеры сейсмических зон молчания пунктов 1 и 2. То же самое можно сказать о пунктах 14 - 16.

Глубоководная изобата 5000 м ближе всего подходят к урезу воды у острова Беринга, что обуславливает особо неблагоприятное положение пункта 25, чья СЗМ должна быть наиболее обширной среди остальных. Изобаты 1000 -3000 м, проходят достаточно близко к берегу в окрестности пунктов 4 - 7, 12, 13, 18 - 22, поэтому и эти пункты находятся в неблагоприятных условиях в смысле получения заблаговременных предупреждений о цунами. Более точную картину покажет расчет, собственно, СЗМ для всех населенных пунктов. Здесь мы обращаем внимание на то, что уже карта глубин может дать определенные качественные представления о обеспеченности разных населенных пунктов заблаговременными прогнозами цунами.

На рис 22 представлена карта эпицентров прикамчатских цунамигенных землетрясений.



Рис. 22 Карта эпицентров прикамчатских цунамигенных землетрясений.

Можно видеть, что эпицентры цунамигенных землетрясений "избегают" глубин акватории заметно меньших 100 м (исключение составляет единственный явно ошибочно определенный на суше эпицентр цунамигенного землетрясения на юге Камчатки) и больших 5000 м. Эту изобату мы примем в качестве условной морской границы Камчатской цунамигенной зоны, а в качестве сухопутной - линию уреза воды вдоль Камчатки и воображаемую границу между акваториями Тихого океана и Охотского моря.



Рис. 23 Изохроны минимального времени добегания до 25 рассматриваемых населенных пунктов и 27-минутная коллективная их сейсмическая зона молчания. В пределах последней изохроны проведены с интервалом в 1 минуту.

На рис 23 показаны изохроны минимального времени добегания цунами до 25 рассматриваемых населенных пунктов и 27-минутная коллективная их C3M (внутри нее изохроны проведены через 1 минуту, а вне - через 5 минут).

Коллективная СЗМ покрывает практически всю Камчатскую цунамигенную зону за исключением небольшого ее участка в окрестности мыса Лопатка и Курильских островов Шумшу и Парамушир. Это означает, что при любом положении источника цунами в пределах Камчатской цунамигенной зоны среди исследуемых пунктов *всегда есть такие, в которые предупреждение о цунами не может быть доставлено заблаговременно при ныне действующих в СПЦ временных нормативах работы в тревожном режиме.* Рассмотрение индивидуальных СЗМ для каждого населенного пункта в отдельности, которые представлены на рисунках 24-31, показывает, что чаще всего незаблаговременные предупреждения о цунами будут поступать в пункты 3-7, 9, 12, 17-25.



Рис.24 *Сейсмические зоны молчания пунктов 1, 2, 5, 13, 16, 17, 23. Самые обширные зоны молчания на этом рисунке имеют пункты 5, 17 и 23.*



Рис. 25 Сейсмические зоны молчания пунктов 3, 8, 10, 14 и 24. Самую обширную зону молчания на этом рисунке имеет пункт 24.



Рис. 26. Сейсмические зоны молчания пунктов 4, 15, 18. Самые обширные зоны молчания здесь имеют пункты 4 и 18.



Рис. 27. Сейсмические зоны молчания пунктов 6, 11 и 25. Самые обширные зоны молчания здесь имеют пункты 6 и 25.



Рис. 28. Сейсмические зоны молчания пунктов 7, 12 и 22.



Рис. 29. Сейсмические зоны молчания пунктов 9 и 21.





Рис. 31 Сейсмическая зона молчания пункта 20.

Представление о размерах C3M рассматриваемых населенных пунктов дает также таблица 3, в которой приведены округленные до десятков километров "длина" (максимальный диаметр в направлении от населенного пункта в сторону максимальных глубин или "поперек" изобат), и "ширина" (максимальный диаметр вдоль изобат) С3M каждого населенного пункта, а также минимальное расстояние до изобаты 5000 м (по-

перечный размер цунамигенной зоны). Длина цунамигенной зоны (расстояние от траверза пункта 1 - ГМС мыс Лопатка - до правого края используемого планшета) составляет 890 км,

Τ- 6----- 2

r	1	1			1	1	таолица з
NºNº	"Длина"	"Ширина"	Расстояние	<u>No No</u>	"Длина"	"Ширина"	Расстояние
пп	СЗМ, км	СЗМ, км	до изобаты	пп	СЗМ, км	СЗМ, км	до изобаты
1111			5000 м, км	1111			5000 м, км
1	30	40	140	14	20	30	160
2	40	50	140	15	30	20	160
3	80	80	140	16	30	30	160
4	180	200	160	17	80	80	130
5	220	260	170	18	230	380	100
6	180	190	170	19	220	370	80
7	160	170	180	20	250	420	90
8	30	20	180	21	190	240	110
9	110	110	160	22	230	260	110
10	50	60	140	23	210	230	120
11	30	40	130	24	310	400	90
12	140	170	120	25	340	370	20
13	40	40	150				

Как видно из таблицы 3, линейные размеры зон значительно меняются от пункта к пункту. Так 8 пунктов (пункты 1, 2, 8, 11, 13-16) имеют сравнительно небольшую длину C3M от 20 до 40 км, длина C3M пунктов 3, 10, 17 составляет 50 - 80 км, длина же C3M остальных 14 пунктов (4-7, 9, 12, 18-25) составляет от 110 до 340 км.

Поскольку в качестве цунамигенной зоны здесь принята вся акватория от линии берега до изобаты 5000 м, необходимо признать что все, перечисленные в таблице 2 пункты находятся в условиях риска получить от действующей СПЦ предупреждение о цунами незаблаговременно. При этом он будет минимален (пренебрежимо мал) для первой из вышеназванных группы, несколько большим - для второй и ощутимо большим для третьей. Практически при любом положении источника цунами вблизи Камчатки, среди перечисленных в таблице 2 пунктов, обязательно найдутся такие, которые действующая СПЦ не сможет предупредить о цунами заблаговременно.

Совершенно очевидна необходимость каких-то дополнительных мер для повышения безопасности населения и работающего персонала в пунктах (4-7, 9, 12, 18-25). Местной администрации следовало бы попытаться обеспечить уменьшение времени, необходимого для эвакуации, до 10 или даже 5 минут во всех перечисленных выше пунктах (по существу, речь идет об эвакуации людей с полосы берега вблизи уреза воды на высоту порядка 10 м или в герметичные подземные помещения, способные поддержать жизнь людей в течение нескольких часов от момента эвакуации и до отбоя тревоги цунами). Это обеспечило бы уменьшение временной дистанции заблаговременности соответственно на 5 или 10 минут.

С 1977 г. на Камчатке функционирует автоматизированная система оповещения о цунами поселка Усть-Камчатск (пункт 23 в таблице 2) и села Никольское (пункт 25 в таблице 2), доставляющая тревожное сообщение в указанные пункты в течение не более 1 минуты после его составления. [Заякин, Набоких, 1988]. Если распространить действие этой системы связи на остальные из вышеназванных пунктов, то это даст экономию еще 1 минуты.

Наконец, данные наблюдений о близких с эпицентральными расстояниями до 400 км землетрясениях с помощью современных вычислительных средств могут быть обработаны в течение 2 минут, считая от момента возникновения землетрясения (при условии, что обрабатываются данные наблюдений одной станции). Это дает нам экономию еще 8 минут.

В итоге мы получаем две возможные временные дистанции заблаговременности в 13 и 8 минут, при условии выполнения эвакуации за 10 и 5 минут. Соответствующие зоны молчания показаны на рисунках 32 и 33.



Рис. 32 Восьмиминутная зона молчания населенных пунктов Камчатки.

Как показывают эти рисунки, примерно равноценную, по сравнению с остальными, безопасность пунктов 5, 18 - 25 можно обеспечить лишь выполнив рекомендации, приведенные выше, включая обеспечение готовности населения к эвакуации в течение 5 минут.

Из изложенного выше понятно, что в условиях Камчатки в случае местных сильных землетрясений гидрофизическая подсистема всегда будет играть вспомогательную роль. Безусловно лучшими местами для установки прибрежных уровенных станций будут пункты 5, 12, 18, 20, 24 и 25, что очевидно из рисунка 34, где показаны районы ответственности всех населенных пунктов Камчатки Как эта подсистема из 6 уровенных станций может обеспечить некоторые прибрежные населенные пункты на восточном побережье Камчатки показывает рисунки 35, 36, 37, 38, на которых представлены изолинии разностей времен добегания до пунктов, соответственно, 1 (ГМС мыс Лопатка), 8 (г. Петропавловск -Камчатский), 14 -16 (РСБ в устьях рек Березовая и Карымская и ГМС Семячик), и 23 (п. Усть-Камчатск) и названных станций. Напомним, что области акватории в которых указанные разности составляют менее 27 минут относятся к гидрофизической зоне молчания СПЦ для соответствующих пунктов. Это значит, что прогноз цунами по данным гидрофизических наблюдений будет доставлен в населенный пункт незаблаговременно, если источник пересекает соответствующую зону молчания (изолинию разности, соответствующую 27 минутам).



Рис. 33 Тринадцатиминутная зона молчания населенных пунктов Камчатки.



Рис. 34 Районы ответственности населенных пунктов Камчатки.



Рис. 35 Изолинии разности времен добегания до пункта 1 (ГМС мыс Лопатка) и уровенных станций, располагаемых в пунктах 5, 12, 18, 20, 24, 25



Рис 36 Изолинии разности времен добегания до пункта 8 (город Петропавловск-Камчатский) и уровенных станций, располагаемых в пунктах 5, 12, 18, 20, 24, 25.



Рис 37 Изолинии разности времен добегания до пунктов 14-16 (участок побережья Камчатки. включающий РСБ в устьях рек Березовая и Карымская, ГМС Семячик и кордон Кроноцкого Государственного заповедника Жупаново) и уровенных станций, располагаемых в пунктах 5, 12, 18, 20, 24, 25.



Рис. 38 Изолинии разности времен добегания до пункта 23 (поселок Усть-Камчатск) и уровенных станций, располагаемых в пунктах 5, 12, 18, 20, 24, 25.

Из приведенных рисунков можно видеть, что взятые для примера пункты по разному обеспечиваются заблаговременными гидрофизическими прогнозами цунами (соответствующие ГЗМ сильно различаются по размерам). В наиболее благоприятных условиях находятся пункты 1 и участок побережья с пунктами 14 - 16 их ГЗМ имеют минимальные размеры, и их площади составляют по порядку величины примерно 1/5 площади всей прикамчатской цунамигенной зоны. Хуже обеспечены гидрофизическими прогнозами цунами по данным станций в заданных точках (5, 12, 18, 20, 24, 25) город Петропавловск - Камчатский и поселок Усть-Камчатск, площади принадлежащих им ГЗМ составляют примерно половину площади цунамигенной зоны.

Пункты, в которых выбраны места под станции естественно еще хуже обеспечены заблаговременными гидрофизическими прогнозами цунами, что иллюстрирует рисунок 39, на котором показаны изолинии разности времен добегания цунами до пункта 25 (село Никольское) и станций, располагаемых в пунктах 5, 12, 18, 20. 24 (станция располагаемая в самом пункте 25 ни при каких условиях не обеспечит заблаговременного прогноза цунами в этом пункте).



Рис 39 Изолинии разности времен добегания цунами до пункта 25 и станций, располагаемых в пунктах 5, 12, 18, 20, 24.

Выбранная нами группа станций вообще не обеспечивает указанный пункт заблаговременными прогнозами цунами практически ни при каких положениях источника цунами в пределах прикамчатской цунамигенной зоны, если учесть большую протяженность реальных источников цунами.

Ситуацию с заблаговременными гидрофизическими прогнозами можно, в принципе, несколько улучшить рационально выбрав несколько подходящих мест для установки станций измерения уровня в открытом океане исходя из следующих соображений. Очевидно, что регион совершенно не прикрыт гидрофизическими станциями на краях используемого планшета. Со стороны Курильских островов можно выбрать место под станцию, минимизировав площадь ГЗМ пункта 1. Одновременно эта станция сможет прикрыть и остальные пункты, находящиеся к северу от мыса Лопатка.

Прикрыть север Камчатки и Командорские острова со стороны Алеутских островов и Аляски путем установки уровенной станции в пределах используемого планшета не удастся из-за обширных СЗМ пунктов 18 - 25, покрывающих практически весь его северо-восточный угол, так как станция не может располагаться в СЗМ никакого из прикрываемых пунктов. Что касается местных землетрясений, то временная дистанция заблаговременности 27 минут, как мы выяснили выше, не подходит для этого региона. Можно попытаться найти положение уровенной станции для прикрытия важнейшего пункт на севере Камчатки - поселка Усть-Камчатск, исходя из временной дистанции заблаговременности 13 минут, минимизируя площадь соответствующей ГЗМ (готовность населения к эвакуации в течение 10 минут после получения сигнала о тревоге цунами). Дальнейшее изложение идет в соответствии с этим планом.

Ход решения задачи об оптимальной установке уровенной станции в окрестности мыса Лопатка опишем достаточно подробно.

Сначала строятся поле обратных изохрон времен добегания цунами до пункта 1 и центральный луч этого поля, на котором произвольно, но достаточно часто фиксируется серия точек - возможных мест установки уровенной станции. Результаты этих операций показаны на рисунке 40.

На рисунках 41 - 45 показаны 27-минутные ГЗМ, принадлежащие пункту 1, создаваемые уровенной станцией, установленной в точках, соответственно, 26, 27, 28, 29, 31, 33. При этом в качестве ГЗМ принимается только часть области, ограниченной изолинией разности 27 минут, принадлежащая акватории Тихого океана (частью ГЗМ, располагающейся в Охотском море мы пренебрегаем).







Рис. 41 27-минутная ГЗМ, принадлежащая пункту 1, создаваемая уровенной станцией, расположенной в точке 26.



Рис. 42 27-минутная ГЗМ, принадлежащая пункту 1, создаваемая уровенной станцией, располагаемой в точке 27.



Рис. 43 27-минутная ГЗМ, принадлежащая пункту 1, создаваемая уровенной станцией, располагающейся в точке 28.



Рис. 44 27-минутная ГЗМ, принадлежащая пункту 1, создаваемая уровенной станцией, расположенной в точке 31.



Рис. 45 27-минутная ГЗМ, принадлежащая пункту 1, создаваемая уровенной станцией, расположенной в точке 33.

Как можно видеть из приведенных рисунков площадь ГЗМ заметно уменьшается при изменении положения уровенной станции от точки 26 к точке 27, достигает мини-

мума при положении станции в точке 28 и, в дальнейшем, она начинает очень незначительно расти по мере удаления станции от пункта 1. Поэтому точки 27 - 31 практически равноценны с точки зрения обеспечения заблаговременного гидрофизического прогноза цунами в пункте 1. Оптимальная точка установки уровенной станции есть точка 28 (φ=50° 22′ 11″ с.ш., λ=157° 17′10″ в.д., глубина воды H=610 м).

Рассмотренные точки находятся в зоне ответственности пункта 5, поэтому имеет смысл выяснить насколько полезна точка 28 именно для этого пункта. СЗМ пункта 5 и ГЗМ, создаваемая для него уровенной станцией, расположенной в точке 28, показаны на рис 46.



Рис. 46 Границы 27-минутных СЗМ для пункта 5 и ГЗМ, создаваемой для него же уровенной станцией располагающейся в точке 28.

Как показывает этот рисунок, уровенная станция в точке 28 сможет обеспечить для пункта 5 заблаговременный прогноз цунами со стороны Курильских островов, а следовательно, и для остальных пунктов, куда волна цунами прибудет, по определению, позже, чем в пункт 5.

Аналогично тому, как это делалось для пункта 1, было найдено оптимальное положение уровенной станции, обеспечивающей минимальную площадь 13-минутной ГЗМ для пункта 23 - поселка Усть-Камчатск (ее координаты $\varphi=55^{\circ}33'37''$ с. ш. λ =162°58′48″ в.д. глубина воды 3328 м). На рисунках 47 - 51 показаны изолинии разностей времен добегания, соответственно, до пунктов 1, 8, 14-16, 23, 25 и группы уровенных станций, располагающихся в найденных выше точках, включая и две морские (на этих рисунках последние показаны под номерами 26 вблизи пункта 1 и 27 - вблизи пункта 23). Сравнивая эти рисунки, последовательно, с рисунками 35, 36, 37, 38 и 39, легко обнаруживаем заметное улучшение ситуации при добавлении к совокупности береговых уровенных станций всего двух морских.



Рис. 47 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 1 и группы станций измерения уровня океана, располагаемых в точках 5,12,18,20.24-27.



Рис. 48 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 8 и группы станций измерения уровня океана, располагаемых в точках 5, 12, 18, 20, 24 - 27.



Рис. 49 Изолинии разностей времен добегания цунами до пунктов 14-16 и группы станций измерения уровня океана, располагаемых в точках 5,12,18,20,24-27



Рис. 50 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 23 и группы станций измерения уровня океана, располагаемых в точках 5,12,18,20,24-27



Рис. 51 Изолинии разностей времен добегания до пункта 25 и группы станций измерения уровня океана, располагаемых в точках 5, 12, 18, 20, 24, 26, 27.

Заметно указанное улучшение для пунктов 1 и 23, что естественно, ведь расположение станции в точках 27 и 28 близко к оптимальному именно по отношению к этим пунктам. Сравнивая рисунки 35 и 47, можно видеть, что станция в точке 27 обеспечивает существенное уменьшение площади, охваченной изохронами разности менее 60 минут (от 50 минут и менее). А 27-минутная ГЗМ для пункта 1 замыкается на побережьях п-ва Камчатки и о-ва Парамушир.

Из сравнения рисунков 38 и 50 видно, что уровенная станция в точке 27 обеспечивает, как и ожидалось нами, не менее, чем 13-минутную временную дистанцию заблаговременности предупреждения для пункта 23 в случае возникновения цунами, в северных прикамчатских акваториях. Станция в точке 26, в свою очередь, обеспечивает больший (на 20 - 30 минут) интервал заблаговременности для указанного пункта в случае возникновения цунами вблизи юга Камчатки.

Сравнение рисунков 36 и 48 показывает, что благодаря станции в точке 26 ГЗМ пункта 8 теперь замыкается с юга от него и, следовательно, в случае возникновения

цунами вблизи юга Камчатки и северных Курильских островов эта станция сможет предупредить указанный пункт о цунами заблаговременно.

Наименее заметно эти морские станции влияют на ситуацию в пунктах 14 - 16, как это видно из сравнения рисунков 37 и 49, а также в пункте 25, что видно из сравнения рисунков 39 и 51.

Размеры (27-минутной) ГЗМ пунктов 14 -16, если ограничиться областью акватории с глубиной менее 5000 м, не изменилось, что связано с большим удалением точек 26 и 27 от указанных пунктов. Однако хорошо видно, что станция в точке 26 обеспечивает для них увеличение интервала заблаговременности на 20 - 30 минут, в случае возникновения цунами вблизи юга Камчатки и северных Курил.

Станция в точке 26 лишь ненамного улучшает ситуацию в пункте 25, обеспечивая заблаговременные прогнозы цунами от вероятных источников вблизи юга Камчатки и северных Курильских островов. Станция в точке 27 практически бесполезна для пункта 25, так как находится в пределах 27-минутной СЗМ этого пункта.

3.3. Курильский сейсмический регион.

Курильский сейсмический регион является южной частью Курило-Камчатской сейсмоактивной зоны и продолжением Камчатского сейсмического региона. Граница между ними условна и определяется лишь требованиями удобства описания и сложившейся традицией. На рис. 52 представлена карта изобат примыкающих к Курилам частей Тихого океана и Охотского моря, а также показаны морские точки вблизи населенных пунктов (в соответствии с таблицей 3).



Рис. 52 Батиметрическая карта прикурильских частей Тихого океана и Охотского моря.

Наиболее характерной особенностью глубин показанной на рисунке акватории является возможность ее подразделения на три части: северную, центральную и южную, заметно отличающиеся по размерам примыкающих к берегам Курильских островов зонам мелководья, что хорошо видно по поведению изобат 100 и 500 м. Южная, примыкающая к островам Кунашир и Итуруп и ограниченная со стороны Тихого океана о-вом Шикотан, и северная, примыкающая к островам Шумшу и Парамушир, части характеризуются наличием со стороны Тихого океана обширных зон мелководья, являющихся как бы естественным прикрытием населенных пунктов, располагающихся на этих островах, увеличивающим времена добегания цунами до них. Центральная часть рассматриваемой акватории, включающая острова Уруп, Симушир, Матуа, наоборот, характеризуется близостью к берегу глубоководных изобат, что обеспечивает относительно малые времена добегания цунами до побережий перечисленных островов.

Со стороны Охотского моря глубоководные изобаты (начиная с 1000 м) близко подходят к побережью островов практически на всем протяжении Курильской гряды, примыкая к нему все теснее по мере продвижения к югу. Эта особенность может приводить к тому, что при некоторых положениях источников волна цунами может достигать охотских побережий островов раньше, чем тихоокеанских.

То обстоятельство, что район является чисто островным и, следовательно, акватория является многосвязной областью, обуславливает возможность подхода цунами к одному и тому же пункту с разных "сторон" (или направлений): и со стороны Тихого океана, и со стороны Охотского моря.



Рис. 53 Карта эпицентров прикурильских цунамигенных землетрясений.

На рис 53 показаны эпицентры курильских цунамигенных землетрясений, которые концентрируются, в основном, на акватории с глубинами менее 5000 м. На акватории глубиной более 5000 м можно насчитать 8 эпицентров землетрясений, и только одно из них вызвало цунами с интенсивностью і ≥ 0. Поэтому и для Курил можно счи-
тать, что морская граница цунамигенной зоны примерно совпадает с изобатой 5000 м. Можно также видеть, что эпицентры цунамигенных землетрясений "избегают", также и мелководья (акватории с глубинами менее 100 м). Имеют ли какой-то смысл отмеченные особенности распределения источников цунами предстоит выяснить.

В таблице 3 приводятся данные об основных населенных и других пунктах Курильских островов, для которых исследовалась ситуация с заблаговременными предупреждениями о цунами на приведенном выше планшете. Ниже будут использованы и более крупномасштабные планшеты, на которых представлены и другие пункты побережья.

				Таблица 3
№ п.п.	Наименование пункта	Широта морской точки (с) ° ' "	Долгота морской точки (в) ° ' "	Глубина воды, м
1	Город Северо-Курильск	50 35 42	156 06 33	1
2	Поселок Байково	50 39 31	156 11 15	7
3	ГМС мыс Васильева	50 03 05	155 26 36	9
4	ГМС Матуа	48 03 41	153 13 56	256
5	ГМС Симушир	46 56 37	151 56 23	52
6	ГМС Уруп	46 11 38	150 26 31	107
7	Город Курильск	45 05 39	147 35 53	75
8	село Малокурильское	53 55 04	146 42 46	26
9	Поселок Южно-Курильск	44 06 41	145 57 16	5
10	Поселок Буревестник	44 49 34	147 27 47	3



Рис. 54 27-минутные СЗМ пунктов 1 - 10 и изолинии минимальных времен добегания цунами до них.

Рис.54 подтверждает сделанные в результате рассмотрения батиметрии региона качественные выводы. На нем показаны коллективная 27-мин. зона ответственности и изолинии минимальных времен добегания до пунктов, перечисленных в таблице 7.

Как и следовало ожидать, наиболее обширные СЗМ имеют пункты 4-7, максимальный диаметр которых (поперек изобат) составляет 220 -290 км при расстоянии до морской границы цунамигенной зоны (изобаты 5000 м) 120-140 км. Пункты 4-6 и, вообще, центральные Курильские острова наименее прикрыты действующей СПЦ от цунами, прогнозы цунами в эти пункты, в случае близких источников, будут поступать сюда незаблаговременно. В лучшем положении находятся пункты, располагающиеся на северном и южном флангах Курильской гряды. На севере наиболее обширную СЗМ имеет пункт 3 (длина ее составляет ~50 км), СЗМ пунктов 1,2 вообще невозможно различить на данном планшете. На юге наиболее обширные СЗМ имеют пункты 8 (длина 56 км), 9 (длина 20 км) и 10 (длина 35 км).

Районы ответственности рассматриваемых пунктов показаны на рис. 55, из которого очевидны наиболее предпочтительные места для установки прибрежных уровенных станций, это пункты 4, 5, 6.



Рис. 55 Районы ответственности пунктов 1 - 10.

Большая протяженность цунамигенной зоны в одном (северо-восточном) направлении (~1200 км от Хоккайдо до мыса Лопатка на Камчатке) при относительно небольшой ширине (~140 - 150 км), одностороннее относительно нее расположение населенных пунктов и наиболее подходящих точек для размещения уровенных станций на центральных Курильских островах указывают практически единственный вариант гидрофизического контроля цунами в рассматриваемой акватории. А именно, необходимо вести наблюдения с помощью одной или нескольких уровенных станций, располагаемых на центральных Курилах и, тем самым, обеспечивать заблаговременный гидрофизический прогноз цунами для северных Курил, когда источник располагается в центральной части или на юге гряды. Эти же наблюдения обеспечат прогнозами южные Курилы, когда источник находится в центральной или северной части гряды. Серия рисунков 56 - 63, демонстрирует возможности станции, располагаемой в точке 5 (в окрестности острова Симушир).



Рис. 56 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 1 и станции, располагаемой в точке 5.



7 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 3 и станции, располагаемой в точке 5.



Рис. 58 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 4 и станции, располагаемой в точке 5.



Рис. 59 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 6 и станции, располагаемой в точке 5.



Рис. 60 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 7 и станции, располагаемой в точке 5.



Рис. 61 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 8 и станции, располагаемой в точке 5.



Рис. 62 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 9 и станции, располагаемой в точке 5.



Рис. 63 Изолинии разности времен добегания цунами до пункта 10 и станции, располагаемой в точке 5.

Как видно из приведенных рисунков, станция в точке 5 в состоянии обеспечить заблаговременными гидрофизическими прогнозами цунами как юг, так и север Курильской гряды при расположении источника в ее центре или на противоположном фланге. Пункты 4 и 6 не могут быть обеспечены такими прогнозами ни при каком расположении источника цунами, так как находятся достаточно близко к точке 5.

Курильские острова наиболее плотно населены лишь на северном (город Северо-Курильск и поселок Байково - пункты 1,2) и южном их флангах (город Курильск, поселки Буревестник, Южно-Курильск, село Малокурильское - пункты 7-10). Поэтому имеет смысл проанализировать возможности действующей СПЦ в каждом из названных регионов отдельно, пользуясь более крупномасштабными картами.

На рис.64 показаны в более крупном, чем на предыдущих, масштабе совместная СЗМ города Северо-Курильска и поселка Байково (морские точки 12 и 13) и изохроны минимальных времен добегания цунами до них.



Рис. 64 Совместная СЗМ г. Северо-Курильска и пос. Байково и изохроны минимальных времен добегания цунами до этих пунктов.

Как видно из этого рисунка, размеры C3M достаточно малы. Ее длина в сторону океана от Северо-Курильска составляет ~25 км и в сторону Охотского моря от Байково - ~45 км. Действующая СПЦ в состоянии доставлять в эти пункты заблаговременный сейсмический прогноз цунами практически при любом положении источника цунами, за исключением случая, когда названные населенные пункты будут находиться непосредственно в зоне самого источника. Пользуясь уже описанными приемами можно найти число и места установки станций измерения уровня, обеспечивающих площадь ГЗМ рассматриваемых пунктов, близкую к минимальной.



Рис. 65

Изолинии разностей времен добегания цунами до пунктов 12 и 13 и станций, располагаемых в точках 2, 18, 26.

Вариант такой расстановки (станции располагаются в точках 2, 18 и 26) и соответствующие этой расстановке изолинии разностей минимальных времен добегания до рассматриваемых пунктов и станций показан на рис. 65.

27-минутные СЗМ некоторых пунктов юга Курильской гряды: 1 (с. Малокурильское), 2 (пос. Южно-Курильск), 3 (о-в Зеленый), 9 (пос. Буревестник), 13 (г. Курильск) и 14 (с. Головнино) и изолинии минимальных времен добегания цунами до них показаны на рис 66.



Рис. 66 27-минутные СЗМ пунктов 1, 2, 3, 9, 13, 14 и изолинии минимальных времен добегания цунами до них.

Самая обширная СЗМ принадлежит пункту 13 (г. Курильску). Она выходит за пределы используемого здесь планшета и распространяется на акваторию Охотского моря, которая слабосейсмична. Самая малая СЗМ (длиной ~10 км) принадлежит пункту 14 (с. Головнино) и несколько большая (~35 км) - пункту 2 (п. Южнокурильск). При этом две последние располагаются целиком в пределах мелководной зоны, находящейся между островом Кунашир и малой Курильской грядой, в которой цунамигенные землетрясения ранее не зафиксированы. Все три названных пункта находятся в благоприятной ситуации. Это значит, что действующая СПЦ в состоянии доставлять в них заблаговременные предупреждения о цунами при практически любом положении источника цунами на Курилах.

Оставшиеся пункты 1, 3, 9 могут (в зависимости от положения источника цунами) оказаться в неблагоприятной ситуации.

Специальное исследование возможных вариантов расстановки станций измерения уровня, показывает, что удовлетворительное гидрофизическое прикрытие пунктов 2, 13, 14 осуществимо при условии установки лишь одной станции измерения уровня в точке 10 вблизи острова Шикотан, мыс Край света (рис. 67).



Рис. 67 Изолинии разностей времен добегания цунами до пунктов 2, 13, 14 и станции, располагаемой в точке 10.

Что касается пунктов 1, 3, 9, (соответственно с. Малокурильское, о-в Танфильева и п. Буревестник) то для оптимального гидрофизического прикрытия каждого из них требуется, минимум, две станция открытого моря, при этом ГЗМ в каждом случае останется достаточно обширной.

3.4. Япономорский сейсмический регион.

Населенные пункты Российской Федерации, которые необходимо прикрывать от волн цунами, возникающих в рассматриваемом регионе, располагаются вдоль побережья евразийского материка и западного побережья острова Сахалин, окаймляющих Японское море с севера и северо-запада. Список населенных пунктов (а также некоторых точек - возможных мест установки уровенных станций) и координаты близко примыкающих к ним морских точек приведен в таблице 5.

Источники цунами, как известно концентрируются в узкой полосе протягивающейся вдоль противоположного берега Японского моря (рис 68) на котором представлена батиметрическая карта Японского моря, морские точки соответствующие населенным пунктам, перечисленным в таблице 5, и эпицентры имевших место в прошлом цунамигенных землетрясений на рассматриваемой акватории.

				Таблиц
NoNo	Наименование	Широта	Долгота морской	Глубина воды
ПП	населенного пункта	морской точки	точки (в)	М
		(c) ° ′ ″	0 / //	
1	Ле-Кастри	51 10 53	140 41 34	6
2	Ванино	49 05 26	140 17 24	9
3	Советская Гавань	48 58 15	140 22 15	20
4	Гроссевичи	47 59 12	139 31 26	10
5	Единка	47 09 13	138 44 18	8
6	Светлая	46 31 05	138 19 31	12
7	Кузнецово	46 14 51	138 03 49	20
8	Великая Кема	45 26 37	137 15 05	5
9	Терней	45 01 52	136 42 15	2
10	Пластун	44 43 58	136 21 25	14
11	Рудная Пристань	44 21 44	135 55 27	41
12	Ольга	43 45 24	135 24 01	20
13	Валентин	43 06 51	134 23 45	21
14	Находка	42 46 05	132 51 50	35
15	остров Путятин	42 50 21	132 21 30	4
16	Большой Камень	43 00 17	132 13 18	45
17	Шкотово	43 14 05	132 11 59	7
18	Владивосток	43 04 56	131 51 26	5
19	остров Рейнеке	42 53 57	131 47 45	87
20	Тавричанка	43 18 03	131 46 43	13
21	залив Посьет	42 38 15	130 48 07	9
22	Александровск	50 57 22	142 04 02	19
23	Углегорск	49 05 03	141 58 53	25
24	Томари	47 45 33	141 56 32	35
25	Чехов	47 28 18	141 52 38	159
26	Холмск	47 03 15	141 58 41	114
27	Невельск	46 41 13	141 49 35	36
28	остров Монерон	46 14 34	141 16 41	87
29	мыс Крильон	45 57 54	142 10 20	8

Область эпицентров цунамигенных землетрясений заканчивается у острова Монерон, в непосредственной близости к населенным пунктам 27-24 (соответственно, Невельск, Холмск, Чехов, Томари). В этом месте она ближе всего располагается и к материковому побережью Российской Федерации. Перечисленные пункты, возможно, будут находиться в неблагоприятной ситуации, в случае возникновения цунамигенного землетрясения у острова Монерон.





Наиболее характерная с точки зрения заблаговременности предупреждения о цунами особенность батиметрии Японского моря - обширная глубоководная котловина, имеющая глубину воды в 3000 м и более, простирающаяся поперек Японского моря от стыка островов Хоккайдо и Хонсю до Российского побережья в районе линии берега от пункта 12 (Ольга) до пункта 21 (залив Посьет). При этом 3000-метровая изобата подходит ближе всего к населенным пунктам 12 (Ольга) и 14 (Находка). Можно ожидать, что эти пункты могут оказаться наименее прикрываемыми от цунами с помощью гидрофизических наблюдений.

На рис 69 показаны коллективная 27-минутная сейсмическая зона молчания СПЦ для всех 29 пунктов, изохроны минимального времени добегания до них и эпицентры известных цунамигенных землетрясений.



Рис. 69 Коллективная 27-минутная СЗМ 29 населенных пунктов, изохроны минимального времени добегания цунами до них и эпицентры известных цунамигенных землетрясений.

Этот рисунок показывает, что действующая СПЦ обеспечивает заблаговременный сейсмический прогноз цунами от источников в пределах Японского моря для большинства населенных пунктов, за исключением уже названных 24 - 27, что подтверждает также рис 70, на котором показана 27-минутная СЗМ пункта 27 (Невельск) и изохроны времен добегания цунами до него.





Пункты 24-27 нуждаются в дополнительных мерах прикрытия от близких цунами - открытии по крайней мере в одном из них сейсмической станции в составе СПЦ.



Рис 71 Районы ответственности пунктов 1 - 29

На рис 71 показаны районы ответственности пунктов 1 - 29, из которого становятся очевидными безусловно лучшие места установки прибрежных уровенных станций в составе СПЦ. Это пункты 8 (Великая Кема), 12 (Ольга), 14 (Находка) и 28 (остров Монерон), имеющие наиболее обширные районы ответственности, пересекающиеся с зоной вероятных источников цунами.

Станции в названных пунктах смогут обеспечить заблаговременный прогноз цунами по гидрофизическим данным не всегда и не для всех населенных пунктов. Это хорошо видно из серии рисунков 72 - 85.



Рис 72

Изолинии разностей минимальных времен добегания цунами до пунктов 1, 2, 3, 22, 23 и станций, располагаемых в точках 8, 12, 14, 28.



Рис 73 Изолинии разностей минимальных времен добегания цунами до пунктов 24 - 27 и станций, располагаемых в точках 8, 12, 14, 28.



Рис 74 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 4 и станций, располагаемых в точках 8, 12, 14. 28.



Рис 75 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 5 и станций, располагаемых в точках 8, 12, 14, 28.



Рис 76 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 6 и станций, располагаемых в точках 8, 12, 14, 28.



Рис 77 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 7 и станций, располагаемых в точках 8, 12, 14, 28.



Рис 78 Изолинии разностей минимальных времен добегания цунами до пунктов 9 - 11 и станций, располагаемых в точках 8, 12, 14, 28.



Рис 79 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 15 и станций, располагаемых в точках 8, 12, 14, 28.



Рис 80 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 16 и станций, располагаемых в точках 8, 12, 14, 28.



Рис 81 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 17 и станций, располагаемых в точках 8, 12, 14, 28.



Рис 82 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 18 и станций, располагаемых в точках 8, 12, 14, 28.



Рис 83 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 19 и станций располагаемых в точках 8, 12, 14. 28.



Рис 84 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 20 и станций, располагаемых в точках 8, 12, 14.28.



Рис 85 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 21 и станций, располагаемых в точках 8, 12. 14. 28.

Анализируя размеры, форму и пересечения с цунамигенной зоной ГЗМ, обеспечиваемых рассматриваемой группой станций для различных населенных пунктов, можно, в частности сделать вывод (рис 72), что пункты 1, 2, 3, 22, 23, (соответственно, пункты Де-Кастри, Ванино, Советская Гавань, Александровск, Углегорск) располагающиеся на материковом и Сахалинском побережьях в глубине Татарского пролива, вполне могут быть обеспечены заблаговременными прогнозами цунами по гидрофизическим данным уровенных станций, располагаемых в точках 8, 12, 14, 28, при любом положении источника цунами в пределах Японского моря. Тоже самое можно сказать относительно пунктов 17 и 20 - Шкотово, Тавричанка (рис 81 и 84). Все названные пункты отличаются максимальной удаленностью от зоны вероятных источников цунами и обширными зонами мелководья, обеспечивающими максимальные времена добегания цунами до них (по сравнению с временами добегания до уровенных станций).

Группа населенных пунктов 24, - 27 (Томари, Чехов, Холмск, Невельск) на сахалинском побережье Татарского пролива, расположенная южнее Углегорска, обеспечивается заблаговременными гидрофизическими прогнозами цунами (рис 73) от источников, находящихся не ближе южной половины острова Хоккайдо.

Как показывают рис 74 - 77, 79 - 81, обеспеченность заблаговременными гидрофизическими прогнозами населенных пунктов уменьшается (площади соответствующих ГЗМ и областей их пересечения с цунамигенной зоной растут) по мере приближения пункта к месту установки ближайшей к нему уровенной станции. При этом, хуже всего обеспечены такими прогнозами пункты 9 - 11, 13 (Терней, Пластун, Рудная Пристань, Валентин), расположенные между станциями, как это иллюстрирует рис 78.

Населенные пункты 16 (Большой Камень), 18 (Владивосток) и 21 (залив Посьет) не обеспечиваются заблаговременными прогнозами цунами от источников, находящихся в примыкающем к Цусимскому проливу обширному участку цунамигенной зоны (рис 80, 82, 85). Еще в меньшей степени обеспечены ими пункты 15 и 19 (острова, соответственно, Путятин и Рейнеке, рис 79, 83).

Предложенные здесь места для установки близбереговых уровенных станций (точки 8, 12, 14, 28), в целом, оказываются не слишком хорошими. А так как среди близбереговых точек они являются безусловно лучшими, с точки зрения достижения необходимой заблаговременности прогноза цунами по данным гидрофизических наблюдений для остальных пунктов, то улучшения ситуации с заблаговременными гидрофизическими прогнозами цунами следует ожидать при рациональном размещении уровенных станций открытого моря.

Поиск рационального размещения уровенных станций открытого моря в данном случае следует начинать с изучения возможностей гидрофизического прикрытия населенных пунктов, имеющих самые обширные районы ответственности, пересекающиеся с цунамигенной зоной. Таковыми являются уже упомянутые места установки береговых уровенных станций - пункты 8, 12, 14 и 28 (остров Монерон), как наименее благоприятно расположенные. Примем такую последовательность действий при решении

этой задачи. Сначала мы попытаемся прикрыть станцией (станциями) открытого моря пункт 14, имеющий максимальную площадь пересечения района ответственности и цунамигенной зоны (рис 71), для чего предварительно уточним положение участка цунамигенной зоны, от которого необходимо прикрывать этот пункт.

На рис. 86 показаны изолинии разностей времен добегания до пункта 14 и точек 8, 12, 28. Хорошо видно, что 27-минутная ГЗМ охватывает почти всю цунамигенную зону от середины Хоккайдо до Цусимского пролива. Станции в указанных точках могут обеспечить заблаговременный гидрофизический прогноз цунами в пункт 14 только от источников, располагающихся на траверсе северного Хоккайдо и в Татарском проливе.



Рис 86 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 14 и уровенных станций, располагаемых в точках 8, 12, 28

Заметим, что пункты 12 и 8, если прикрывать каждый из них с помощью оставшихся трех прибрежных станций также плохо прикрываются ими, как это видно из рисунков 87, 88.



Рис 87 Изолинии разностей времен пробега цунами до пункта 12 и станций в точках 8, 14, 28.



Рис 88 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 8 и станций в точках 12, 14, 28.

Вряд ли эти рисунки нуждаются в комментариях.

На рис 89 показаны пробные точки для выбора оптимального места под станцию измерения уровня для пункта 14. Они сконцентрированы примерно вдоль центрального луча, делящего цунамигенную зону в пределах ГЗМ этого пункта пополам. Крайние лучи ограничивают ее в соответствии с рис 86. Там же показаны 27-минутная СЗМ пункта 14 и изохроны времен добегания цунами 30 и более минут с шагом в 5 минут.



Рис 89 Схема расположения пробных точек 30 - 40 для выбора оптимальной для пункта 14 точки установки уровенной станции.

На рис 90 показаны границы 27-минутных ГЗМ пункта 14 обеспечиваемых уровенной станцией, устанавливаемой в пробных точках 30 - 40, показанных здесь же как и на рис 89. Хорошо видно, что наблюдениями одной станции невозможно прикрыть пункт 14 с требуемой заблаговременностью от источников из всей цунамигенной зоны от юга Хоккайдо до Цусимского пролива. При последовательном построении каждой из этих изолиний определяется оптимальная точка установки станции измерения уровня, (на этом рисунке она имеет номер 36) с координатами $\varphi = 39^{\circ}41'26''$ с.ш., $\lambda = 134^{\circ}53''$ в.д., глубина воды H=1486 м (в дальнейшем, присвоим этой точке номер 30), при котором обеспечивается минимальная площадь ГЗМ пункта 14 в пределах цунамигенной зоны и прикрытие пункта 14 от вероятных источников на траверсе острова Хонсю от Цусимского пролива почти до северной оконечности Хонсю.



Рис 90 Границы 27-минутной ГЗМ пункта 14, обеспечиваемые одной станцией, устанавливаемой в пробных точках 30 - 40.

Для прикрытия пункта 14 от вероятных источников в части цунамигенной зоны от траверса юга Хоккайдо до траверса севера Хонсю необходимо выбрать оптимальное место для еще одной уровенной станции открытого моря. Действуя аналогичным образом: ограничивая неприкрытую наблюдениями область цунамигенной зоны лучами цунами, испущенными из пункта 14, отыскивая центральный луч и располагая вдоль него пробные точки, отыскиваем наилучшую среди них (Рис 91).



Рис 91 Границы 27-минутной ГЗМ пункта 14 при новом варианте расположения пробных точек.(30 - 36).3десь также показаны 27-минутные СЗМ пунктов 8, 12, 14.

Как показывает этот рисунок, при установке станции в любой из показанных на рисунке пробных точек, границы ГЗМ пункта 14, обеспечиваемые этими точками, находятся за пределами участка цунамигенной зоны, от которого необходимо прикрыть этот пункт, и в этом смысле все точки являются равноценными (пригодными для установки уровенной станции). При последовательном построении 27-минутной границы ГЗМ, обеспечиваемой каждой из пробных точек, легко устанавливается, что, формально, наилучшей (дающей минимальную площадь ГЗМ) является точка 33. Однако для установки станции мы выберем точку 36, которая располагается ближе всех, показанных на рис 91, к оптимальному положению по отношению к пункту 12, который тоже необходимо прикрывать (выбранная точка располагается ближе остальных к центральному лучу СЗМ пункта 12). Координаты этой точки (в дальнейшем присвоим ей номер 31) $\varphi = 41^\circ 46' 45''$ с.ш. $\lambda = 137^\circ 51' 23''$ в.д., глубина воды H = 3684 м.

На рис 92 представлены изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 14 и станций, располагаемых в береговых точках 8, 12, 28 и найденных морских точках 30 и 31.



Рис 92 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 14 и станций, располагаемых вблизи берега в точках 8, 12, 28 и в морских точках 30 и 31.

Найденные морские точки (вместе с тремя береговыми) обеспечивают необходимую заблаговременность предупреждения о цунами пункта 14 при любом положении источника в пределах япономорской цунамигенной зоны.

На рис 93 и 94 (их стоит сравнить с рисунками 87 и 88) показаны изолинии разностей времен добегания цунами до пунктов 12 и 8 и станций измерения уровня в точках располагаемых в береговых и морских (30, 31) точках.



Рис 93 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 12 и станций в береговых точках 8, 14, 28 и морских точках 30, 31.



Рис 94 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 8 и станций в береговых точках 12, 14, 28 и морских точках 30, 31.

Наличие оптимально установленных по отношению к пункту 14 двух морских станций измерения уровня резко улучшают ситуацию и для пунктов 8 и 12. Эти пункты остаются неприкрытыми только от вероятных источников цунами вблизи западного побережья Хоккайдо. Так как пункт 8 располагается ближе к указанному участку, чем пункт 12, имеет смысл найти оптимальную именно для этого пункта точку установки уровенной станции, которая прикрывала бы его заблаговременными наблюдениями от вероятных источников из указанного района. Действуя так же, как и при отыскании точек 30, 31, мы установили, что для прикрытия пункта 8 потребуется установка двух уровенных станций в точках 32 с координатами $\varphi = 43°57'28''c.ш. \lambda = 139°14'25''в.д., глубина воды H=1747 м и 33 с координатами <math>\varphi = 45°41'26''c.ш. \lambda = 139°51'09''в.д., глубина воды H = 953 м. Как прикрываются пункты 8 и 12 прибрежными и четырьмя морскими станциями измерения уровня показывают рисунки 95 и 96.$



Рис 95 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 8 и станций измерения уровня в точках 12, 14, 28, 30 - 33.



Рис 96 Изолинии разностей времен добегания цунами до пункта 12 и станций измерения уровня в точках 8, 14, 28, 30 - 33.

Эти рисунки, в частности, показывают, что станции в точках 31-33, в целом, улучшают ситуацию с заблаговременностью предупреждений о цунами для пунктов 8 и 12, однако 27-минутная изохрона (граница ГЗМ) пункта 8 (рис 95) располагается довольно близко к побережью Японии между станциями в точках 32 и 33, а граница ГЗМ пункта 12 (рис 96) - между станциями в точках 31 и 32. Источники цунами в этих местах могут пересекать соответствующие границы ГЗМ и, следовательно, в этих случаях, гидрофизические прогнозы цунами в соответствующие населенные пункты будут доставлены незаблаговременно. Улучшить ситуацию можно путем дальнейшего увеличения числа морских станций измерения уровня моря.

Рисунки 97 - 100 показывают, что пункты, плохо обеспеченные заблаговременными гидрофизическими прогнозами цунами прибрежными уровенными станциями в точках 8, 12, 14, 28, с привлечением морских станций обеспечиваются ими при любом положении источника в пределах рассматриваемой цунамигенной зоны.



Рис 97 Изолинии разностей времен добегания цунами до пунктов 4 - 7 и станций в точках 8, 12, 14, 28, 30 - 33.



Рис 98 Изолинии разностей времен добегания цунами до пунктов 9 - 11 и станций в точках 8, 12, 14, 28, 30 - 33.



Рис 99 Изолинии разностей времен добегания цунами до пунктов 15 - 21 и станций в точках 8, 12, 14, 30 - 33.



Рис 100 Изолинии разностей времен добегания цунами до пунктов 24 - 27 и станций точках 8, 12, 14, 30 - 33.

Предложенный нами вариант расстановки станций измерения уровня моря не является единственным, в строгом смысле оптимальным, то есть минимизирующим площадь пересечения цунамигенной зоны и коллективной ГЗМ для всех рассматриваемых населенных пунктов. Разработка такого оптимального плана предусматривает, помимо отыскания безусловно наилучших мест установки прибрежных уровенных станций, оптимальную расстановку морских уровенных станций по отношению к каждому из рассматриваемых пунктов в отдельности. Мы же отбросили те пункты, чьи СЗМ пересекают цунамигенную зону. Далее, пользуясь тем, что оставшиеся пункты находятся в существенно различных, в смысле получения заблаговременных предупреждений о цунами, условиях, мы выделили наименее обеспеченные такими предупреждениями (пункты 8, 12, 14), и по отношению к некоторым из них (пункты 8 и 14) осуществили оптимизацию расстановки уровенных станций. В результате получен некий вариант (один из многих возможных) размещения уровенных станций, удовлетворяющий требованию заблаговременности гидрофизичеких прогнозов цунами для всех населенных пунктов, чьи СЗМ не пересекаются с цунамигенной зоной, при произвольном расположении источника в пределах цунамигенной зоны.

3.5. Выводы

Как это видно из настоящей главы, действующая российская СПЦ, в соответствии с существующими временными нормативами, не всегда в состоянии обеспечить прикрываемые населенные пункты заблаговременными прогнозами цунами, полученными по данным сейсмологических наблюдений. Если ограничиться только относительно крупными населенными пунктами, в неблагоприятной географической ситуации (в смысле получения заблаговременных предупреждений о цунами по данным сейсмических наблюдений) находятся поселки Усть-Камчатск и Никольское на Камчатке и о-ве Беринга, поселок Буревестник и село Малокурильское, а также располагающееся рядом село Крабозаводское на Курилах, поселок Томари и города Чехов, Холмск и Невельск на Сахалине. Подчеркнем еще раз, что, для заблаговременного предупреждения о цунами перечисленных пунктов, существующих возможностей российской СПЦ может оказаться недостаточно. Поэтому необходимо предусмотреть, как минимум, какой-то нестандартный режим работы СПЦ (а, возможно, и местных штабов по ГО и ЧС) при возникновении сильного землетрясения вблизи них.

Пунктов, находящихся в неблагоприятной географической ситуации, конечно, гораздо больше, чем перечислено но, в целом, они дают представление о наиболее неблагоприятных районах побережий. К таким неблагоприятным районам относятся участок в окрестности бухты Русская, побережья мысов Шипунский, Кроноцкий и Африка, практически все побережье Камчатского залива на Камчатке и обоих Командорских островов, побережье центральных Курильских островов и юго-западное побережье острова Сахалин (к югу от поселка Томари). При планировании нового строительства крупных близбереговых объектов в указанных районах побережий должен быть предусмотрен и комплекс специальных мер по их прикрытию от цунами.

Как и следовало ожидать, возможности использования для оперативного прогноза цунами данных гидрофизических наблюдений в случае близких источников довольно ограничены. Так на Камчатке и Курильских островах ни при каком числе уровенных станций невозможно обеспечить заблаговременный гидрофизический прогноз цунами для всего побережья подрегиона сразу. Гидрофизический прогноз почти всегда будет незаблаговременным для ближайших к источнику побережий. Приятное исключение составляют лишь отдельные участки рассмотренного побережья в регионе ответственности российской СПЦ. К ним относятся почти все камчатское побережье Берингова моря, которое можно, в частности, прикрыть с помощью единственной уровенной станции, расположенной вблизи острова Карагинский, город Северо-Курильск и поселок Байково, которые можно прикрыть с помощью трех уровенных станций, поселок Южно-Курильск, прикрываемый наблюдениями в Буревестнике и на малой Курильской гряде, и населенные пункты по берегам Японского моря и Татарского пролива, за исключением уже названных, чьи СЗМ пересекают япономорскую цунамигенную зону. Для прикрытия побережий Японского моря, относящихся к региону ответственности Российской СПЦ, потребуется 4 прибрежные уровенные станции и 4 морских.

Необходимо отметить, что точность расчетов времен добегания цунами до различных точек акватории и их разностей очень сильно зависит от шага (и точности) оцифровки батиметрических карт. Связь между погрешностью вычислений времен и шагом оцифровки пока не изучена. Поэтому полученные результаты и сделанные здесь выводы необходимо рассматривать как сугубо предварительные.

Наличие в зоне ответственности Российской СПЦ населенных пунктов, чьи СЗМ пересекаются с цунамигенной зоной, требует включения в состав СПЦ дополнительных сейсмических станций вблизи этих пунктов (в самих пунктах), с особым регламентом работы, имеющих право и возможность подавать тревогу цунами автономно, когда вероятный источник цунами находится на расстояниях менее 300 км от нее. Оснащение таких станций должно позволить им выдавать тревожное сообщение о цунами автономно (по данным собственных наблюдений) не позднее, чем через 1 минуту, после регистрации максимума поперечной волны.

Глава 4 Цунами как макросейсмический эффект подводного землетрясения.

Как известно, минимальная информация о землетрясении, по который, как правило, осуществляется оперативный прогноз цунами, включает в себя данные о положении его эпицентра и магнитуде. Широко известные корреляционные соотношения, связывающие магнитуду землетрясения и высоту волн цунами на ближайшем побережье или их интенсивность (эти и другие подобные соотношения приводятся и детально обсуждаются, в частности, в [Соловьев, 1972, Го, 1987]) не используются в практике оперативного прогноза цунами из-за большого рассеивания коррелируемых величин. В этой главе мы, получаем несколько формул для прогноза начальной высоты цунами на ближайших к источнику берегах по известным положению эпицентра землетрясения, магнитуде и глубине очага землетрясения, используя и развивая предположение о связи макросейсмического эффекта землетрясения (интенсивности сотрясений в эпицентральной области) с его цунамигенностью.

Из определения понятия интенсивности цунами [Соловьев, 1972] непосредственно вытекает, что эта величина характеризует цунами аналогично тому, как ощущаемость сотрясений, выраженная в единицах соответствующей макросейсмической шкалы, характеризует землетрясение. (И интенсивность цунами, и интенсивность сотрясений при землетрясении пропорциональны логарифму, соответственно, максимального или среднего заплеска волны цунами на ближайшем к источнику побережье и максимальной амплитуде смещения, скорости или ускорения в сейсмической волне).

В работе [Поплавская, 1977] показано, что источники опасных волн цунами с интенсивностью i≥0, возникающих в пределах Курило-Камчатской эпицентральной зоны, представляют собой область сотрясений не менее 9 баллов по шкале MSK-64 и оконтуриваются наилучшим образом, соответственно, изосейстой 9-10 балла. Таким образом достаточно убедительно обосновывается предположение о тесной связи между способностью землетрясения вызвать волны цунами большой интенсивности и силой сотрясений в пределах его эпицентральной области. При этом в качестве порога цунамиопасности землетрясения по максимальной бальности было бы естественно принять значение J₀ = 9 баллов.

Максимальный балл сотрясений при землетрясении определяется двумя основными параметрами - магнитудой М и глубиной очага h. Если принять, что цунами есть не что иное, как специфический макросейсмический эффект подводного землетрясения, то естественно предположить, что и упомянутое выше большое рассеивание, характерное для корреляционных соотношений, связывающих магнитуду землетрясения и интенсивность цунами, обуславливается не только стохастической природой этой связи, но и детерминированным влиянием не учитываемого параметра - глубины очага. Не углубляясь в вопросы физического содержания такой связи, можно попытаться использовать уже существующие формулы макросейсмического поля для получения самого раннего прогноза высоты волны цунами на ближайших к источнику берегах.

4.1. Вероятность возбуждения цунами землетрясением произвольной магнитуды как вероятность возникновения в его эпицентре 9-балльных сотрясений.

В работе [Соловьев, 1972] в числе многих других исследуется вопрос о "вероятности возбуждения цунами землетрясением произвольной магнитуды". Фактически речь идет о форме интегрального распределения магнитуды цунамигенных землетрясений и показывается, что она удовлетворительно аппроксимируется нормальной кривой. В случае землетрясений, принадлежащих эпицентральным зонам, примыкающим к островным дугам со стороны океана, ее параметры имеют значения: \overline{M} =7.75, σ =0.25. При этом вероятность возбуждения цунами землетрясением близка к нулю при магнитуде 7 или менее и - к единице при магнитуде 8.5 или более.

Если принять, что волны цунами возникают лишь при достижении определенной интенсивности сотрясений в эпицентре $J_0 \ge Jt$, то вероятность возникновения цунами должна совпадать с вероятностью возникновения в эпицентре таких сотрясений. Последняя, как функция магнитуды, может быть оценена при различных значениях Jt для той или иной эпицентральной зоны независимо. Совпадение ее при каком-то фиксированном значении Jt с кривой распределения магнитуд цунамигенных землетрясений явится дополнительным подтверждением существования связи между цунамигенностью землетрясения и интенсивностью сотрясений в его эпицентре. При этом определится и значение макросейсмического порога цунамигенности (цунамиопасности).

Интенсивность сотрясений J при тихоокеанских землетрясениях вблизи Курильских островов выражается через магнитуду M, глубину очага h и эпицентральное расстояние Δ следующим образом

$$J = mM - p \cdot \lg h + q, \tag{4.1}$$

где $r = \sqrt{\Delta^2 + \hbar^2}$, коэффициенты m, p, q - эмпирические константы, которые для Курильских островов равны соответственно 1.5, 4.5, 4.5 [Новый каталог..., 1977]. Сила сотрясений в эпицентре землетрясения (Δ =0)

$$J_{o} = mM - p \cdot \lg h + q, \qquad (4.1a)$$

Положив J₀≥Jt и используя последнее соотношение, получим условие, которому должны удовлетворять магнитуда и глубина очага землетрясения, чтобы максимальный балл сотрясений в его эпицентре был не ниже Jt:

$$mM - p \cdot \lg h + q \ge Jt . \tag{4.2}$$

При фиксированной магнитуде из последнего условия определяется интервал глубин очага землетрясения, ему удовлетворяющий

$$0 < h \le h_{\max} \tag{4.3}$$

$$lg h_{max} = \frac{mM - Jt + q}{p}.$$
(4.4)

Если теперь предположить, что землетрясение любой магнитуды может произойти на любой глубине в области их существования с равной вероятностью, то вероятность того, что сила сотрясений в эпицентре землетрясения с магнитудой М будет не ниже Jt должна совпасть с вероятностью попадания его фактической глубины в интервал (4.3). Последнюю можно оценить, воспользовавшись каким-либо выборочным эмпирическим распределением глубин.



С 101 Гистограмма плотности эмпирического распределения глубин очагов Курило-Охотских землетрясений, происшедших в 1987 году на глубинах h < 200 км.

В качестве исходной для дальнейших расчетов нами была взята выборочная функция распределения глубин очагов Курило-Охотских землетрясений, происшедших в 1987 году, по данным ежегодника [Землетрясения с СССР в 1987 году, 1990], показанная на рис. 101.

Она построена с шагом Dh=10 км (использование меньшего шага нецелесообразно из-за недостаточной точности определения этой величины). Абсолютное большинство Курило-Охотских землетрясений происходит на глубинах менее 100 км. Распределение глубин в этом интервале чрезвычайно устойчиво и имеет ярко выраженный максимум на глубинах $40 \le h < 50$ км, сохраняющийся на протяжении всего периода инструментальной регистрации землетрясений в этом районе.

Вероятность попадания глубины очага в интервал $h \leq h_{max}(M, Jt)$, при фиксированных M и Jt, оценивалась как отношение числа событий, удовлетворяющих этому (4.3) условию к полному числу событий, имевших место на глубинах

 $h \le h_{\max}$ (M = 8.75, Jt). Таким образом оценивалась условная вероятность попадания глубины очага землетрясения в тот или иной интервал, удовлетворяющий условию (4.3), при условии, что его глубина оказалась меньше предельной для выбранного значения Jt при максимальной возможной магнитуде. В случаях, когда правые границы этих интервалов не совпадали с целым числом шагов Dh дискретизации эмпирического распределения, доля событий, приходящихся на интервал dh < Dh, принималась пропорциональной отношению длин этих интервалов.



Рис. 102 Интегральная функция распределения магнитуд цунамигенных землетрясений, происходящих в районах островных дуг [Соловьев, 1972] -(1) и интегральные функции вероятности достижения в эпицентре сотрясений силой не менее 8 - (2), 9 - (3), 10 - (4) баллов.

На рис 102 показаны полученные в таким образом вероятности достижения в эпицентре сотрясений силой $J_0 \ge Jt$ при трех значениях Jt = 8, 9 и 10 баллов. Там же показана нормальная кривая "вероятности возбуждения землетрясением произвольной магнитуды" (интегральная функция распределения магнитуды цунамигенных землетрясений) из [Соловьев, 1972]. Наилучшее согласие этой кривой с зависимостью P(M/J₀≥Jt) достигается, когда Jt = 9 баллов.

Таким образом, выводы [Поплавская, 1980] о связи цунамигенности (цунамиопасности) подводных землетрясений с максимальной интенсивностью сотрясений, вызываемых ими в эпицентральной области, получила независимое подтверждение. Воспользуемся теперь корреляционными соотношениями [Соловьев, 1972], связывающими интенсивность цунами со средней высотой волны вблизи источника η и с магнитудой землетрясения:

$$i = 0.5 + \log_2 \eta \tag{4.5}$$

$$i = 2.58M - 19.2, \tag{4.6}$$

а также логарифм энергии цунами Et (измеряемой в джоулях) с его интенсивностью

$$\lg Et = 13.5 + 0.78i. \tag{4.7}$$

Исключая, формально, из приведенных соотношений интенсивность цунами, получим выражения связи средней максимальной высоты и энергии цунами в зависимости от магнитуды землетрясения:

$$\lg \bar{\eta} = 0.78M - 5.93$$

$$\lg Et = 2M - 1.5.$$
(4.8)

Пользуясь приведенными соотношениями мы можем оценить значения средней высоты волны, интенсивности и энергии цунами, соответствующие центру распределения магнитуд цунамигенных землетрясений: i = 0.8, $\eta = 1.2$ м, $\log Et = 14$. Из формулы (4.4) находим соответствующую максимальную глубину очага, при которой сила сотрясений составляет не менее 9 баллов, - hmax = 38 км. Это значение хорошо согласуется со значением наивероятнейшей глубины очага в Курило-Камчатской эпицентральной зоне равным 40 км. На этом основании мы делаем предположение о том, что форма начального возвышения в источнике цунами определяется, в основном, интенсивностью сотрясений в эпицентральной области землетрясения и что значительные отклонения наблюдаемых высот волн вблизи источника и интенсивности цунами от средних при фиксированной магнитуде объясняются, прежде всего, влиянием *глубины очага* землетрясения. Формулы же (4.8) могут быть использованы для самого раннего прогноза высоты вблизи источника и энергии цунами. При этом необходимо помнить, что они будут относиться к наиболее вероятной для островных дуг глубине очага землетрясения.

В макросейсмических исследованиях используются представления о макросейсмическом источнике, как области максимальных сотрясений в виде эллипса, размеры полуосей которого a₀, b₀ которого согласно [Поплавская, 1977] определяются через длину разлома в очаге землетрясения l₀ и его магнитуду и глубину следующими корреляционными формулами. Длина разлома l₀ в очаге землетрясения

$$\lg l_0 = 0.5 \cdot M - 1.8 \tag{4.9}$$

большая и малая полуоси эллипса

$$a_0 = \frac{l_0 + 2h}{2}$$

$$b_0 = h$$

$$(4.10)$$

И максимальный балл сотрясений силой J_0 приписывается каждой точке площади, ограниченной рассматриваемым эллипсом. Если мы допустим, что основная часть начальной энергии цунами сосредоточена в пределах определенной формулами (4.9), (4.10) области, при условии, что $J_0 \ge 9$, а начальное возвышение представляет собой половину эллипсоида с полуосью c0, опирающегося на этот эллипс, то получим возможность оценить начальную высоту цунами (воспользовавшись формулой для потенциальной энергии эллипсоидального возвышения) как:

$$c_0 = 2\sqrt{\frac{Et}{\pi\rho g \cdot a_0 \cdot b_0}}, \qquad (4.11)$$

где ρ - плотность воды, а g - земное ускорение. Подставляя в эту формулу значения Et, a_0 , b_0 , соответствующие центру распределения магнитуд цунамигенных землетрясений ($\overline{M} = 7.75$, $\overline{h_{max}} = 38$ км), получим значение $\overline{c_0} = 1.9$ м, которое несколько больше полученной выше оценки высоты волны на берегу вблизи источника (в источнике) $\overline{\eta} = 1.2$ м. Это связано с тем, что, при вычислении $\overline{c_0}$, мы предполагали, что вся начальная энергия цунами сосредоточена в пределах площадки, ограниченной эллипсом с полуосями a_0 , b_0 , по-видимому, не совсем правильно.

На основании вышеизложенного можно рекомендовать два варианта быстрой оценки опасности цунами для ближайших к источнику побережий Курильских островов и, возможно, Камчатки и Приморья в случае возникновения местного сильного землетрясения. Первый вариант - оценка средней высоты цунами по первой из формул (4.8) для наиболее вероятного значения глубины очага землетрясения h=40 км. Второй - оценка c_0 из (4.11), где в качестве глубины очага (в формулах (4.10)) следует принимать максимальную при данной магнитуде "цунамиопасную" глубину, вычисляемую по (4.4), где, в свою очередь, Jt принимается равным 9 баллам.

Наконец, пользуясь имеющимися вычислительными средствами и соответствующими программами, можно промоделировать процесс распространения цунами от эллипсоидального источника, параметры которого определяются соотношениями (4.9) -(4.11) и, тем самым, дать прогнозную оценку высоты волны цунами в конкретных населенных пунктах.

4.2. Определение вида зависимости начальной высоты цунами от магнитуды и глубины очага землетрясения.

Приняв гипотезу о том, что цунами есть макросейсмический эффект землетрясения, естественно, далее, предположить, что связь между начальной высотой и формой

начального возвышения в источнике цунами с основными макросейсмическими параметрами землетрясения имеет непрерывный характер. На основании аналогии формул (4.1), (4.1a) и (4.5)-(4.7), выражающейся в том, что безразмерные характеристики очага землетрясения и источника цунами (магнитуда, интенсивность сотрясений, интенсивность цунами) линейно связаны с логарифмами размерных величин (глубина очага, эпицентральное расстояние, высота и энергия волны цунами), мы предполагаем, что логарифм высоты начального возвышения в произвольной точке акватории пропорционален интенсивности сотрясений дна в той же точке:

$$\lg \eta = A + BJ \tag{4.12}$$

Максимальная высота начального возвышения (в эпицентре), соответственно, равна

$$\lg \eta_0 = A + BJ_0. \tag{4.12a}$$

Тогда, с учетом (4.1), общий вид зависимости начальной высоты цунами от магнитуды и глубины очага землетрясения неизбежно будет следующим

$$\lg \eta = a - b \lg r + kM , \qquad (4.13)$$

где a = A + Bq, b = Bp, k = Bm неизвестные нам коэффициенты, содержащие эмпирические макросейсмические константы m, p и q, r - гипоцентральное расстояние точки, M -магнитуда землетрясения. Максимальная высота волны будет соответствовать максимальным сотрясениям, когда r=h глубине очага землетрясения:

$$\lg \eta_0 = a - b \lg h + kM . \tag{4.13a}$$

В координатах η_0 , М последняя будет представлять собой совокупность параллельных прямых с угловым коэффициентом k, начальная ордината которых определяется глубиной очага.

Значения неизвестных коэффициентов естественно определять из соответствующих данных наблюдений, наиболее доступная для нас сводка которых содержится в [Го, 1987]. Она составлена по данным известных каталогов и ряда индивидуальных описаний цунами (ссылки можно найти в самой работе) и отличается от аналогичных сводок других авторов тем, что в ней в качестве величины, характеризующей интенсивность цунами взят средний логарифм высоты заплеска цунами на ближайших к источнику берегах в отличие от логарифма среднего значения высоты заплеска, как это делалось ранее. Как убедительно показывает автор цитируемой работы, именно эта величина ("средне-логарифмическая высота") является несмещенной оценкой высоты начальной денивелляции уровня в источнике цунами. Это обстоятельство было последовательно учтено автором при определении максимального возвышения в источниках и энергии индивидуальных цунами. Сводка содержит данные о 56 цунами, проявившихся на побережьях Японии и Курильских островов (рис 103а, в виде точек).

Эта сводка, как впрочем и другие аналогичные, не содержит данных о глубинах очагов землетрясений, поэтому мы использовали не стандартную (и не вполне строгую) процедуру при отыскании коэффициентов в выражении (4.13.а).

Так, в дальнейшем анализе эмпирических данных нами существенно использованы следующие, достаточно сильные допущения. Во-первых, мы полагаем что произвольная выборка данных наблюдений $\eta_0(M)$ является случайной выборкой реализаций зависимостей вида (4.13а), где глубина очага неизвестна, но подчинена закону распределения типа изображенного на рис. 101 с наиболее вероятным значением глубины очага землетрясения, близким к его среднему выборочному значению h=40км. Вовторых, мы допускаем, что именно глубина очага, а не случайные ошибки оценок магнитуды и высоты цунами в источнике, является главной причиной рассеивания эмпирических точек. При сделанных допущениях наилучшей аппроксимацией зависимости вида (4.13a) для наиболее вероятной глубины h = 40 км будет ортогональная регрессия [Линник, 1958] между переменными η_0 и M, построенная по всем данным выборки (ортогональная регрессия это прямая, отыскиваемая из условия минимума суммы квадратов расстояний эмпирических точек от искомой прямой вдоль нормали к ней). Угловой коэффициент такой регрессии, будет оценкой углового коэффициента k в выражении (4.13а) и другие коэффициенты этого выражения можно получить из очевидных соотношений (которые выводятся из выражений (4.12) - (4.13а)):

$$b = \frac{k}{m}p \quad , \quad a = \overline{\lg \eta_0} + b \lg 40 - k \overline{M} \quad , \tag{4.14}$$

где $\overline{\lg \eta_0}$ и \overline{M} средние выборочные значения соответствующих переменных.

Действуя по вышеописанной схеме, с использованием эмпирического материала, содержащегося в [Го, 1987], мы получили следующие значения искомых коэффициентов: a=-4.307, b = 4.356, k = 1.452 и зависимость начальной высоты цунами от магнитуды и глубины очага для Курило-Японских землетрясений будет выглядеть так

$$\lg \eta_0 = -4.307 - 4.356 \lg h + 1.452M \tag{4.15}$$



- Рис 103 а. Эмпирические данные о (средне-логарифмических) высотах цунами в источнике в зависимости от магнитуды землетрясения и аппроксимирующие зависимости вида (4.15) для значений глубины h = 20, 30, 40, 50, 60 и 70 км. В качестве опорной зависимости log $\eta_0(M, h = 40$ км) принята прямая ортогональной регрессии, коэффициенты которой найдены по всем приведенным на рисунке эмпирическим данным для которых M ≥ 7.0. Точка в виде звездочки отвечает среднему значению магнитуды и соответствующей высоты в источнике цунами в независимой выборке, использованной в [Соловьев, 1972]. Пунктирная линия (1) представляет зависимость (4.15), соответствующую значениям $\overline{M} = 7.75, \ \eta_0 = 1.2 \ mmodel{max}, \ h = 38$ км. Пунктирная линия (2) представляет зависимость с0[M, h_{max}(M)], полученную по формулам (4.4), (4.8) (4.11).
 - **б.** Гистограмма функции плотности распределения глубин очагов землетрясений, представленных на рис 4.3а в виде точек, при условии справедливости соотношений (4.15).

Найденная зависимость изображена на рис 103а в виде совокупности сплошных прямых линий, соответствующих глубинам h = 10, 20, 30, 40, 50, 60 и 70 км. Напомним, что прямая для h = 40 км есть прямая ортогональной регрессии, построенная по всем данным (для землетрясений с магнитудой $M \ge .7.0$).

Проконтролировать справедливость этой зависимости на имеющемся у нас материале наблюдений (когда глубины очагов землетрясений нам неизвестны, но известен только вид их функции распределения) мы можем лишь косвенно следующим образом.

Во первых, у нас есть среднее значение магнитуды $\overline{M} = 7.75$ цунамигенного землетрясения, найденное по независимому материалу наблюдений для островных дуг в [Соловьев, 1972] и соответствующее ему, согласно первой формуле (4.8) значение $\overline{\eta_0} = 1.2$ м, не совпадающие с соответствующими средними значениями использованной здесь выборки [Го, 1987] ($\overline{M}_{\Gamma_0} = 7.5$, $\overline{\lg \eta}_{0,\Gamma_0} = -0.40$). Если, однако, центр распределения неизвестных нам глубин очагов землетрясений в выборке, использованной в [Соловьев, 1972], приходится на значение h = 40 км, а коэффициент при M в (4.15) соответствует действительности, то точка с вышеуказанными координатами должна лежать на прямой вида (4.15) для h = 40 км или достаточно близко к ней.

Во вторых, при тех же условиях, что и выше, зависимость вида (4.15), построенная для $\overline{M} = 7.75$, $\overline{\eta_0} = 1.2$ м и глубины $\overline{h} = 38$ км должна быть близкой к искомой ортогональной регрессии.

В-третьих, зависимости вида (4.15) позволяют легко рассортировать эмпирические точки по предполагаемым глубинам очагов. Получающееся распределение, изображенное на рис 103б, должно иметь те же главные особенности, что и распределение на рис 101.

Как это можно видеть из приведенных рисунков все три требования хорошо удовлетворяются. Это позволяет надеяться на то, что изложенные в данном разделе представления о связи макросейсмической интенсивности землетрясения и максимальной высоты цунами в источнике достаточно близки к действительности, и формулу (4.15) также можно использовать в оперативной работе службы предупреждения о цунами.

4.3. Геометрия макросейсмического источника цунами и начальная энергия цунами.

Будем полагать, что разлом в сейсмическом очаге представляет собой вытянутый горизонтально прямолинейный отрезок длиной *l*, располагающийся на глубине h под поверхностью земли, а сила сотрясений в произвольной точке поверхности земли определится исключительно влиянием ближайшей к ней точки разлома. Введем прямоугольную систему координат x,y с началом в середине проекции отрезка l на земную
поверхность, ось Ох направим параллельно этому отрезку, а ось Оу перпендикулярно ему. В этом случае максимальная высота начального возвышения в источнике цунами, согласно нашей гипотезе, будет определяться выражением (4.13), в котором аргумент г связан с только что введенными координатами х,у соотношениями

$$r = \sqrt{\Delta^2 + h^2}, \qquad (4.16)$$
$$\Delta = \pm y \quad \text{при} \quad -\frac{l}{2} \le x < \frac{l}{2}$$

где

$$\Delta = \sqrt{\left(x + \frac{l}{2}\right)^2 + y^2} \quad при \quad x < -\frac{l}{2}$$
$$\Delta = \sqrt{\left(x - \frac{l}{2}\right)^2 + y^2} \quad при \quad x \ge \frac{l}{2}.$$

Здесь Δ - горизонтальное расстояние между текущей точкой плоскости и ближайшей к ней точкой разлома (эпицентральное расстояние текущей точки плоскости).Форма изолинии начальной высоты цунами η показана на рис.104. Максимального значения η_0 , определяемого соотношением (4.13а), высота начального возвышения достигает на отрезке $-\frac{l}{2} \le x < \frac{l}{2}$, y = 0.



Рис. 104. Форма изолинии начальной высоты в макросейсмическом источнике. Площадь горизонтального сечения источника, очевидно, равна $S = 2l\Delta + \pi\Delta^2$.

Из соотношений (4.13, 4.13а) легко получаем зависимость начального возвышения, отнесенного к максимальному, от эпицентрального расстояния Δ/h.

$$\frac{\eta_0}{\eta_{\text{max}}} = \left(\sqrt{\frac{\Delta^2}{h^2} + 1}\right)^{-b} \tag{4.17}$$

Эта зависимость показана на рис 105.



Рис 105. Зависимость относительной высоты начального возвышения $\frac{\eta_0}{\eta_{\max}}$ в макросейсмическом источнике цунами от относительного эпицентрального расстояния $\frac{\Delta}{h}$.

Пользуясь последним выражением можно оценить энергию цунами как потенциальную энергию такого возвышения в виде

$$E = \rho g \int_{0}^{\eta_{\text{max}}} S(\eta) \eta d\eta \qquad (4.18)$$

где ρ - плотность воды, g - ускорение силы тяжести и $S = 2l\Delta + \pi\Delta^2$ - площадь горизонтального сечения начального возвышения (см рис 104), где, в свою очередь,

$$\Delta = h_{\sqrt{\left(\frac{\eta_0}{\eta_{\max}}\right)^{\frac{2}{b}} - 1}}.$$

Как видно из этих выражений, энергия цунами от макросейсмического источника в конечном счете зависит от длины разлома в очаге (другими словами - от магнитуды) и глубины очага землетрясения. Весьма интересно, как она согласуется с эмпирическими данными [Го, 1987]. Соответствующее сопоставление показано на рис 106а. Энергия цунами от макросейсмического источника определялась путем численного интегрирования (4.17), соответствующие зависимости E(M,h) показаны на рисунке сплошными линиями для значений h = 10, 20, 30, 40, 50, 60, и 70 км. Независимые данные используемой сводки показаны точками.



Рис 106а. Эмпирические данные о логарифмах энергии цунами в зависимости от магнитуды и аппроксимирующие их зависимости вида (4.17) для глубин очагов h = 10, 20, 30, 40, 50, 60 u 70 км. Точка (1) в виде звездочки соответствует средним значениям магнитуды землетрясения и энергии цунами по выборке [Го, 1987], точка (2) соответствует средним значениям этих величин для районов, примыкающим к островным дугам, по [Соловьев, 1972]

б. Гистограмма функции плотности распределения глубин очагов землетрясений при условии, что соотношение (4.17) справедливо.

Из рис 106а видно, что абсолютное большинство эмпирических точек концентрируется вблизи зависимостей вида (4.17) для глубин $20 \le h <70$ км (из указанного интервала выпадает только одна точка). Точка (1), соответствующая центру используемой здесь выборки попадает прямо на указанную зависимость, соответствующую глубине очага h = 40 км. Заметим, что зависимость вида (4.17) вычислялась без использования данных об энергии цунами, представленных на этом рисунке. Точка (2), соответствующая центру независимой выборки [Соловьев, 1972], находится между зависимостями вида (4.17) для глубин очага h = 30 и 40 км. Наконец, гипотетическая гистограмма функции плотности распределения глубин очагов землетрясений, построенная с помощью зависимостей вида (4.17) и изображенная на рис 1066, имеет максимум при глубине очага h = 40 км. Таким образом, и данные об энергии цунами неплохо согласуются с предположением о существовании линейной связи между логарифмом начальной высоты в источнике цунами и интенсивности сотрясений.

4.4. Выводы

В результате проделанной работы появилось несколько возможностей для самой ранней прогностической оценки высоты цунами в источнике и на ближайших к нему берегах.

Первая из них состоит в использовании соотношения (4.8), формально вытекающего из соотношений (4.5) - (4.7) [Соловьев, 1972]. Высота цунами вычисляется как функция одной магнитуды. Ее можно интерпретировать как наиболее вероятную для островных дуг (при глубине очага землетрясения h = 40 км).

Вторая возможность существенно базируется на предположении, что заметные волны цунами возникают лишь в тех случаях, когда сила сотрясений в эпицентральной области больше или равна 9 баллам. Предельная глубина очага землетрясения, на которой достигается такая сила сотрясений является функцией его магнитуды и определяется соотношением (4.4) при Jt = 9 баллам. В качестве оценки высоты цунами в источнике можно воспользоваться величиной с₀, определяемой соотношением (4.11) как малой полуоси эквивалентного по энергии источника цунами. Энергия, в свою очередь, оценивается из (4.8).

Наконец, третья возможность, основе которой лежит предположение о непрерывной зависимости начального возвышения в источнике цунами от силы вызываемых землетрясением сотрясений состоит в использовании соотношений (4.15) - (4.17). При M < 7.8 для оценки "цунамигенной" глубины очага необходимо пользоваться соотношением (4.4). Когда же $M \ge 7.8$ глубину следует принимать равной ее наивероятнейшему значению h = 40 км.

Все эти возможности еще предстоит проверить на доступном эмпирическом материале.

Предположение о связи начального возвышения в источнике цунами с силой сотрясений, вызываемых землетрясением влечет за собой необходимость изучения вопроса о возможной физической природе этой связи. Простейшее ее объяснение может состоять в том, что поле модуля остаточных смещений при землетрясении, в целом, имеет положительную корреляцию с его макросейсмическим эффектом. Такая связь, насколько нам известно, сейчас не установлена, хотя ее наличие достаточно очевидно. Было бы интересно выяснить этот вопрос, так как отсутствие тесной корреляции между макросейсмическим эффектом и полем модуля остаточных смещений будет ясно указывать на существование в природе пока не изученного исследователями механизма возбуждения цунами, который можно было бы назвать вибрационным.

Глава 5. Способ оперативного прогноза цунами по данным удаленных уровенных станций.

5.1. Общие соображения.

В теориях излучения и рассеяния волн различной природы известен принцип взаимности [Бабич, 1962, Ландау, Лифшиц, 1986, Петрашень, 1978, Тюрин, 1972, Урик, 1978, Фелсен, 1978, Шендеров, 1972], опирающийся на наиболее общие свойства волн. В частности, в акустике этот принцип используется при градуировке гидрофонов [Урик, 1978] и заключается в следующем. Сигнал (давление, массовая скорость) акустического излучателя, помещенного в точку А, измеренный в точке В, равен сигналу в точке А, если излучатель переместить в точку В.

При использовании излучателей одинаковой частоты, отличающихся размерами и интенсивностью излучения, принцип взаимности можно выразить соотношением

$$p_A(B) \cdot Q_B = p_B(A) \cdot Q_A, \tag{5.1}$$

где: $p_A(B)$ - давление, создаваемое в точке В излучателем, помещенным в точку А, Q_A - интенсивность (производительность) излучателя, помещенного в точку А, $p_B(A), Q_B$ - то же для излучателя, помещенного в точку В.

Принцип взаимности справедлив для линейных процессов в неоднородной среде при наличии отражающих и поглощающих границ. Приведенное выше соотношение (5.1) справедливо для источников, размеры которых малы по сравнению с длиной излучаемой волны, и на расстояниях, больших по сравнению с длиной волны [Ландау, Лифшиц, 1986; Тюрин, 1971].

Длинные волны на "мелкой воде", как и акустические, подчиняются волновому уравнению. Поэтому для гармонических длинных волн справедливость принципа взаимности не вызывает сомнений. Естественно предположить, что и для волн цунами принцип взаимности в традиционной или видоизмененной форме может быть справедлив. Причина для сомнений заключается в том, что волны цунами являются нестационарными, представляющими собой волновой пакет с широким спектром. Кроме того, размеры источников цунами сравнимы с характерными длинами волн, и расстояния от источника до берегов нередко сравнимы с размерами источника.

Для предварительной проверки предположения о справедливости принципа взаимности (5.1) для волн цунами, с помощью имеющегося у нас программного комплекса были выполнены расчеты для модельного квадратного бассейна с размерами 500х500 км. Одна половина бассейна имела глубину D_1 = 400 м, другая - D_2 = 100 м (рис.107). В середине бассейна был помещен прямоугольный "остров", т.е. область с граничным условием равенства нулю нормальной составляющей скорости. На границах бассейна выполнялось условие свободного ухода волны. Начальное возмущение выбиралось в виде половины кругового эллипсоида с радиусом в горизонтальной плоскости R_2 = 75 км в той части бассейна, в которой глубина равна 400 м. Интенсивности источников выбирались равными, так что амплитуды *а* возмущений удовлетворяли условиям $a_1R_1^2 = a_2R_2^2$. Кроме того, соблюдалось условие $\frac{R_1}{\sqrt{gD_1}} = \frac{R_2}{\sqrt{gD_2}}$.





В предположении, что (5.1) справедливо для волн цунами, ожидалось совпадение формы волны, возбужденной в одной области и измеренной в центре другой области, с формой волны, для которой те же области играют противоположные роли.

На рисунке 108 приведены результаты расчетов. Изображены отклонения уровня воды от равновесного положения. Обозначения вида $\zeta_1(2)$ означают волну, возбужденную в области с центром в точке 1, измеренную в точке 2.

Особых комментариев рисунок не требует. Видно, что, несмотря на экранирование волны "островом" и небольшие расстояния между центрами источников по прямой (минимальное не более 300 км при сумме радиусов источников 115 км), по крайней мере для волн вблизи фронта получено хорошее совпадение ожидаемого результата с расчетным.

Предполагая, что принцип взаимности для волн цунами выполняется, если не точно, то в степени, достаточной для оценки опасности цунами для конкретных пунктов или участков побережья, выведем соотношения взаимности применительно к упомянутым волнам.



Рис 108 Форма волны $\zeta_i(K)$ от источника в точке K, рассчитанная в точке j

5.2. Вывод соотношений взаимности для нестационарных длинных волн.

Будем исходить из линейных уравнений "мелкой воды" для водоема с неоднородной глубиной, с возмущениями в виде начального возвышения свободной поверхности, начального распределения массовых скоростей и подвижного участка дна в некоторой области S₀ [Лаврентьев, Шабат, 1973]:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \vec{\nabla}(h\vec{u}) = -\frac{\partial h_0}{\partial t} ,$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + g \cdot \vec{\nabla} \eta = 0 .$$
(5.2)

Начальные условия в области S₀:

$$\eta /_{t=0} = \eta_0(x, y),$$

$$\vec{u} /_{t=0} = \vec{u}_0(x, y),$$

$$h_0 = h_0(t, x, y).$$

(5.3)

Граничные условия:

 $\eta = 0$ на бесконечно удаленной границе Γ_{∞} ,

 $\eta = 0$ на поглощающей границе Γ_1 , (5.4)

 $\vec{u}_n = 0$ на отражающей границе Γ_2 ,

 $u_n + \sigma \eta = 0$ на импедансной границе Γ_3 .

Здесь η - возвышение свободной поверхности,

 \vec{u} - массовая скорость,

*u*_n - нормальная к границе составляющая массовой скорости,

h - глубина воды,

 $h_0(t, x, y)$ - подвижка дна,

g - гравитационное ускорение,

 $\vec{\nabla} = \vec{e}_x \cdot \frac{\partial}{\partial x} + \vec{e}_y \cdot \frac{\partial}{\partial y} \ .$

Ввиду того, что волны цунами являются нестационарными, применим к системе (5.2) - (5.4) преобразование Лапласа по времени, после чего система преобразуется в следующую:

$$s\widetilde{\eta} + \vec{\nabla}(h\widetilde{\vec{u}}) = \eta_0 - s\widetilde{h}_0 ,$$

$$s\widetilde{\vec{u}} + g\vec{\nabla}\widetilde{\eta} = \vec{u}_0 .$$
(5.5)

В дальнейшем будем обозначать величины, относящиеся к источнику и точке измерения, следующим образом: ζ_A означает сигнал ζ , излученный из области A, в произвольной точке пространства; $\zeta_A(B)$ означает сигнал ζ , излученный из области A и измеренный в точке B. Знак "тильда", обозначающий образ Лапласа, опустим и в дальнейшем будем считать все переменные во времени величины образами Лапласа до специальной оговорки.

Исключая из системы (5.5) скорость \vec{u} , придем к преобразованному по Лапласу волновому уравнению с источником возмущений в области Σ_0

$$s^{2}\eta - g\vec{\nabla}(h\cdot\vec{\nabla}\eta) = -s^{2}h_{0} + s\eta_{0} - \vec{\nabla}(h\vec{u}_{0}).$$
(5.6)

Далее будем следовать выкладкам [Бреховских, Годин, 1989]. Пусть имеются две области источников Σ_T и Σ_X . Т обозначает эпицентр предполагаемого цунами, Х - оповещаемый пункт. Тогда уравнения типа (5.6) для каждого из источников запишутся следующим образом:

$$s^{2} \eta_{T} - g \cdot \vec{\nabla} (h \cdot \vec{\nabla} \eta_{T}) = -s^{2} h_{0T} + s \eta_{0T} - \vec{\nabla} (h \cdot \vec{u}_{0T}) ,$$

$$s^{2} \eta_{X} - g \cdot \vec{\nabla} (h \cdot \vec{\nabla} \eta_{X}) = -s^{2} h_{0X} + s \eta_{0X} - \vec{\nabla} (h \cdot \vec{u}_{0X}) .$$
(5.7)

Умножая первое из уравнений (5.7) на η_X , второе на η_T , вычитая одно из другого, получим

$$g\eta_T \cdot \vec{\nabla}(h \cdot \vec{\nabla}\eta_X) - g\eta_X \cdot \vec{\nabla}(h \cdot \vec{\nabla}\eta_T) =$$

= $-s^2(\eta_X h_{0T} - \eta_T h_{0X}) + s(\eta_X \eta_{0T} - \eta_T \eta_{0X}) - \eta_X \cdot \vec{\nabla}(h\vec{u}_{0T}) + \eta_T \cdot \vec{\nabla}(h\vec{u}_{0X}).$

Переход к дивергентной форме в левой части полученного уравнения дает

$$g\vec{\nabla}(\eta_{T}h\cdot\vec{\nabla}\eta_{X}) - g\vec{\nabla}(\eta_{X}h\cdot\vec{\nabla}\eta_{T}) =$$

$$= s^{2}(\eta_{T}h_{0X} - \eta_{X}h_{0T}) + s(\eta_{X}\eta_{0X} - \eta_{T}\eta_{0T}) + \eta_{T}\cdot\vec{\nabla}(h\vec{u}_{0X}) - \eta_{X}\cdot\vec{\nabla}(h\vec{u}_{0T}).$$
(5.8)

Проинтегрируем полученное соотношение по площади с границей $\Gamma = \Gamma_{\infty} + \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3$. Интеграл по площади от левой части равенства (5.8) преобразуется в интеграл по границе (*dl* - элемент длины дуги вдоль границы):

$$g \oint_{\Gamma} h \left[\eta_T \left(\frac{\partial \eta_X}{\partial x} dy - \frac{\partial \eta_X}{\partial y} dx \right) - \eta_X \left(\frac{\partial \eta_T}{\partial x} dy - \frac{\partial \eta_T}{\partial y} dx \right) \right] = \\ = -s \oint_{\Gamma} h \left(\eta_T u_{Xn} - \eta_X u_{Tn} \right) dl.$$

Полученный интеграл по Γ_{∞} и Γ_1 обращается в 0 в силу равенства нулю η_T и η_X на этих границах, интеграл по Γ_2 обращается в 0 в силу равенства нулю нормальной составляющей скорости на этой границе. Интеграл по Γ_3 преобразуется путем приведения подынтегрального выражения к импедансному виду:

$$-s\oint_{\Gamma_3} h \Big(\eta_T u_{Xn} - \eta_X u_{Tn} \Big) dl =$$

$$= -s\oint_{\Gamma_3} h \Big[\frac{1}{\sigma} \Big(u_{Tn} + \sigma \eta_T \Big) u_{Xn} - \frac{1}{\sigma} u_{Tn} u_{Xn} - \frac{1}{\sigma} \Big(u_{Xn} + \sigma \eta_X \Big) u_{Tn} + \frac{1}{\sigma} u_{Xn} u_{Tn} \Big] dl =$$

$$= -s\oint_{\Gamma_3} \frac{h}{\sigma} \Big[\Big(u_{Tn} + \sigma \eta_T \Big) u_{Xn} - \Big(u_{Xn} + \sigma \eta_X \Big) u_{Tn} \Big] dl = 0.$$

Таким образом, интеграл от левой части (5.8) равен нулю. Окончательно получаем:

$$s^{2} \iint_{S_{X}} \eta_{T} h_{0X} dS - s \iint_{S_{X}} \eta_{T} \eta_{0X} dS + \iint_{S_{X}} \eta_{T} \cdot \vec{\nabla} (h \vec{u}_{0X}) dS =$$

= $s^{2} \iint_{S_{T}} \eta_{X} h_{0T} dS - s \iint_{S_{T}} \eta_{X} \eta_{0T} dS + \iint_{S_{T}} \eta_{X} \cdot \vec{\nabla} (h \vec{u}_{0T}) dS$ (5.9)

До сих пор никаких упрощающих задачу предположений не делалось.

Предположим, что η_T в пределах области Σ_x изменяется слабо. Тогда η_T можно вынести за знак интеграла. Аналогично для η_X . В результате выражение (5.9) преобразуется в следующее -

$$\eta_T(X) \cdot \left[s^2 \iint_{S_X} h_{0X} dS - s \iint_{S_X} \eta_{0X} dS + \iint_{S_X} \vec{\nabla} (h \vec{u}_{0X}) dS \right] =$$
$$= \eta_X(T) \cdot \left[s^2 \iint_{S_T} h_{0T} dS - s \iint_{S_T} \eta_{0T} dS + \iint_{S_T} \vec{\nabla} (h \vec{u}_{0T}) dS \right].$$

Выражения в квадратных скобках характеризуют интенсивности источников. Обозначив их через Q_X и Q_T , получим соотношение

$$\eta_T(X) \cdot Q_X = \eta_X(T) \cdot Q_T, \tag{5.10}$$

по форме совпадающее с традиционным выражением принципа взаимности (5.1).

Выясним, каковы ограничения на функции $\eta_T(X)$ и $\eta_X(T)$, обусловленные нестационарностью процесса и неоднородностью среды.

При выводе классического соотношения взаимности предполагалось, что источники в X и T излучают волны одинаковой частоты и формы источников подобны, т.е. сигналы из X и T имеют одинаковые частотные и пространственные спектры. Поэтому естественно предположить, что формы возмущений (спектральные функции) в предложенном нестационарном случае также должны быть подобны. Кроме того, в предложенном случае среда является неоднородной. При условии, что источники X и T находятся в локально однородных областях, в аналитических решениях для $\eta_X(T)$ и $\eta_T(X)$ присутствуют параметры вида $\frac{sR}{\sqrt{gD}}$, где R - характерный горизонтальный размер воз-

мущения, D - глубина воды в области возмущения, s - параметр преобразования Лапласа. Поэтому для согласования источников и справедливости (5.10) необходимо выполнение условия

$$\frac{sR_T}{\sqrt{gD_T}} = \frac{sR_X}{\sqrt{gD_X}} \tag{5.11}$$

Изложенное выше подтверждается примером решения задачи о распространении длинных волн в бассейне, состоящем из трех областей с постоянными, но различными глубинами и параллельными границами раздела. Можно показать, что решения представляют собой ряды по отраженным волнам. Ввиду громоздкости выражений выкладки не приводятся. Подстановка решений в выражение (5.10) приводит к следующим выводам.

Если возмущения представляют собой симметричные круговые возвышения свободной поверхности, то части решения, описывающие отраженные волны, сокращаются. Остается выражение

$$\int_{0}^{1} \eta_{0T}(\rho) I_{0}(\frac{sR_{T}}{\sqrt{gD_{T}}}) \rho \, d\rho \cdot \int_{0}^{1} \eta_{0X}(\rho) \rho \, d\rho =$$
$$= \int_{0}^{1} \eta_{0X}(\rho) I_{0}(\frac{sR_{X}}{\sqrt{gD_{X}}}) \rho \, d\rho \cdot \int_{0}^{1} \eta_{0T}(\rho) \rho \, d\rho \quad ,$$

которое превращается в тождество, если формы начальных возмущений $\eta_{0T}(\rho)$ и $\eta_{0X}(\rho)$ подобны и $\frac{sR_T}{\sqrt{gD_T}} = \frac{sR_X}{\sqrt{gD_X}}$. Переменные интегрирования безразмерны, норми-

рованы на R_T и R_X в соответствии с индексами у, $\,\eta.$

Функция, описывающая форму волны цунами вблизи пункта X, может быть определена из (5.10):

$$\eta_T(X) = \eta_X(T) \frac{Q_T}{Q_X}$$
(5.12)

В этом соотношении функция $\eta_X(T)$, описывающая волну в эпицентре цунами T, является расчетной для модельного источника простейшей формы в Σ_X , например, в виде кругового начального возвышения свободной поверхности, Q_X является избыточным объемом этого источника.

Величина Q_T в (5.12) является неизвестной величиной, которая может быть вычислена на основании сейсмологических данных о землетрясении, вызвавшем цунами. Характерный горизонтальный размер источника цунами R_T может быть определен также на основании сейсмологических данных. Однако оценка Q_T, R_T на основании сейсмологических данных не может считаться достаточно достоверной и использоваться для определения интенсивности цунами.

5.3. Оценка цунами для осесимметричного источника

Для подтверждения тревоги цунами, объявленной на основании сейсмологических данных, предложено использование информации удаленных гидрофизических станций [Соловьев, 1968, Поплавский, Куликов, Поплавская, 1988]. Предложенный способ предполагает установление некоторых критериев, на основании которых, анализируя волну, проходящую через гидрофизическую станцию, можно было бы оценить ее опасность для заданных участков побережья. В качестве такого критерия в работе [Поплавский, Куликов, Поплавская, 1988] предложено принять некоторую пороговую амплитуду волны. Однако такой подход не дает полной картины цунами. В самом деле, если для некоторого цунами гидрофизическая станция находится в зоне "тени", то по ее информации невозможно оценить степень опасности цунами в заданном пункте.

Использование данных гидрофизической (уровенной) станции с применением предложенного соотношения взаимности (5.10) или (5.12) позволит улучшить оценку опасности цунами.

Пусть гидрофизическая (уровенная) станция расположена в некоторой точке А. Тогда соотношения типа (5.10) позволят исключить неизвестную величину Q_T . Действительно, соотношение (5.10) справедливо для любой пары точек. Поэтому, записывая это соотношение для точек Т и А, а также для точек Т и Х, неизвестную Q_T из полученной пары уравнений можем исключить и получить новое соотношение

$$\eta_T(X) = \eta_T(A) \frac{\eta_X(T)}{\eta_A(T)} \frac{Q_A}{Q_X}$$
(5.13)

В этом соотношении функции $\eta_X(T)$ и $\eta_A(T)$ представляют собой отклики уровня воды в эпицентре предполагаемого цунами от возмущений в областях Σ_X и Σ_A (населенный пункт и гидрофизическая станция) с интенсивностями Q_X и Q_A . Функции $\eta_X(T)$ и $\eta_A(T)$ должны быть рассчитаны численными методами. Функция $\eta_T(A)$ представляет собой текущую информацию в точке A о цунами, возбужденном в области S_T.

Следует отметить, что, поскольку в соотношении (5.13) не участвует величина (функция) Q_T, характеризующая механизм и интенсивность источника цунами, то тип механизма возбуждения цунами не влияет на справедливость оценки по (5.13). Для оценки по (5.13) необходимы только данные о координатах и времени происшедшего землетрясения. Информации об интенсивности и размерах источника цунами не требуется.

Совершенно не важно также, каковы механизмы источников в областях S_X и S_A . В соответствии с соображениями, изложенными в подразделе 5.1, они могут быть выбраны в виде симметричных начальных круговых возвышений свободной поверхности подобной формы с положительным избыточным объемом, радиусы которых связаны между собой соотношением типа (5.11): $\frac{R_X}{\sqrt{D_X}} = \frac{R_A}{\sqrt{D_A}}$.

В дальнейшем будем обозначать функции, относящиеся к натурным (наблюдаемым) процессам, буквой η , а буквой ζ - расчетные функции. В новых обозначениях соотношение (5.13) выразится следующим образом:

$$\eta_T(X) = \eta_T(A) \frac{\zeta_X(T)}{\zeta_A(T)} \frac{Q_A}{Q_X}$$
(5.14)

Таким образом, если известны расчетные функции $\zeta_X(T)$ и $\zeta_A(T)$, соответственно, Q_X и Q_A , то, обладая текущей информацией с гидрофизической станции $\eta_T(A)$, на основании (5.14) можно получить функцию $\eta_T(X)$. Для получения искомых формы волны цунами в заданном пункте X и времени ее прихода достаточно выполнить обратное преобразование Лапласа функции $\eta_T(X)$.

Функции $\zeta_X(T)$ и $\zeta_A(T)$ должны быть либо рассчитаны оперативно по получении информации о координатах землетрясения и времени его возникновения, либо оценены иными способами. При этом любой из способов должен обеспечивать заданную забла-говременность подачи тревоги цунами.

5.4. Оценка цунами для неоднородного источника.

Изложенные выше соображения справедливы для круговых источников цунами с ненулевым расходом (вытесненным объемом). В случае, если источник цунами имеет некруговую форму или нулевой расход, т.е. имеет особенность типа диполь и выше, формулировка принципа взаимности должна быть усложнена.

В предположении, что особенность источника цунами не выше дипольной, функции, описывающие отклики уровня в районе эпицентра предполагаемого цунами Т на возмущения в заданном пункте Х и в местах расположения гидрофизических станций, следует разложить в ряд по координатам в точке Т [Ландау,Лифшиц,1986]:

$$\zeta_X \approx \zeta_X(T) + \vec{\nabla} \zeta_X /_T \cdot (\vec{r} - \vec{r}_T) \ .$$

Здесь $\vec{\nabla}\zeta_X /_T$ означает градиент функции ζ с источником в точке X, рассчитанный в точке T.

Подставляя последнее разложение в правую часть (5.9) вместо η_{X} , получим

$$s^{2} \iint_{S_{T}} [\zeta_{X}(T) + \nabla \zeta_{X} /_{T} \cdot (\vec{r} - \vec{r}_{T})] \cdot h_{0T} dS -$$

$$- s \iint_{S_{T}} [\zeta_{X}(T) + \vec{\nabla} \zeta_{X} /_{T} \cdot (\vec{r} - \vec{r}_{T})] \cdot \eta_{0T} dS + \iint_{S_{T}} [\zeta_{X}(T) + \vec{\nabla} \zeta_{X} /_{T} \cdot (\vec{r} - \vec{r}_{T})] \cdot \vec{\nabla} (h\vec{u}_{0T}) dS =$$

$$= \zeta_{X}(T) \left[s^{2} \iint_{S_{T}} h_{0T} dS - s \iint_{S_{T}} \eta_{0T} dS + \iint_{S_{T}} \vec{\nabla} (h\vec{u}_{0T}) dS \right] +$$

$$+ \vec{\nabla} \zeta_{X} /_{T} \cdot \left[s^{2} \iint_{S_{T}} (\vec{r} - \vec{r}_{T}) \cdot h_{0T} dS - s \iint_{S_{T}} (\vec{r} - \vec{r}_{T}) \cdot \eta_{0T} dS + \iint_{S_{T}} (\vec{r} - \vec{r}_{T}) \cdot \vec{\nabla} (h\vec{u}_{0T}) dS \right] =$$

$$= \zeta_{X}(T) \cdot Q_{T} + \vec{\nabla} \zeta_{X} /_{T} \cdot \vec{M}_{T} .$$

В последнем выражении \vec{M}_{T} - некоторый дипольный момент источника цунами, Q_{T} может быть равно нулю, но в общем случае предполагается отличным от нуля.

Источники в областях S_X , S_A как и прежде, могут быть выбраны круговыми с положительным избыточным объемом.

Таким образом, соотношение взаимности, учитывающее дипольность источника цунами, записывается в виде

$$\eta_T(X) \cdot Q_X = \zeta_X(T) \cdot Q_T + \nabla \zeta_X /_T \cdot M_T.$$
(5.15)

В этом выражении по сравнению с (5.10) появились две новые неизвестные - составляющие M_{xT} , M_{yT} дипольного момента M_T источника цунами, учитывающие ориентацию и неоднородность очага цунами.

Неизвестные Q_T , M_{xT} , M_{yT} в (5.15) могут быть исключены способом, описанным выше. Записывая (5.15) попарно для трех точек - мест размещения гидрофизических станций - А, В, С и эпицентра цунами Т, получим систему

$$\eta_{T}(A) \cdot Q_{A} = \zeta_{A}(T) \cdot Q_{T} + \frac{\partial \zeta_{A}}{\partial x} /_{T} \cdot M_{xT} + \frac{\partial \zeta_{A}}{\partial y} /_{T} \cdot M_{yT} ,$$

$$\eta_{T}(B) \cdot Q_{B} = \zeta_{B}(T) \cdot Q_{T} + \frac{\partial \zeta_{B}}{\partial x} /_{T} \cdot M_{xT} + \frac{\partial \zeta_{B}}{\partial y} /_{T} \cdot M_{yT} ,$$

$$\eta_{T}(C) \cdot Q_{C} = \zeta_{C}(T) \cdot Q_{T} + \frac{\partial \zeta_{C}}{\partial x} /_{T} \cdot M_{xT} + \frac{\partial \zeta_{C}}{\partial y} /_{T} \cdot M_{yT} .$$
(5.16)

В этой системе $\eta_T(A)$, $\eta_T(B)$ и $\eta_T(C)$ - текущие данные гидрофизических станций A, B, C о предполагаемом цунами с эпицентром в T; $\zeta_A(T), \zeta_B(T), \zeta_C(T), \quad \frac{\partial \zeta_A}{\partial x} /_T, \frac{\partial \zeta_A}{\partial y} /_T, \dots$ - расчетные отклики уровня в эпицентре цунами

на модельные возмущения в А, В, С и их производные.

Неизвестные Q_T , M_{xT} , M_{yT} в (5.16) могут быть легко выражены через данные гидрофизических станций и расчетные функции. Подставляя определенные из системы величины Q_T , M_{xT} , M_{yT} в (5.15), получим функцию, описывающую волну цунами в заданным пункте X, учитывающую особенности источника цунами такие, как ориентация в пространстве, неоднородность возмущения в очаге:

$$\eta_T(X) = \zeta_X(T) \cdot \frac{Q_T}{Q_X} + \frac{\partial \zeta_X}{\partial x} /_T \cdot \frac{M_{xT}}{Q_X} + \frac{\partial \zeta_X}{\partial y} /_T \cdot \frac{M_{yT}}{Q_X}.$$
(5.17)

Таким образом, если известны расчетные функции $\zeta_A(T)$, $\zeta_B(T)$, $\zeta_C(T)$, радиусы которых связаны между собой, а также с радиусом возмущения в S_X соотношениями типа (5.11), то, имея текущую информацию с гидрофизических станций $\eta_T(A)$, $\eta_T(B)$ и $\eta_T(C)$, можно рассчитать функции Q_T , M_{xT} , M_{yT} из системы (5.16). Далее, зная расчетную функцию $\zeta_X(T)$, можно на основании (5.17) получить функцию $\eta_T(X)$. Искомая форма волны цунами в X и время ее прихода в этот пункт определяются после выполнения обратного преобразования Лапласа.

5.5. Способ оценки цунами по данным удаленных уровенных станций.

Реальное цунами в конкретной точке зависит не только от процесса возбуждения, но и от свойств бассейна, в котором волна распространяется, На проявление цунами в конкретном пункте влияют отражение от берегов, захват волны протяженными неоднородностями рельефа дна, резонансные эффекты в проливах и бухтах, дифракция на островах и неоднородностях дна и берегов.

При правильном задании граничных условий, достаточно полном учете неоднородностей рельефа дна численные расчеты должны давать адекватное описание цунами, учитывающее перечисленные выше эффекты. В выражениях (5.14), (5.15) и (5.16) расчетные функции $\zeta_X(T)$, $\zeta_A(T)$,... учитывают особенности рельефа дна, неоднородности береговой границы, дифракцию на островах и т.д., функции $\eta_T(A)$, $\eta_T(B)$ и $\eta_T(C)$ дают информацию об источнике цунами. Кроме того, последние два слагаемых в (5.17) учитывают ориентацию очага цунами и его неоднородность.

В вышеизложенном неявно подразумевалось, что расчеты волновых полей должны производиться для некоторого равновесного уровня океана, а из данных уровенных станций должны быть исключены приливные составляющие, а также составляющие метеорологического характера. При окончательной оценке цунами в заданном пункте соответствующие приливные составляющие и составляющие метеорологического происхождения должны быть учтены.

Таким образом, предлагается следующий алгоритм оценки цунами.

- 1. Информация о землетрясении (время и координаты первого толчка) передаются в пункт, ответственный за принятие решения о тревоге цунами.
- Этот пункт немедленно начинает прием информации с уровенных станций. До прихода волны цунами эта информация используется для анализа и учета составляющих метеорологического происхождения и приливных составляющих.
- 3. Одновременно производится расчет волн от модельных источников в точке с координатами первого толчка.
- 4. Над расчетными волнами и данными уровенных станций производится преобразование Лапласа.
- 5. По получении информации о проходе волны цунами над уровенными станциями выполняется расчет по формулам (5.17) или (5.14).
- Выполняется обратное преобразование Лапласа и после учета приливных и метеорологических составляющих принимается решение о тревоге цунами и ее продолжительности.

Предложенный алгоритм может быть реализован как для централизованной службы предупреждения о цунами, так и для локальных служб в пунктах, способных принимать информацию о землетрясении и данные уровенных станций.

Заключение к первой части.

Главный результат работы состоит в установлении того факта, что действующая Российская СПЦ, в принципе, в состоянии доставить предупреждение о цунами на основании сейсмологических наблюдений в большинство прикрываемых населенных пунктов заблаговременно при любом положении источника вблизи российских берегов. Вместе с тем, авторами обнаружены вполне возможные варианты взаимного расположения населенных пунктов и вероятных источников цунами, когда СПЦ будет не в состоянии доставить в некоторые пункты тревожное сообщение о цунами заблаговременно при существующих сейчас временных нормативах ее работы и принятом здесь достаточно условно минимальном времени эвакуации населения по тревоге. Учитывая, что вопросы точности вычисления времен пробега цунами, на основе которых сделан этот вывод, пока недостаточно изучены, этот вывод необходимо рассматривать как предварительный. Однако невозможность доставки в некоторые населенные пункты заблаговременных тревожных сообщений по объективным причинам (неблагоприятного географического расположения источника цунами по отношению к некоторым населенным пунктам) необходимо учитывать по крайней мере при последующем анализе действий СПЦ в тревожные периоды возникновения сильных подводных землетрясений

Поскольку размеры и форма сейсмической зоны молчания определяются исключительно батиметрией примыкающей к населенному пункту акватории и минимальной временной дистанцией заблаговременности, большинство неблагоприятных случаев возможного незаблаговременного предупреждения о цунами может быть компактно описано заранее как область пересечения той или иной СЗМ и цунамигенной зоны. Отсюда вытекает возможность разработки индивидуальных условных алгоритмов работы СПЦ, используемых при условии, что эпицентр землетрясения попадает в конкретную такую область. Уже сейчас очевидно, что должны существовать специальные сейсмические станции, предназначенные, прежде всего, для прогнозирования цунами из указанных областей. Такие станции лучше всего устанавливать прямо в самих населенных пунктах, имеющих пересечения собственных СЗМ с цунамигенной зоной (таким образом минимизируется необходимая длительность регистрации землетрясения в наиболее неблагоприятных случаях). При регистрации землетрясения из области незаблаговременного предупреждения для пункта расположения станции, последняя должна перейти на индивидуальный регламент работы, позволяющей ее персоналу самостоятельно подавать тревогу цунами. Длительность ее работы в тревожном режиме (от начала регистрации и до выдачи в каналы связи тревожного сообщения) должна определяться

эпицентральным расстоянием регистрируемого землетрясения, которое по данным главы 3 составляет от 0 до ~300 км, что соответствует длительности информативного участка записи менее 1 минуты (разность S - P \leq 30 секунд). Используя существующие методы автоматической обработки сейсмической записи, например, [Никифоров, Тихонов, Михайлова, 1989, Тихонов 1994], результаты, изложенные в главе 4 и современную вычислительную технику, можно, по-видимому, рассчитывать на то, что тревожное сообщение с такой станции будет поступать в каналы связи не позднее, чем через 2 минуты после начала такого землетрясения. Вопрос о том, сколько необходимо таких станций, нужно ли их устанавливать в каждом пункте, имеющем "непустую" область пересечения СЗМ с цунамигенной зоной, должен решаться индивидуально для каждого из рассмотренных в главе 3 регионов.

Размеры и форма гидрофизических зон молчания прикрываемых населенных пунктов в значительной степени зависят (помимо батиметрии примыкающей акватории и принятой минимальной временной дистанции заблаговременности) еще и от расположения относительно них станций измерения уровня океана. Размер ГЗМ конкретного населенного пункта всегда значительно больше размера соответствующей СЗМ, поэтому заблаговременные предупреждения о цунами ближайших к источнику населенных пунктов, выработанные по данным гидрофизических наблюдений, будут скорее исключением, чем правилом в наиболее сейсмичных и цунамиактивных регионах, примыкающих со стороны Тихого океана непосредственно к побережью Камчатки и Курильских островов. Для большей части прикрываемого побережья Берингова и Японского морей возможна такая расстановка уровенных станций, которая обеспечит заблаговременное предупреждение его о цунами по данным гидрофизических наблюдений при любом расположении источника в пределах цунамигенной зоны. При этом иногда будет возможно получить количественный прогноз ожидаемой высоты волны у тех или иных населенных пунктов по данным наблюдений уровенных станций. Определенные надежды на это основываются на результатах, изложенных в главе 5.

Хорошая, с точки зрения потребителя (то есть населения и хозяйства прибрежной полосы суши), работа любой СПЦ определяется не только качеством самой работы, каким бы путем мы его ни определяли (с помощью вероятностей ошибочных решений или социальной и экономической эффективности). Оно зависит, во-первых, от того насколько благоприятствует взаимное расположение вероятных источников и прикрываемых населенных пунктов получению ими заблаговременных предупреждений о цунами (*географический фактор*). Во-вторых, оно зависит, конечно от качества работы самой СПЦ и системы связи, ее обслуживающей (*научно-технический фактор*). Наконец, для того, чтобы достоверное и доставленное с максимальной оперативностью предупреждение о цунами действительно оказалось полезным, необходимо, чтобы населе-

ние предупреждаемых пунктов и движимое имущество можно было с максимальной скоростью эвакуировать в безопасные места. Для этого необходимо не только благоприятное действие вышеназванных факторов, но и готовность населения и имущества к быстрой эвакуации, что требует определенных (и, возможно, не малых) затрат на подготовительные и защитные работы (культурный фактор). К таким работам относятся просветительская работа среди населения, определение и оборудование мест эвакуации населения с учетом реальных возможностей заблаговременного предупреждения о цунами конкретного населенного пункта, уточнение индивидуально для каждого населенного пункта минимального времени эвакуации, разработка методов защиты портов и правил стоянки судов вблизи берегов, подверженных опасности цунами, в зависимости от их маневренности и водоизмещения, строгое регламентирование застройки суши в непосредственной близости к береговой черте. На самых ранних этапах проектирования новых крупных хозяйственных близбереговых объектов - при выборе места под строительство - в числе прочих уже учитываемых неблагоприятных природных факторов, необходимо учитывать не только долговременную опасность цунами, но и реальные возможности действующей СПЦ обеспечить проектируемый объект заблаговременными прогнозами цунами.

Часть 2. Вычислительное моделирование длинноволновой динамики океана в оперативном режиме и при выполнении экспертных работ

Вводные замечания

Сахалинская область - единственная область в Российской Федерации, которая расположена на многочисленных островах в Японском, Охотском морях и в Тихом океане. Она является уникальным для России морским регионом, географическое положение которого обязывает заниматься задачами наблюдения и контроля в дальневосточных морях, поддерживать работоспособность и действенность систем предупреждения об опасных морских, метеорологических и сейсмических явлениях. По ряду объективных причин, в настоящее время следовало бы вести речь не столько о совершенствовании действующих служб, сколько о восстановлении и воссоздании утраченных систем наблюдения. Однако, в надежде на улучшение экономической ситуации в нашей стране мы будем говорить здесь о том, какими, по нашему мнению, должны быть названные службы.



Рис. 1. Эскиз сейсмической и гидрофизической сети наблюдения с центром сбора и обработки оперативных данных в г. Южно-Сахалинске.

На рис 1 показана обзорная схема пунктов наблюдения за сейсмической и гидрофизической обстановкой. Оперативный сбор информации с постов наблюдения и автономных регистраторов необходим для оценки сейсмической обстановки, а также для выполнения прогнозов опасных морских явлений и выработке решений об объявлении тревоги цунами. Создание современной телеметрической сети, в которую должны быть включены действующие посты наблюдения и новые автономные регистрирующие станции, является необходимым условием для реального контроля состояния окружающей среды и предупреждения в чрезвычайных ситуациях природного характера.

С чисто организационной точки зрения представляется целесообразным объединить все системы наблюдения за состоянием окружающей среды по крайней мере на информационном уровне в единую систему с центром (центрами) обработки данных и оперативного оповещения всех заинтересованных организаций и лиц о возможных предстоящих экстремальных явлениях на море. Рис.2 показывает примерную схему такой системы.



Потребители оперативной и аналитической информации

Рис. 2. Блок схема информационного взаимодействия Регионального Сахалинского оперативного информационного Центра (СОИ Центра) в процессе выработки решения и оперативного оповещения населения об опасных морских явлениях.

Здесь необходимо сделать важнейший вывод о том, что затянувшийся с 50-х годов опыт создания Советской дальневосточной системы оперативного наблюдения за состоянием моря, когда все организационно-технические решения принимались очень далекими от приморских реальностей центральными ведомствами, закончился с абсолютно отрицательными результатами. Приведенная на рисунке 2 блок-схема показывает один из наименее болезненных способов преодоления накопившихся ведомственных противоречий, когда вся ответственность за решение задач связанных с организацией оперативных наблюдений за морем, свойственных только Дальнему Востоку России, переносится на региональный сахалинский (и дальневосточный) уровень.

Именно региональный уровень ответственности за развертывание и использование оперативных систем контроля обстановки на море полностью соответствует успешному опыту создания аналогичных служб в соседних Японии, Аляске, Канаде и США.

Вкратце покажем особенности работы службы оперативного контроля обстановки на море, как одной из региональных подсистем единой Тихоокеанской системы наблюдения за опасными морскими явлениями.

Для выработки решения об объявлении тревоги цунами, сеть наблюдения за состоянием моря должна предоставлять информацию в центр ее обработки с задержками не выше одной минуты. Это обусловлено тем, что цунами представляет опасность сразу же, как только волна достигает побережья. Период волн цунами, для близких источников землетрясения может составлять 3-4 минуты, для Курильских землетрясений это, обычно, 10-12 минут, для далеких землетрясений, происходящих у побережья Америки или в Юго-Восточной Азии - на Курилах и Сахалине может наблюдаться цунами с периодом 30-40 минут.

Штормовые нагоны и вызываемые ими тягуны в морских портах, могут быть охарактеризованы как длинные волны с периодами от часов до нескольких суток. Тем не менее, время реагирования сети наблюдения на изменение уровня моря, в случае прохождения тайфуна, не должно превышать нескольких минут. Здесь должна решаться задача о фиксации опасного отклонения уровня моря и скорости течения от их характерной динамики, которая проявляется при приливах и стандартных (безопасных) циклонах. Вычислительные эксперименты, в этой задаче (так же, как и в задаче о цунами), должны обеспечить выполнение автономных прогностических расчетов, а также проводить интерполяцию данных между постами наблюдения и экстраполяцию на большие расстояния от них с целью восстановления гидродинамического режима в существенно большей акватории, чем та, по которой могут быть получены данные от автоматизированных оперативных постов наблюдения (последних в Сахалинской области пока не имеется). Это необходимо для принятия решений при выполнении своевременных и обоснованных прогнозов опасных морских явлений.

При оперативном анализе информации, непрерывно поступающей по телеметрическим каналам связи, могут, также, использоваться данные от других систем наблюдения, к примеру, материалы дистанционного зондирования Земли, но все эти разрозненные во времени и пространстве данные должны увязываться с помощью единой модели состояния моря и атмосферы, построенной на основе непрерывного численного моделирования гидрофизических процессов в морских акваториях. Комплексное решение такой задачи облегчается замкнутостью Охотского и Японского морей, что позволяет учитывать влияние большого Тихого океана косвенно, например, - путем задания изменяющихся во времени динамических граничных условий в Курильских проливах.

Основное содержание второй части книги - это описание структуры и регламента функционирования единого (вневедомственного) регионального Сахалинского оперативного информационного центра (СОИ Центра) наблюдения за состоянием моря, и некоторых технических предложений по организации самой системы наблюдения за морем, вытекающих из идеи комплексного использования (комплексной обработки) всех данных о состоянии окружающей среды. При этом численное моделирование длинноволновых процессов выступает как необходимый элемент программного обеспечения оперативной работы такой системы. Поскольку такой системы и службы в Сахалинской области пока не существует, имеющиеся наработки по моделированию цунами, штормовых нагонов и циклонов (тайфунов) предложены для практического использования в действующих оперативных службах Сахалинского УГМС и его Центра цунами.

Реализованные и предлагаемые к внедрению вычислительные комплексы готовы к выполнению исследовательских и поверочных расчетов, которые должны быть выполнены для тестирования вычислительных моделей в реальной практике служб наблюдения за морем, а также с целью выработки регламента использования вычислительных экспериментов в оперативных службах, несущих круглосуточное дежурство.

Для ускорения собственных исследований и адаптации вычислительных комплексов к потребностям действующих служб, авторами принято решение о свободном распространении всего комплекса океанологических программ, вместе со всеми исходными текстами и подробной документацией к программам и форматам баз данных. В случае использования программных комплексов в оперативных службах и режимных отделах территориальных УГМС, штабах по делам ГОиЧС и др., программы и математические модели будут перестраиваться и адаптироваться к потребностям этих служб.

Реальное внедрение современных информационно-аналитических комплексов в действующую службу предупреждения об опасных морских явлениях неизбежно потребует ее дооснащения современными средствами наблюдения и передачи данных.

В настоящее время имеет место несоответствие между существующей вычислительной техникой и устаревшими средствами сбора и передачи исходной информации, а также организационной структурой соответствующих служб. Сделанное замечание относится и к наблюдательным подсистемам (сейсмической и гидрофизической) службы предупреждения о цунами и службы прогноза опасных и особо опасных морских явлений. В соответствующем месте книги излагается наше видение того, как с минимальными затратами можно было бы дооснастить гидрофизические наблюдательные подсистемы этих служб и организовать их в единую службу оперативного наблюдения за морем в Сахалинской области или, в целом, на Дальнем Востоке России.

Показать, что наработанные вычислительные комплексы уже готовы к интегрированию в оперативные службы наблюдения за морем и службы реагирования на опасные явления, было главной задачей настоящей части книги. Поэтому авторы сочли возможным опустить дискуссионные вопросы о методах моделирования и сравнения собственных результатов с аналогичными достижениями других авторов. Такой анализ затруднил бы изложение организационно-технических предложений по службе в целом и сильно увеличил бы объем книги. Авторы надеются вернуться к детальной проработке опущенных вопросов, к анализу и сравнению различных вычислительных моделей в своих дальнейших публикациях.

Материал второй части распределен по главам и приложениям следующим образом. Последовательность изложения глав подчиняется логике проектирования «сверху вниз», когда под базовую идею подбираются методы ее материального воплощения. При этом, описываемые комплексы программ и технические предложения по организации службы создавались ранее по логике проектирования «снизу-вверх», то есть не свободны от излишней детализации.

В первой главе описаны уже реализованные комплексы программ, дано обобщенное описание их назначения и возможностей, а также сказано о возникших технических и математических проблемах, некоторые из которых сформулированы, другие же только осознаны.

Во второй главе рассказывается об основных математических моделях, алгоритмах и методах их использования при проведении вычислительных экспериментов, которые реализованы в действующих программных комплексах.

Третья глава посвящена организационно-техническим вопросам совершенствования действующей службы цунами, показана необходимость комплексного подхода к решению задачи предупреждения о цунами. Сбор и анализ оперативных данных о текущем состоянии моря должен использоваться не только при выработке тревоги цунами, но также и при выполнении прогнозов и предупреждении о штормовых нагонах на побережье и о тягунах в морских портах. В этой же главе перечислены подготовительные работы, которые должны предшествовать внедрению уже реализованных программных комплексов (оцифровка карт, уточнение эмпирических коэффициентов и адаптация искусственных поправок). Приводятся примеры моделирования Южно-Курильского цунами 1994 года, показано решение задачи о прохождении циклона в ноябре 1995 года, представлены результаты моделирования приливного режима в Охотском море.

Внедрение вышеперечисленных океанологических программ в работу тех или иных служб и, прежде всего в службу оперативного предупреждения о цунами, требует

определенной перестройки самих служб. Поэтому нам показалось не лишним на примере Сахалинского территориального УГМС дать представление о том, как работает ныне действующая служба цунами. В четвертой главе говорится о текущем состоянии этой службы, анализируется ее эффективность и говорится о наиболее важных мероприятиях, которые должны быть выполнены для поддержания этой службы.

Пятая глава посвящена анализу действий Центра Цунами СахУГМС и отдельных звеньев службы оперативного предупреждения о цунами Сахалинской области

В последней, шестой главе даются краткие практические инструкции по использованию программных комплексов для подготовки и анализа исходных данных, и выполнения вычислительных экспериментов по моделированию длинноволновой динамики океана. Более детальное описание программ, команд управления вычислениями, а также описание форматов данных, вынесено в приложения **А** и **Б**.

В приложении **В** приводятся фактические материалы о землетрясениях за 1985 -1995 годы, по которым Сахалинская служба оперативного предупреждения о цунами (Центр цунами Сахалинского УГМС) принимала ответственное решение (подавать или не подавать тревогу), о проявлениях цунами в конкретных пунктах, о действиях Службы и местной администрации.

Мы полагаем (надеемся), что описанные в этой части книги действующие комплексы математического обеспечения окажутся полезными для работы соответствующих подразделений всех заинтересованных УГМС (Сахалинского, Камчатского, Магаданского, Приморского и Хабаровского) и штабов по делам гражданской обороны. Территориально авторы тяготеют к Сахалину (являются жителями Южно-Сахалинска), поэтому так часты в тексте ссылки на Сахалинское УГМС, Центр цунами которого являлся естественным полигоном для обкатки всех математических наработок и программных комплексов.

Важно отметить, что практически все представленные здесь методики и программы являются результатом коллективного творчества сотрудников лаборатории цунами Института морской геологии и геофизики и лаборатории Вычислительной гидромеханики и океанографии СКБ средств автоматизации морских исследований ДВО РАН в течение последних 10-15 лет. Научное руководство и авторство на существенную часть базовых математические моделей и алгоритмов принадлежит Исааку Вениаминовичу Файну. Сценарий использования программ и алгоритмы проведения кинематических расчетов реализовывалась под пристальным вниманием и непосредственным руководством Александра Александровича Поплавского. Базы данных исторических событий и программы для работы с ними строились совместно и для Го Чан Нама. Особо хочется отметить помощь в решении математических задач, и поблагодарить за создание технических условий для успешной разработки программ, заведующего лаборатории цунами Виктора Михайловича Кайстренко.

Глава 1. Вычислительные эксперименты. Задачи и проблемы

Современное состояние вычислительной математики, компьютерных технологий и электронных средств передачи информации позволяет выполнение реальных оперативных и экспертных работ по контролю обстановки на море с использованием достаточно сложных программно-вычислительных комплексов. Актуальной задачей для дальневосточных (сахалинских) оперативных служб является создание системы для комплексного наблюдения за сейсмической, гидрофизической, метеорологической и экологической обстановкой в дальневосточных морях России. Это необходимо также и для выполнения прогнозов и предупреждений населения и флота в случае чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Ниже будут рассматриваться вопросы совершенствования службы предупреждения о цунами, некоторые особенности оперативной работы которой можно с пользой перенести на другие службы предупреждения об опасных морских явлениях и обеспечения безопасности мореплавания. В качестве важнейшего звена в системе наблюдения за обстановкой на море должны быть использованы гидродинамические вычислительные эксперименты, из которых моделирование длинноволновых процессов в прибрежной зоне океана доведено до уровня, позволяющего вести речь о внедрении их в действующие службы и режимные отделы Сахалинского и других дальневосточных УГМС.

Классифицируем вычислительные эксперименты и связанное с ними математическое обеспечение по уровням сложности. Это позволит сформулировать основные правила и допуски на использование новых программных комплексов в действующих оперативных службах:

1. Исследовательское математическое обеспечение, к которому относятся все представленные в данной работе программы. Оно предназначено для отработки методов моделирования и интерпретации результатов исследований. Данное матобеспечение может быть предложено для опытной эксплуатации в ведомственные службы, к которым относится Центр Цунами и Морской Отдел Сахалинского УГМС;

2. В процессе опытной эксплуатации исследовательского математического обеспечения, пользовательские интерфейсы программ могут быть доведены до уровня автоматизированных рабочих мест инженеров-океанологов, которые в будущем превратятся в инструментарий для автоматизированной обработки океанологических материалов. 3. В процессе эксплуатации программ в условиях реальной океанологической практики, вычислительные эксперименты могут быть адаптированы к реальной гидрофизической обстановке в дальневосточных морях, а алгоритмы обработки оперативных данных будут формализованы в автоматизированные системы, которые могут быть использованы в единой системе наблюдения за морем.

Вычислительные модели и методики обработки океанографической информации разрабатывались с учетом необходимости их использования в действующих оперативных службах, ведущих наблюдение за состоянием моря. Это означает, что в программных комплексах заложены возможности анализа применимости математических моделей, отдано предпочтение высокоскоростным методам вычислений. Дополнительные факторы, уточняющие расчеты, задаются с помощью специальных команд. К таким факторам относится сферичность и вращение Земли, притяжение Луны и Солнца, учет внешних возмущений, придонное трение, перепады атмосферного давления и ветра и др.

Высокая эффективность использования вычислительного моделирования может стать явной только при условии быстрого поступления оперативной информации о текущем состоянии моря по телеметрическим каналам сбора данных от действующих постов наблюдения. В настоящее время, в Сахалинской области такая сеть отсутствует, поэтому скорейшее освоение и запуск в реальную эксплуатацию программ океанологического моделирования, поможет инженерам оперативных служб выработать наиболее эффективные решения при создании единой сахалинской сети сбора и рассылки оперативной информации по контролю состояния окружающей среды, и с целью выполнения действий по предупреждению и защите населения от опасных морских явлений и катастроф.

Уже реализованный комплекс вычислительных процедур предназначен, в первую очередь, для совершенствования инструментальных средств океанолога - исследователя и оформлен в виде графической экспертно - информационной среды, которая в будущем могла бы унифицировать обработку океанологической, метеорологической и сейсмической информации в проблеме цунами, морских наводнений и других опасных морских явлениях.

Комплекс состоит из нескольких взаимосвязанных программ:

- **ANI -** ведение картографических данных по батиметрии и проведение численного моделирования в волновой динамике океана;
- **MARIO** ведение, интерпретация и анализ временных рядов наблюдений в океанографии и сейсмологии;

WORLD - прорисовка каталогов и решение других задач на контурных географических картах.

С помощью указанных программ поддерживаются файлы (базы данных), которые опознаются в настройках операционной системы по «расширению» имен файлов (второму трехбуквенному имени, которое в полном имени файла указывается после точки):

.inf -> .int, .byt, .dat батиметрические данные с описанием постов наблюдения;

- .chk полный образ данных остановленного вычислительного эксперимента;
- .mar приливы и другие временные ряды наблюдений на морских и сейсмических постах наблюдения;
- .tim данные о приливных постах и гармонических постоянных;
- .lts списки сейсмических и событий цунами;
- .tv, pcx черно-белые и цветные рисунки снятые с экрана ЭВМ

в формате принтера Epson и графической программы Paintbrush;

В 1994 году был разработан эмулятор в среде Windows 3.1, для всех графических примитивов, задействованных программах. В конце 1995 года все программы были адаптированы для работы на третьей операционной платформе - в защищенном режиме под управлением DPMI-16. В Windows и DPMI практически не существует ограничений на размеры батиметрических карт и объемы мареографных баз данных. Во всех программах предусмотрены базовые сервисные функции, такие как, возможность ручного редактирования графического изображения на экране ЭВМ, сохранение этого изображения в файле, печать его на принтере и др.

Из вышеперечисленных, необходимо выделить две крупные программные разработки, одна из которых ориентирована на проведение вычислительных экспериментов: "ANI", другая для анализа наблюдений за уровнем моря: "MARIO". Они представляют из себя единые модули, в которых объединено множество процедур для решения различных гидрофизических и океанологических задач. Эти модули объединены форматами используемых данных и единообразным графическим интерфейсом. При разработке программ учитывались потребности, пожелания и особенности работы Сахалинской службы предупреждения о цунами. Хочется выразить надежду, что реализованные программы могут быть в полной мере использованы (и частично уже используются) при подготовке к несению службы и во время проведения тревоги цунами.

Первый программный модуль - ANI. Он предназначен для проведения вычислительных экспериментов по длинноволновой динамике океана. Он состоит из следующих процедур:

- 1. Ведение базы данных батиметрического материала;
- 2. Ведение списков мареографных постов наблюдения;

3. Комплекс задач на основе кинематики волновых фронтов;

4. Комплекс задач для проведения вычислительного эксперимента в океанологии для цунами, приливов и штормовых нагонов;

Вторая программа - MARIO. Это информационно-вычислительный комплекс изначально ориентированный на обработку мареографных данных, получаемых в результате вычислительных экспериментов. Он характеризуется наличием двух больших комплексов процедур:

5. База данных для хранения и обработки мареографных рядов;

6. База данных для работы с годовыми приливными рядами и их гармоническими постоянными;

В указанные комплексы программ встроены утилиты для работы с каталогами землетрясений и цунами, а также добавлены фоновые процедуры для обработки и печати графических изображений.

1.1. Вычислительные процедуры комплекса программ «ANI» - моделирование длинноволновых процессов в океане

По состоянию разработок в 1997 году, основной программный модуль: **ANI**, позволяет решать следующие задачи:

1. Процедура "**Chart**". Ведение библиотеки батиметрических карт, оцифрованных на меркаторской или географической сетке, с полным комплексом операций по редактированию и трансформации батиметрических данных. Здесь могут быть выполнены работы по подготовке батиметрических карт к проведению вычислительных экспериментов. Реализованы операции по трансформации карт в географических и меркаторских проекциях, при этом в интерактивном режиме могут быть подготовлены оптимальные расчетные области заданного размера, ориентации и шага сетки. Здесь же реализованы алгоритмы, в которых при замене батиметрии производится переинтерполяция всех расчетных полей, созданных в процессе проведения вычислительных экспериментов, а также перенос всех постов наблюдения в строгом соответствии с географическими координатами;

2. Процедура "**Mario**". Расстановка и редактирование списка постов наблюдения за уровнем моря, расстановка осуществляется либо в диалоге с программой, либо путем вписывания координат в информационные файлы, описывающие батиметрию. При проведении вычислительных экспериментов, в отмеченных постах наблюдения будет отслеживается уровень моря, они же задействуются для визуализации времени регистрации и экстремальных амплитуд волн цунами. волн цунами. Здесь же реализованы алгоритмы измерения углов и расстояний с учетом сферичности Земли, что необходи-

136

мо при оптимизации расстановки постов наблюдения. Предусмотрена, также, возможность корректировки глубин, что может быть использовано для моделирования защитных береговых сооружений;

3. Процедура "**Time**". Построение карт волновых фронтов и лучевых картин для источников произвольной формы, для группы из нескольких источников, в том числе начинающих свое излучение по заданному временному расписанию, а также построение разностей прихода волн от группы источников излучения в комплексе с точками на защищаемом побережье. Кроме того реализован целый комплекс запросов к программе и специальных задач и алгоритмов, которые могут быть использованы как для предварительной экспертизы цунами-защищенности побережья, так и в оперативных службах предупреждения о цунами.

- Построение карт изолиний времен добегания до пары произвольных точек и построение гидрофизических зон молчания для защищаемых береговых пунктов.
- Решение задачи о заблаговременности предупреждения и поиск зоны ответственности для гидрофизических постов наблюдения за уровнем моря.
- Оптимизация расстановки гидрофизических постов при проектировании и анализе гидрофизической подсистемы предупреждения о волнах цунами.
- Оперативный анализ концентрации волновой энергии на побережье, сразу же после определения формы источника цунами или после задания географических координат для цунамигенного землетрясения.
- Решение задачи оконтуривания очага цунами, путем расчета обратных изохрон для пунктов наблюдения за уровнем моря, при этом возможен старт "обратных" волн из этих пунктов по заранее составленному временному расписанию.
- Оперативное использование каталога землетрясений и цунами, по которому можно анализировать кинематику волн от исторических цунами.

4. Процедура "**Simulation**" Проведение вычислительного эксперимента при оперативном или исследовательском моделировании длинноволновых процессов в океане от различных источников, которое допускает решение ниже перечисленных задач.

- Численное моделирование приливного режима с учетом сферичности и вращения Земли, а также сил придонного трения. Данная задача предназначена для непрерывного моделирования приливного режима, с помощью которого может быть получена информация о приливных режимах уровня моря и течений в любой точке расчетной области. Такое моделирование необходимо также для последующего моделирования цунами и штормовых нагонов на фоне реального прилива, которое может делаться в оперативном режиме с целью прогноза гидрофизической обстановки на побережье.
- Оперативное моделирование воздействия волн цунами на побережье в режиме, когда вычисления производятся быстрее чем реальное распространение волн цунами.
 В этом случае, после сообщения о наблюдении экстремума волны цунами на ближайшем к эпицентру землетрясения посту, возможно реальное прогнозирование

воздействия цунами во всех других береговых пунктах. В случае принятия решения о тревоге цунами, с помощью указанного вычислительного эксперимента возможно предупреждение населенных пунктов о реальном времени прихода и повторении больших волн цунами, а также возможно получение прогноза о времени затухания волнового процесса до безопасного уровня.

- Численное моделирование штормовых нагонов, вызываемых прохождением атмосферных циклонов и тайфунов. В настоящее время реализовано моделирование циклона (тайфуна) проходящего по заранее заданной гладкой (сплайновой) траектории. В программе же, заложены алгоритмы позволяющие перестроить программу на считывание и интерполяцию реальных полей атмосферного давления и скорости ветра, в соответствии с форматами представления числовой информации, которые доступны в оперативном режиме на синоптических постах, и которые используются в настоящее время при прогнозе погоды.
- Использование алгоритмов, в которых физические параметры математической модели разделены алгоритмическими методами и могут включатся, выключатся или изменятся в ходе решения задачи. Аналогично разделено задание и изменение граничных и начальных условий, которые также могут быть переустановлены в процессе решения.
- Предусмотрено несколько методов визуализации волнового поля, которое может быть осуществлено в виде квази-трехмерного поля, поля изолиний уровня или цветных штриховых закрасок, или комбинации из этих изображений. На эти поля также могут быть наложены стрелки векторного поля потоков или скоростей течения. Моделирование распространения волн может быть остановлено по команде с клавиатуры, и затем произведена перестройка расчетной области или физических характеристик численной модели, добавлено новое внешнее возмущение и продолжен расчет.

5. Процедура "Seismic List". База данных с графическим и табличным представлением истории сейсмических и событий цунами, которые представляются в режиме иллюстративной графики. События из этой базы данных могут выбираться непосредственно из процедур кинематического (Time) и динамического (Simulation) моделирования.

- Каталоги землетрясений и цунами обслуживаются интерактивной системой, которая позволяет оперативно делать выборки из каталога, сортировать его и осуществлять поиск конкретных записей. Каталог оформлен также и в виде отдельной программы: WORLD, которая в обычном режиме выполняет предварительное вычисление размеров региона, и показывает на экране карту с нанесенными на нее событиями.
- Основной режим использования каталога это подфункция из комплекса программ для проведения вычислительных экспериментов, где при обращении к каталогу с указанием конкретного географического региона, фактически подготавливается информация для анализа сейсмической активности и цунами в исследуемой области.

1.2. Интерпретация океанологических данных и результатов вычислений с помощью программного комплекса MARIO

Второй крупный программный модуль - **MARIO**, предназначен для организации хранения и обработки временных рядов наблюдения за уровнем моря и приливным режимом, он может быть использован также при работе с сейсмологическими и другими данными. Форматы для представления мареографных рядов создавались с целью унификации представления наблюдений за уровнем моря и для обеспечения доступности ранее накопленных материалов для широкого круга исследователей. С каждым временным рядом связано его описание, которое состоит из названия пункта, его географических координат, времени начала наблюдений, дискретности, длины ряда и способа его представления в базе данных.

В процессе решения различных задач по обработке результатов наблюдений за уровнем моря управляющая программа пополнялась соответствующими алгоритмами. В настоящее время с рядами можно проделывать операции по редактированию, восстановлению и интерполяции. Реализовано множество арифметических операций, 4 алгоритма фильтрации, пересчеты наблюдений с морских точек на береговые, а также с моря на мареограф и обратно. Предусмотрено также обращение к приливной базе данных, из которой автоматически выбирается приливной ряд для текущей записи.

Программа МАRIO поддерживает базу данных для работы с годовыми приливными рядами и их гармоническими постоянными, которая состоит из интерактивной системы для работы с приливными гармоническими постоянными и процедурами поддержки годовых рядов наблюдений за уровнем моря в специализированном формате, который учитывает цифровки мареограмм на гидрометеопостах.

Программа MARIO адаптирована к нуждам оперативной службы предупреждения о цунами и позволяет визуализировать текущее состояние приливного режима в виде географической карты, на которой нанесены названия защищаемых пунктов и двухсуточные кривые приливной волны. Приливные данные могут быть представлены виде комплекта графиков суточных приливов и высот опасных волн цунами на фоне прилива.

1.3. Выполненные научные разработки и нерешенные проблемы

В плане научной новизны методов, реализованных в вычислительном эксперименте, в первую очередь необходимо отметить собственно алгоритмическую реализацию всего интерактивного программного комплекса ANI в целом. В данном случае речь идет о проектировании сложной графической системы, в которой алгоритмические методы программирования используются с целью достижения максимальной скорости вычислений, а также с учетом необходимости поддержания удобного диалога с исследователем. Собственно стилистическая основа вычислительной среды исполнена в правилах "функционального программирования" [Баррон, 1980], где математические модели могут изменятся без опасности разрушения основной структуры программы.

В основе графической системы и математики для картографических преобразований заложена полная тензорная схема преобразования координат с сохранением прямой и обратной матрицы трансформации. Это позволяет пользоваться простыми и наглядными правилами координатных преобразований, и, как оказалось, такое решение задачи о преобразовании координат требует минимального числа вычислительных операций.

Для моделирования кинематики волновых фронтов была разработана специальная четырех-точечная расчетная схема, в которой используются производные по направлению. В отличие от известных схем с 8-и и 16-и точечными шаблонами, которые при расчетах на ровном дне дают соответствующие многоугольники, данная схема рисует криволинейные фронты по форме очень близкие к окружности. В новой 4-х точечной схеме полностью отсутствует проблема перескакивания волнового фронта через "тон-кие острова", более точно отслеживаются особенности рельефа морского дна, расчет ведется существенно быстрее и для хранения линии фронта требуется соответственно в 2 или в 4 раза меньше оперативной памяти ЭВМ.

В новом алгоритме расчета волновых фронтов достигнута достаточно высокая гладкость линии фронта, что позволило реализовать быстрый расчет коэффициентов усиления волны цунами на основе модели «сверхдлинных» волн (не зависящих от периода волны). В данной модели используются уравнения одномерного наката с учетом сходимости лучевых трубок (с учетом кривизны фронта). К сожалению, так как при расчетах волновых фронтов по четырех точечному шаблону, на ровном дне, все-таки не получается формы точной окружности, то погрешности в кривизне линии фронта накапливаются при проведении расчетов коэффициентов усиления, что не позволяет говорить о готовности данного метода к использованию в действующих оперативных службах. Тем не менее, при определенных условиях задания исходных данных на реальной батиметрии, указанный метод расчетов амплитуды первого вступления волны цунами дает погрешности в пределах 15÷20 % и может быть рекомендован к использованию при экспертных оценках воздействия цунами на побережье.

Суть неразрешенной проблемы кроется в том, что для получения гладких и точных линий волновых фронтов в процессе счета необходимо получать в каждой точке расчетной области с высокой точностью решение следующего неявного уравнения,

140

относительно величины Т - уточненного времени в центральной точке расчетного шаблона:

$$\sqrt{\left(\frac{D_X}{T-T_X}\right)^2 + \left(\frac{D_Y}{T-T_Y}\right)^2} = C,$$

где: D_X , D_Y - размеры ячейки расчетной сетки; T_X , T_Y - отсчеты времени на концах крестового шаблона; С - осредненная по шаблону скорость волны.

Опробованные нами стандартные методы решения этого уравнения, дающие необходимую точность, требуют чрезмерно большого времени счета, а использованный нами быстрый метод решения собственного изобретения не дает желаемой точности.

Для построения лучевой картины были разработаны алгоритмы, использующие дополнительную матрицу, в которой хранятся углы подхода волнового фронта. Затем подобраны схемы интегрирования с автоматически центрирующимися шаблонами, которые позволяют вычислять лучи и фронты с высокой точностью и с очень высокой скоростью, достаточной для быстрой прорисовки луча и фронта вслед за курсором, движущимся по экрану ЭВМ. Необходимо отметить, что для оптимальной прорисовки лучевой картины, нет возможности автоматического выбора углового шага, так как обычно лучи сильно искривлены и часто образуют "каустики" - линии в которые собираются все лучи. Поэтому ускоренное изображение лучей на экране ЭВМ, с ручной отметкой наиболее показательных лучевых линий, является единственным и оптимальным способом графического изображения лучевых полей. Такой же метод необходим для выявления участков побережья с интенсивной сходимостью лучей, участков, на которых будет происходить концентрация волновой энергии в момент первого вступления волны цунами.

В качестве вычислительной модели динамики океанских волн был выбран метод "Конечного объема", [Андерсен и др, 1990] позволяющий описывать физику явления непосредственно в компьютерной или вычислительной терминологии. В данном случае - это модель длинных волн, заданная в потоках, и определенная на сферической Земле с равномерной сеткой в меркаторской проекции. Вычислительная модель построена таким образом, чтобы все дополнительные физические характеристики, как сферичность и вращение Земли; трение о морское дно и воздействие атмосферы, могли бы отделятся или добавляться к основным уравнениям по команде исследователя, в любое время в процессе моделирования. Такие уравнения можно определить как разделяющиеся по физическим параметрам [Белоцерковский, Давыдов, 1982]. Так как при построении вычислительной модели не делалось никаких допущений о малости конвективных и других членов уравнений, то можно считать что она основана на полных уравнениях гидромеханики [Астарита, Маруччи, 1978], для которых, конечно, необходимо дополнительное исследование реологических свойств моделируемой жидкости [Храмушин, 1990], но такая задача выходит за рамки организационно-технических вопросов, освещаемых в данной книге.

Реализовано также моделирование воздействия атмосферного циклона или тайфуна, который может двигаться по произвольной криволинейной траектории, заданной временным расписанием движения, где вдоль траектории плавно меняются размеры атмосферного вихря, величина давления воздуха в его центре, скорость максимального ветра и коэффициент поверхностного напряжения на границе вода-воздух. Данная реализация сделана таким образом, чтобы без специальной переработки структуры программы можно было бы подключить оперативные карты реального атмосферного давления и распределения ветра.

Простейший способ введения в расчетную область приливной волны - это генерация внешнего возмущения на свободных границах с помощью периода и амплитуды входящей волны, которые могут быть заданы с помощью приливных гармонических постоянных (¹). В настоящей версии программы реализовано прямое воздействие на поверхность моря со стороны Луны и Солнца, а также обращение к базе данных приливных гармонических постоянных. При простейшем использовании этой базы данных, может быть выбран один комплект гармоник, который в последствии будет применятся как обычная входящая волна на свободных границах. Для моделирования же реального приливного режима реализован метод возмущения уровня моря вблизи мареографных постов, для которых известны реальные гармонические постоянные. Таким образом, для восстановления приливного режима полузакрытого моря или океанского побережья, необходимо провести длительное предварительное моделирование, до стабилизации переходного режима, когда вынужденные колебания, генерируемые в окрестностях мареографных постов, придут к полному согласованию с вынужденными колебаниями во всей водной акватории. Моделирование приливного режима в Охотском море, результаты приведены в третьей главе, показало качественное восстановление полусуточной и суточной составляющей прилива, которая нагнетается в Охотское море из Тихого океана. В главе показывается принципиальная возможность непрерывного вычислительного мониторинга приливного режима в Охотском море. Но, к сожа-

¹) Длительные во времени измерения скоростей течения невозможны по чисто техническим причинам. Невозможно также и предсказание потоков жидкости в море и вблизи побережья с помощью гармонического анализа, так как динамика течений обуславливается не только длинноволновыми процессами, но также и устойчивыми во времени и подвижными в пространстве вихревыми процессами, которые аккумулируют энергию взаимодействия атмосферы и океана.

лению, в настоящее время удовлетворительного решения еще не получено, по нижеследующим причинам.

1. До настоящего времени еще не в полной мере завершена работа по учету приливообразующих сил, вызываемых влиянием Луны и Солнца непосредственно на поверхности Охотского моря

2. Тестовые расчеты требуют огромного времени вычислений, особенно в случае подключения к расчету динамических факторов непосредственного влияния Луны и Солнца (в этом случае, кроме нескольких арифметических операций на каждую расчетную ячейку, определяющих дифференциальные уравнения гидродинамики, добавляются несколько тригонометрических функций для вычисления видимых из каждой расчетной ячейки угловых координат Луны и Солнца, что фактически обесценивает внедренные в программу разработки по ускорению вычислений, и приводит к существенному снижению скорости вычислений) *.

3. Пока нет возможности для подбора и комплектования необходимого количества генерирующих мареографных постов, численность которых должна быть достаточной для перекрытия районов со свободными границами, так чтобы расстояния между ближайшими генераторами не превышали пространственной протяженности приливной волны (в открытой печати нет достаточного количества данных о гармонических постоянных, относящихся к Курильским проливам, так же как и к другой информации о гидродинамических процессах в территориальных водах России).

4. Для постановки качественного вычислительного эксперимента, необходимо предварительное решение задачи о выборе места генераторов волн вблизи побережья, которые по частотным и фазовым характеристикам должны соответствовать реальным мареографным постам, на которых производилось вычисление гармонических постоянных (это означает эквивалентное смещение фаз приливных волн с помощью подбора местоположения и глубины моря в районе мареографных постов так, чтобы произошло согласование реальных и расчетных времен пробега длинных волн по мелководному шельфу). Для выполнения указанной работы необходимо выполнить кинематический анализ времен прохождения длинных волн, а также выработать поправки к фазовым

^{*)} В 1997 году указанная работа уже выполнена и проведены первые пробные расчеты моделирующие непосредственное воздействие Луны и Солнца на океанскую поверхность всего Земного шара, Тихого океана, а также Охотского моря. По мнению авторов полученные предварительные результаты можно определить как вполне удовлетворительные и качественно соответствующие известным распределениям амплитуд приливов вдоль побережья. К сожалению, утвердительные выводы о полном соответствии разработанной вычислительной модели и динамики реального прилива еще не делались, что в немалой степени обусловлено недостаточными вычислительными ресурсами, имеющимися у авторов для проведения комплексных и длительных во времени вычислительных экспериментов.

характеристикам «генераторов» прилива, работа, для выполнения которой необходимо иметь достаточно точные цифровые карты с батиметрическим описанием морского дна в районах установки мареографных постов, и которые к настоящему времени недоступны (или их вовсе не существует).

1.4. О методах обеспечения качества численного моделирования длинноволновых процессов

При создании системы программ для проведения вычислительного эксперимента, особое внимание уделено выполнению аппроксимационных критериев для правильного описания геометрической формы волны. Известно, что при подходе к мелководному шельфу, волна цунами становится очень короткой, при проведении вычислительного эксперимента это грозит тем, что она может стать меньше чем шаг расчетной сетки. Если же длина моделируемой волны становится равной двум шагам сетки, что соответствует частоте Найквиста, то соответствующая ячейка становится источником вынужденных колебаний с очень высокой добротностью. Активизация возмущений от таких точек может полностью исказить характер отражения волны цунами от побережья.

Внешне, механизм разрушения решения выглядит следующим образом. На трехмерной картине волнообразования "осциллирующая" точка выглядит как малоподвижный пик стоячей волны с высокой амплитудой. Образуются такие пики в районах мелководья. При этом в смежных точках, в которых глубина существенно больше, начинают возбуждаться высокочастотные колебания со столь же огромной амплитудой. В математическом плане это означает, что производится дифференцирование совсем не малых величин, что не соответствует постановке задачи об аппроксимации плавных функций с помощью конечных разностей.

Если же аппроксимационные критерии нарушаются в нескольких смежных точках или в целой расчетной области, то в этом районе можно наблюдать высокочастотные пространственные осцилляции, где во всех смежных точках амплитуда волны имеет различные знаки, что должно восприниматься как явный признак полного нарушения аппроксимационных критериев, которые приводят к разрушению решения во всей расчетной области..

Для решения указанной проблемы задействован целый комплекс средств, и первый из них - это наблюдение за ходом отражения волны цунами от побережья, для чего весь процесс решения визуализируется в виде мультфильма на графическом терминале ЭВМ. Во вторых, предусмотрен механизм отсечения мелководья, превращением его в береговую зону, это по крайней мере не позволит возникнуть осциллирующим точкам, с непредсказуемой частотой генерируемых волн. И коренное решение проблемы происходит, если при подходе волны цунами к заданному участку побережья, произвести
смену батиметрии на более подробную и охватывающую меньший регион, после чего все физические поля переинтерполируются и переносятся на более подробную расчетную сетку, с улучшенными аппроксимационными свойствами.

Чтобы осуществить практическую реализацию предложенной методики, в программном комплексе предусмотрена возможность контроля периода волны во времени в соответствии с количеством аппроксимирующих эту волну точек в пространстве. Предусмотрено несколько методов визуализации волнового поля, которые могут быть осуществлены в виде квази-трехмерного поля, поля изолиний уровня, или цветных штриховых закрасок и комбинации из этих изображений. На эти поля также могут быть наложены стрелки векторного поля потоков или скоростей течения. Моделирование распространения волн может быть остановлено по команде с клавиатуры, и затем произведена перестройка расчетной области или физических характеристик численной модели, добавлено новое внешнее возмущение и продолжен расчет.

Глава 2. Математические и вычислительные модели

2.1. Кинематическая модель волновых фронтов и лучей

Для обобщенного и качественного анализа расчетной области удобно использовать упрощенную модель, которая позволяет построить поле времен добегания волн от произвольного источника цунами. Это кинематическая модель, известная как алгоритм быстрого расчета волновых фронтов. В ее основе лежит сортировка точек на линии фронта волны по временам пробега, полученным на основе принципа Гюйгенса для точечных излучателей. Основная часть алгоритма основывается на поиске фронтовой точки (среди точек включенных в специальный список), у которой текущее время (пробега) является минимальным. Найденная точка используется в качестве излучателя, вовлекая в список фронтовых точек ближайшие смежные точки, сама же излучающая точка при этом исключается из фронтового списка.

В процедуре Time, программы ANI, реализован новый фронтовой шаблон - типа "крест", на котором кроме вычисления минимальных времен производится уточнение времени в центре шаблона с помощью оценки направления излучения по всем четырем лучам шаблона.

Для уточнения времени в центре шаблона используется следующее неявное уравнение:

$$\sqrt{\left(\frac{\mathbf{S}_X}{\mathbf{T}_0 - \mathbf{T}_X}\right)^2 + \left(\frac{\mathbf{S}_Y}{\mathbf{T}_0 - \mathbf{T}_Y}\right)^2} = \mathbf{C} = \sqrt{\mathbf{g} \cdot \mathbf{H}} \,.$$

В версии программы ANI за 7 января 1996г, поправка ко времени в центре шаблона аппроксимируется следующим приближенным выражением:

$$\Delta T_0 = \frac{\sqrt{\delta T_x^2 + \delta T_y^2}}{1.36} \cdot \left(\frac{\max(\delta T_x / S_x, \delta T_y / S_y)}{\sqrt{(\delta T_x / S_x)^2 + (\delta T_y / S_y)^2} - 1.01} \right),$$

где: S_X, S_Y - шаг расчетной сетки; T_θ, T_X, T_Y - расчетное время прихода фронта волны в центре и на концах крестового шаблона; ΔT_θ - поправка времени прихода волны в центральную точку шаблона; $\delta T_X = T_X - T_\theta$, $\delta T_Y = T_Y - T_\theta$ - разности времен прихода волн между центральной и концевыми точками шаблона; С - скорость распространения волны в центре шаблона; **H** - глубина моря.

Поле времен получается достаточно гладким, и по нему возможно восстановление лучевой картины для визуализации распространения фронта волны. С целью ускоренной прорисовки волновых лучей и фронтов, которая выполняется в темпе движения

курсора по графическому экрану ЭВМ, а также для повышения точности интегрирования, в оперативной памяти выделяется дополнительная матрица для сохранения косинусов углов подхода фронта волны к расчетной ячейке.

Указанную вычислительную модель можно отнести к гидродинамическому моделированию нулевого порядка, которое допускает построение поля коэффициентов усиления волны цунами на основе предположения о сверхдлинных волнах, в котором коэффициент усиления вычисляется из условия сходимости лучевых линий (кривизны фронта) и не зависит от периода волны. В случае четырехточечного шаблона, результат вычисления коэффициента усиления может быть определен с помощью операции суммирования, которая осуществляется в процессе выбора фронтовых точек, при вычислении поля времен добегания фронта волны:

$$\zeta = \frac{\sum_{d=\delta N, \delta S, \delta W, \delta E} d \cdot \zeta_d}{\sqrt{(N-S)^2 + (W-E)^2}},$$

где: *N*, *W*, *S*, *E* - отсчеты времени в точках шаблона, отмеченных сторонами света; δN , δW , δS , δE - разности времен между концевыми точками шаблона и его центром; ζ_D - величина уровня моря в точках шаблона, отмеченных направлением *d*.

Реализованная в программе возможность быстрого построения и прорисовки волновых лучей может быть использована для визуального определения участков побережья, на которых происходит концентрация волновой энергии, связанная с фокусировкой фронта для первого вступления волны цунами.

Достоинством нулевого (или кинематического) приближения при проведении вычислительного эксперимента является высокая скорость при проведении расчетов времен пробега волн и выявления участков побережья с наибольшим усилением амплитуды первого вступления волны цунами. Недостатком является то, что результаты справедливы только в первые моменты времени вступления волны цунами. Оценки коэффициента усиления полученные на фронте волны цунами, по вышеуказанной методике, не могут быть отнесены к реально опасной амплитуде волны, так как максимальная волна цунами может образоваться у побережья после прохождения нескольких волн, и иметь амплитуду обусловленную как собственным периодом цунами, так и частотными свойствами маршрута ее движения. Если рядом с береговым пунктом имеется обширная шельфовая зона, то развитие волнового процесса вблизи берегов будет подчиняться геометрическим свойствам мелководного шельфа, на котором может образоваться аккорд из нескольких "собственных" волн, усиленных воздействием цунами.

Более реальную волновую картину можно получить путем постановки прямого вычислительного эксперимента, в основе которого лежат уравнения гидродинамики, с граничными условиями согласованными со свойствами прибрежной топографии и реологией жидкости.

2.2. Уравнения длинных волн в полных потоках

Уравнения первого порядка обычно называют линейными уравнениями длинных волн, которые определяются с помощью уравнения движения и условия неразрывности жидкости [Егоров, 1974]. Уравнения определены на Меркаторской картографической проекции и скорректированы поправками на вращение Земли и вязкостные свойства жидкости [Вyung Ho Choi, 1980]:

Уравнение неразрывности:
$$\widetilde{\zeta}$$
 $-=\left(-\frac{\delta U_y}{\delta y} + \frac{\delta U_x}{\delta x}\right) \cdot \frac{\cos \varphi_0}{\cos \varphi} \cdot dt,$ Уравнения движения: $\widetilde{U}_x = g \cdot D \cdot \frac{\delta \widetilde{\zeta}}{\delta x} \cdot \frac{\cos \varphi_0}{\cos \varphi} \cdot dt,$ $\widetilde{U}_y = g \cdot D \cdot \frac{\delta \widetilde{\zeta}}{\delta y} \cdot \frac{\cos \varphi_0}{\cos \varphi} \cdot dt,$

Поправки Кориолиса:
$$\begin{split} \widetilde{\mathbf{U}}_{\mathbf{x}} &\mathrel{+}= 2 \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot \sin \boldsymbol{\varphi} \cdot \widetilde{\mathbf{U}}_{\mathbf{y}} \cdot \mathrm{dt} &= 1.4544 \cdot 10^{-4} \cdot \sin \boldsymbol{\varphi} \cdot \widetilde{\mathbf{U}}_{\mathbf{y}} \cdot \mathrm{dt}, \\ \widetilde{\mathbf{U}}_{\mathbf{y}} &\mathrel{-}= 2 \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot \sin \boldsymbol{\varphi} \cdot \widetilde{\mathbf{U}}_{\mathbf{x}} \cdot \mathrm{dt} &= 1.4544 \cdot 10^{-4} \cdot \sin \boldsymbol{\varphi} \cdot \widetilde{\mathbf{U}}_{\mathbf{x}} \cdot \mathrm{dt}, \end{split}$$

$$U_{x} = \widetilde{U}_{x} \cdot \frac{K_{v} \cdot |\vec{U}|}{D^{3}} \cdot dt,$$
$$U_{y} = \widetilde{U}_{y} \cdot \frac{K_{v} \cdot |\vec{U}|}{D^{3}} \cdot dt,$$

Поправка на донное трение:

- *где:* Выражение: $F \pm = f(x) \cdot \delta x$ соответствует синтаксису языка программирования C++, и использовано здесь для выражения порядка разделения уравнений по физическим параметрам. Его необходимо понимать как: $F = F \pm f(x) \cdot \delta x$.;
 - D [м] глубина спокойного моря
 - ζ [M] отклонение уровня моря от равновесного состояния;
 - φ, φ_0 широта в расчетной точке и приведенная широта Меркаторской карты $\vec{U}[m^2/c] = \vec{V} \cdot D$ вектор полного потока жидкости $\vec{V}[m/c] = \frac{1}{D+z} \cdot \int_{-D}^{c} \vec{V} dz$ осредненная по глубине скорость жидкости

Если уравнения используются в приведенных операциях интегрирования без дополнительных алгебраических преобразований, то суть этих операций необходимо связывать с описанием существенно нелинейных процессов [Белоцерковский, Давыдов, 1982]. Последнее особенно справедливо в отношении Курило-Камчатского региона, где рельеф океанского дна очень сильно изрезан, с большими поверхностными градиентами в глубоководном желобе, и обширными зонами мелководного шельфа в районе Северных и Южных Курил.

Сделаем здесь предположение, что вышеупомянутые нелинейные вычислительные факторы в реализованных вычислительных моделях все-таки отвечают физике естественных процессов в океане, и скорее уточняют результаты моделирования, нежели вносят случайные погрешности в процессы вычислений [Храмушин, 1988]. Те не менее для удовлетворительного решения при таких предположениях, необходимо учитывать весь комплекс аппроксимационных свойств, присущих разностным вычислительным схемам для нестационарных систем дифференциальных уравнений.

2.3. Условия и критерии моделирования.

Граничные условия вблизи побережья специально не ставятся, так они выполняются по естественному правилу: $C = \sqrt{\mathbf{g} \cdot \mathbf{D}}$, где скорость волны обращается в ноль вместе с указанием нулевой глубины на побережье. Это естественное условие, которое соответствует реальным физическим процессам в океане, где отражение волновой энергии происходит не от побережья, а в полной мере обусловлено геометрией океанского дна, свалами глубин и зонами захвата волновой энергии, которые на мелководных участках шельфа обладают высокой добротностью.

На глубоководных "свободных" границах расчетной области задаются условия излучения, которые экстраполируют форму волнового поля на одну ячейку за пределы расчетной области. В аналогичных уравнениях аэродинамики такая экстраполяция выполняется с помощью пространственного дифференцирования более высокого порядка, что соответствует вычислению скорости распространения возмущений. В океанологии такое дифференцирование не приводит к устойчивому результату, так как скорость длинных волн находится в прямой зависимости от глубины моря. Если же предположить, что амплитуда волны цунами мала по сравнению с глубиной моря, что для "свободных" границ в задаче о цунами вполне справедливо, то скорость распространения возмущений на этих границах может быть успешно заменена обычным соотношением для скорости распространения длинных волн на мелкой воде: $C = \sqrt{g \cdot D}$.

Обычно, здесь же удобно наложить внешнее возмущение, заданное с помощью дифференциала (*приращения*) во времени:

$$\frac{\delta\zeta}{\delta t} = \frac{\delta\zeta(t)}{\delta t} \pm \vec{C} \cdot \left(\frac{\delta\zeta}{\delta \vec{r}} + \frac{\delta\zeta(t)}{\delta \vec{r}}\right),$$

где:

 $C = \sqrt{\mathbf{g} \cdot \mathbf{D}}$ скорость волны; $\delta \mathbf{r} = \sqrt{\delta x^2 + \delta y^2}$ контрольный размер ячейки; $\frac{\delta \zeta}{\delta \vec{r}} = \overline{grad}(\zeta)$ по определению - есть градиент наклона поверхности моря.

Приведенные уравнения аппроксимируются явной схемой первого порядка на центрированном разностном шаблоне. Устойчивость расчетной схемы во времени определяется критерием Куранта, который определяется через минимальное время, за которое свободная волна пересекает противоположные границы одной расчетной ячей-ки:

$$\Delta \mathbf{T} \leq \frac{\delta y \cdot \delta x}{\left(\delta \vec{\mathbf{r}} \cdot \vec{\mathbf{C}}\right)_{\max}} \cdot 0.8,$$

здесь бу, бх - пространственный размер расчетных ячеек.

При вычислении ΔT производится анализ всей расчетной области и выбирается минимальная величина ΔT , которая зависит как от изменяющихся размеров ячеек бу, δx , так и от глубины моря.

Пространственное картина волнообразования может быть охарактеризована аппроксимационной гладкостью, качество которой определяется количеством опорных точек, участвующих в построении пространственного полупериода волны. Для гиперболической системы уравнений, описывающей динамику океанских волн, аппроксимационный критерий может быть связан с минимальной глубиной моря, на которой моделируемая длинная волна аппроксимируется минимально-допустимым количеством узлов **К**:

$$\mathbf{D}_{min} \geq \left(\frac{K \cdot \delta \mathbf{r}}{\mathbf{T}_{min}}\right)^2 / \mathbf{g}.$$

 D_{\min} - минимальная глубина моря, при условии отсутствия которой в расчетной области, моделирование в целом можно считать справедливым; T_{min} - минимальный период длинных волн, который может проявится после задания начальных условий, либо искусственно сгенерирован в процессе вычислений; K - минимальное допустимое количество точек, аппроксимирующих волну с периодом T_{min} на участке моря с глубиной D_{min} .

Обычно этот минимум достигается в шельфовой зоне или непосредственно вблизи побережья. Так как нас интересует именно близ-береговая зона, то последний критерий является также условием выбора минимальной глубины моря, на которой еще допускается моделирование движущейся со стороны океана волны цунами. Из практики вычислений известно, что при моделировании первых одного - двух периодов волны цунами - K может быть принято в пределах: 4 ÷ 6, для длительного же моделирования волнообразования в шельфовой зоне или при восстановлении приливного режима, этот критерий должен быть увеличен до: $K \ge 24$.

2.4. Эмуляция плоского наката

Аппроксимационные критерии нарушаются на мелководье вблизи побережья, но именно этот участок моря наиболее важен для практики. Во многих прибрежных районах в этой области происходит сильная рефракция длинных волн, в результате чего волновой фронт ориентируется параллельно к берегу, тем самым реализуется практически «плоский накат». Приведенные ниже математические выкладки реализованы в программе **Mario**, они принадлежат **В.М.** *Кайстренко*, который принимал непосредственной участие как в подготовке алгоритмов, так и в тестировании результатов путем сравнения с данными реальных наблюдений [Го., Кайстренко, и др. 1988]

Пусть ось X направлена горизонтально в сторону моря и глубина растет по линейному закону $h(x) = k \cdot x$.. При этом линейное уравнение мелкой воды имеет вид:

$$(g\cdot k\cdot x\cdot \eta_x)_x = \eta_{tt},$$

где: g - ускорение силы тяжести, η - смещение уровня относительно равновесного. Общее решение этого уравнения имеет следующее представление через интеграл Фурье:

$$\eta(x,t) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\mathbf{a}(\omega) \cdot \mathbf{H}_{0}^{(1)} \left(2 \cdot \omega \sqrt{\frac{x}{k \cdot g}} \right) + \mathbf{b}(\omega) \cdot \mathbf{H}_{0}^{(2)} \left(2 \cdot \omega \sqrt{\frac{x}{k \cdot g}} \right) \right] \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot t} d\omega$$

где: $\tilde{\eta}(x,\omega) = \mathbf{a}(\omega) \cdot \mathbf{H}_0^{(1)}(Z) + \mathbf{b}(\omega) \cdot \mathbf{H}_0^{(2)}(Z)$ - трансформанта Фурье функции $\eta(x,t)$, и $Z = 2 \cdot \omega \sqrt{\frac{x}{k \cdot g}}$.

При этом из асимптотики функции Ханкеля: $H^{(1,2)}_{\lambda}(Z) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot Z}} e^{\pm i \left(Z - \frac{1}{2} \cdot \lambda - \frac{\pi}{4}\right)}$, следует,

что первое слагаемое описывает отраженную волну, а второе - падающую; $a(\omega)/b(\omega)$ - коэффициент отражения.

Численное решение на области с "обрезанной" прибрежной частью до расстояния L реализует обычное на этой границе условие непротекания:

$$\frac{d\eta}{dx}\Big|_{L} = 0 \quad |\Rightarrow \quad \mathbf{a}(\omega) \mathbf{H}_{0}^{(1)} \left(2 \cdot \omega \sqrt{\frac{L}{k \cdot g}}\right) + \mathbf{b}(\omega) \mathbf{H}_{0}^{(2)} \left(2 \cdot \omega \sqrt{\frac{L}{k \cdot g}}\right) = 0$$

что позволяет, учитывая представление для $\tilde{\eta}(x, \omega)$, выразить b(ω) через трансформанту Фурье численной мареограммы в точке L:

$$\mathbf{b}(\boldsymbol{\omega}) = -\frac{\pi \cdot Z_0 \mathbf{H}_1^{(1)}(Z_0)}{4 \cdot i} \cdot \widetilde{\boldsymbol{\eta}} \bigg|_L, \ Z_0 = 2 \cdot \boldsymbol{\omega} \sqrt{\frac{L}{k \cdot g}}.$$

Поскольку падающая волна задается источником, она не зависит от того, где и какое граничное условие поставлено, поэтому ее нужно теперь "довести" до берега. В новой модели без "вынужденной" стенки при X=L волновое поле имеет аналогичное представление, вообще говоря, с другими $a_1(\omega)$ и $b_1(\omega)$. Однако, поскольку мы проводим падающую волну до берега, то $b_1(\omega) = b(\omega)$. Так как на урезе особенности отсутствуют, то $a_1(\omega) = b_1(\omega)$ - (*полное отражение*) и решение представляется через функции Бесселя:

$$\widetilde{\eta}(x,\omega) = 2 \cdot a_1(\omega) \cdot y_0 \cdot \left(2 \cdot \omega \sqrt{\frac{x}{k \cdot g}}\right);$$

при этом трансформанта Фурье береговой мареограммы есть:

$$\begin{split} \widetilde{\eta}_{1}(0,\omega) &= 2 \cdot \mathbf{a}_{1}(\omega) = \frac{\pi \cdot Z_{0} \operatorname{H}_{1}^{(1)}(Z_{0})}{2 \cdot i} \cdot \frac{\widetilde{\eta}(\omega)}{L}, \\ \text{или, иначе:} \quad \widetilde{\eta}_{1}(0,\omega) &= -\frac{\pi}{2} \cdot \left(2\sqrt{\frac{L}{kg}}\right) \cdot \operatorname{H}_{1}^{(1)}\left(2 \cdot \omega\sqrt{\frac{x}{kg}}\right) \cdot \left[-i \cdot \omega \cdot \widetilde{\eta}(L,\omega)\right]. \end{split}$$

Сделав обратное преобразование Фурье, получим требуемое представление в виде свертки:

$$\eta_{1}(t)\big|_{0} = \int_{0}^{T-t} \frac{t-\tau}{\sqrt{(t-\tau)^{2}-T^{2}}} \eta'(\tau)\big|_{L} d\tau,$$

проинтегрировав по частям получим:

$$\eta_{1}(t)\big|_{0} = \int_{0}^{t-T} \sqrt{(t-\tau)^{2} - T^{2}} \eta''(\tau)\big|_{L} d\tau,$$

где: t > T, $T = 2\sqrt{\frac{L}{kg}} = \frac{2 \cdot L}{g \cdot H}$ - время задержки распространения волны от точки X=L

до берега.

Глава 3. Использование вычислительного моделирования в действующих службах предупреждения об опасных морских явлениях

Служба оперативного предупреждения о цунами является достаточно сложной как в техническом так и в организационном плане. В последние годы Сахалинская служба предупреждения о цунами не получала достаточного развития, что обусловлено не только отсутствием средств в самой службе, более существенные проблемы связаны с замораживанием научных исследований в области создания средств оперативного контроля и мониторинга состояния моря. Исходя из этого, авторами принято решение о опубликовании особенностей функционирования сахалинской службы предупреждения о цунами, с целью привлечения российской научной общественности к решению этой интересной и очень важной для Сахалина задачи.

Ниже представлена информация о сахалинской службе цунами, при этом наибольшее внимание уделяется техническим, математическим и организационным вопросам, которые разработаны в лаборатории цунами. Изложенные материалы необходимо воспринимать как технические предложения, подкрепленные соответствующими наработками сахалинских ученых. Авторы будут признательны при получении замечаний о предложенных концепциях и математических моделях, и очень благодарны за любые новые идеи, которые могут улучшить и ускорить решение задачи совершенствования сахалинской службы предупреждения об опасных морских явлениях и цунами.

3.1. Действующий регламент проведения тревоги цунами

В качестве основы рассмотрим действующую Службу предупреждения о цунами в Сахалинской области, которая отвечает за проведение тревоги по острову Сахалину, Курильским островам и по всему Российскому побережью Японского моря.

В состав службы входит Центр Цунами Сахалинского УГМС, сейсмические станции "Южно-Сахалинск" и "Северо-Курильск", Сахалинская ТТС АООТ Сахалинэлектросвязь, а также штаб по делам ГО и ЧС Сахалинской области, Оперативный Дежурный Службы Наблюдения за Флотом (ОДСНФ) управления "Сахрыба" и АООТ предприятие связи "Сахалинморсвязь". Сейсмостанции "Южно-Курильск" и "Малокурильское" были выведены из службы цунами весной 1994 года, во время землетрясения 5 октября 1994 года эти сейсмостанции были разрушены. (Данные по состоянию на апрель 1996 года).

Выработка решения о необходимости подачи тревоги цунами возложена на сейсмостанцию "Южно-Сахалинск", если землетрясение происходит в ближней зоне, то есть в радиусе 3000 км от Южно-Сахалинска. По своему регламенту сейсмостанция "Южно-Сахалинск" сразу же предупреждает Центр Цунами и штаб по делам ГО и ЧС Сахалинской области о начале регистрации сильного землетрясения и указывается время начала регистрации Р-волны. Сейсмостанции отводится 10 минут для определения координат эпицентра и магнитуды землетрясения.

За это время Центр Цунами и штаб по делам ГО и ЧС должны привести все средства связи и вычислительную технику в тревожный режим.

Тревога цунами подается сейсмостанцией «Южно-Сахалинск», после чего все действия связанные с проведением и отменой тревоги выполняются Центром Цунами СахУГМС, так как после объявления о координатах эпицентра и магнитуде землетрясения, сейсмостанция переходит к решению внутренних задач, напрямую не связанных с несением Службы цунами.

Тревога подается немедленно, если магнитуда составит М≥7 для Курило-Камчатских землетрясений. Для оповещения населенных пунктов на побережье задействуются регламентные средства связи Сахалинской ТТС и штаба по делам ГО и ЧС. (В настоящее время это, как правило, телетайпы, для Приморья непривилегированный телеграф, или обычные междугородние телефоны и радиосвязь службы ОДСНФ).

Если магнитуды находится в пределах от 6 до 7, то Центр Цунами отдает указание для всех метеопостов, расположенных вблизи берега, о начале наблюдения за уровнем моря. В этом режиме тревога цунами подается по факту наблюдения цунами на побережье. В настоящее время в Сахалинской области имеется около 20 прибрежных постов, большинство из которых таежные.

Центр Цунами может также объявить тревогу цунами без участия сейсмостанции, для чего он включен в международные списки оповещения и оборудован средствами связи с зарубежными службами предупреждения о цунами.

В последнее время надежность сейсмической службы существенно снижена, что обуславливается закрытием сейсмостанций на Курильских островах, а также внезапными отключениями сейсмостанции "Южно-Сахалинск" от электроэнергии. В связи с этим по СахУГМС издан приказ о несении службы цунами всеми метеопостами Сахалинской области, суть которого сводится к тому, что в случае факта ощущаемого землетрясения, метеопосты должны немедленно выходить на связь с Центром Цунами. На основании такой информации Центр Цунами может объявить тревогу цунами в ближней зоне без участия сейсмостанции "Южно-Сахалинск".

В течение всего времени проведения тревоги цунами, Центр Цунами находится на дежурстве, отвечая за решение вопроса о времени окончания или о расширении тревоги на другие регионы.

В настоящее время для расчетов времен добегания волн цунами до защищаемых пунктов используется математическое обеспечение для расчета времен добегания, разработанное в ИВЦ СОАН Новосибирска [Марчук и др., 1983]. Предвычисление приливного уровня моря и автоматизированное формирование комплекта тревожных телеграмм осуществляется с помощью математического обеспечения разработанного в лаборатории цунами ИМГиГ.

3.2. Предложения об использовании вычислительных экспериментов при проведении тревоги цунами

В настоящее время готовые математические комплексы для оперативного прогноза амплитуд и времени действия цунами, разработанные в лаборатории цунами, переданы в Центр цунами Сахалинского УГМС для опытной эксплуатации. В процессе опытной эксплуатации комплексы должны быть доведены до уровня оперативных географических экспертных систем, способных выполнять вычислительное моделирование распространения волны цунами сразу же после подготовки комплекта тревожных телеграмм и сообщений.

В Центре Цунами заполненные бланки телеграмм передаются на соседний компьютер, соединенный с ведущим компьютером с помощью локальной сети. По регламенту действующей на сегодня службы, со второго компьютера начинается рассылка телеграмм и ведущий компьютер останавливается в "ожидании следующего землетрясения".

Таким образом, на первом компьютере возможно выполнение расчетов прогнозируемых амплитуд волны цунами на защищаемом побережье, которое может выполняться последовательно в три этапа.

1. Расчет коэффициентов усиления на основе поля времен распространения фронта волны цунами, где используются зависимости, связанные со сходимостью лучей (или с кривизной волнового фронта). Данный алгоритм позволяет оценить амплитуду первого вступления волны цунами, которая является максимальной для открытого побережья.

2. На втором этапе необходимо определить влияние шельфовой зоны на процесс трансформации и усиления волн цунами, которое будет происходить спустя некоторое время после первого проявления цунами на побережье. Такой анализ обстановки на различных участках побережья может быть сделан с помощью информационной системы (или базы данных), в которой должны быть собраны исторические и расчетные

данные о проявлениях цунами в зависимости от двух параметров, - это период и направление подхода цунами к шельфовой зоне. Здесь предполагается оценивать максимальный заплеск волн цунами с учетом собственных частот близберегового шельфа. Экстремумы таких заплесков могут быть не на первой волне цунами. Так, к примеру для порта Корсаков первая волна цунами может быть менее полуметра, тогда как третья-четвертая волна может быть в три-четыре раза больше и достигать полутора метров.

3. Первые два оценочных расчета могут быть выполнены в считанные секунды и повторены в случае поступления новых данных о цунами с береговых постов наблюдения или сразу же после повторного уточнения координат и интенсивности землетрясения. При этом повторные оценочные расчеты могут быть выполнены на компьютере связи, после окончания регламентной рассылки телеграмм. Это означает, что на ведущем компьютере может быть начат длительный во времени вычислительный процесс полного моделирования динамики распространения цунами. В качестве начальных условий можно воспользоваться эмпирическими оценками очага цунами, сделанными на основе оперативной информации о местоположении и магнитуде эпицентра землетрясения. Цунами от далеких землетрясений могут быть смоделированы с помощью генерации волн на свободных границах расчетной области, где направление подхода может быть взято из расчета времен добегания и установлена единичная амплитуда волны с наиболее характерным периодом.

Конечно же нет полной уверенности в правильности такого задания начальных условий или граничных, однако эти параметры могут быть скорректированы в дальнейшем по данным поступающим от береговых наблюдателей, в результате чего могут быть введены поправки в расчеты, либо моделирование приостановлено и начато заново с новыми исходными данными об очаге цунами.

С помощью опережающего численного моделирования можно сделать наиболее обоснованные прогнозы о степени опасности цунами для конкретных населенных пунктов и участков побережья. Такое моделирование также необходимо для экспертизы решений о распределении сил при оказании экстренной помощи пострадавшим береговым поселениям.

Вопросы корректности расчетов и меты ускорения вычислений рассматриваются в следующем разделе. Отметим здесь только то, что к сожалению полная автоматизация вычислительных экспериментов по моделированию таких высокочастотных волновых процессов, как цунами, пока невозможна.

3.3. Регламент вычислений для уточненного прогноза цунами.

Учитывая, доступность эффективной вычислительной техники (в Сахалинском Центре цунами на дежурстве задействован компьютер IBM486DX-33), а также на основе многолетнего опыта исследования и реализации вычислительных экспериментов, предлагается выполнить комплекс работ по организационно-техническому совершенствованию службы цунами, с целью введения в регламент ее действий в тревожном режиме экспертно-прогностических работ с использованием комплекса гидродинамических вычислительных экспериментов.

Схема проведения вычислительного эксперимента, в котором задействованы все средства контроля аппроксимационных критериев, может быть представлена в виде нескольких этапов:

1. Первый этап подготовительный. Суть его состоит в подготовке комплектов батиметрических карт для каждого из защищаемых участков побережья, на которых должна быть произведена обкатка всех возможных источников цунами, и на основании этих работ составляется регламент проведения вычислений в тревожном режиме. Если защищаемые берега распадаются на группы, то в соответствии с количеством этих групп должно быть подготовлено такое же количество процессоров (компьютеров), объединенных в локальную сеть, для совместного решения задачи предупреждения всех пунктов одновременно. В процессе выполнения этого этапа должны быть также проведены тренировки дежурного персонала по использованию вышеупомянутого регламента в различных конкретных случаях.

2. При объявлении о цунамигенном сейсмическом событии, выбирается генеральная карта батиметрии, из условия покрытия всей области очага землетрясения с включением больших участков подробных карт второго уровня, по которым проходят маршруты волн цунами, в направлении защищаемых пунктов. Как правило, вся близбереговая зона, до глубины 200-500 метров, на этом этапе отсекается во избежание появления осцилляций в зонах нарушения критериев пространственной аппроксимации. Вычисления ведутся до тех пор, пока фронт волны цунами не достигнет зоны отсечения в том районе, по которому проходят основной поток энергии в направлении защищаемых пунктов. По достижении этой границы решение приостанавливается, и в случае, если моделирование ведется для группы защищаемых пунктов, то записывается образ программы из памяти ЭВМ, который может быть использован как для продолжения расчетов на другом компьютере, так и для повторения моделирования, с записанной "контрольной точки", для участков побережья отложенных во вторую очередь.

3. На основном (первом) компьютере производится смена батиметрии на более подробную, у которой линия отсечения проходит ближе к защищаемому побережью. Для запуска параллельных расчетов на других компьютерах, на них выполняется рестарт с

157

контрольной точки, записанной ведущим компьютером, затем, либо сразу же производится смена батиметрии, либо продолжается прерванный расчет для доведения волны цунами до другой зоны отсечения на маршруте распространения волн цунами.

4. Описанный процесс размножения решений для разных регионов может повторятся многократно и асинхронно для всех процессоров включенных в работу. Завершение переходов с карты на карту должно происходить либо в том случае, когда аппроксимационное ограничение глубины уменьшается до 1-2 метров, либо когда волна входит в замкнутые акватории, в которых существенное влияние оказывает переотражение волн от оконтуривающих эту область границ. К примеру если волна входит в замкнутый со всех сторон Южно-Курильский пролив, то необходимо оставить расчеты волнения в нем на длительный срок для оценки времени воздействия волны цунами на побережье, которое в данном случае оценивается сроком не менее 10-ти часов, а максимальная волна в Южно-Курильске может проявится через 2-4 часа после фронта первого вступления цунами. При этом ничто не мешает дождаться пока волна дойдет до линии отсечения в районе Южно-Курильска и произвести для него уточненный расчет непосредственно до самой кромки побережья.

5. Возможно осуществление перехода с подробной карты на укрупненную, что необходимо делать, к примеру, если землетрясение происходит у япономорских берегов Японии, тогда для точного описания очага цунами необходимо воспользоваться уточненной картой, на которой происходит генерация волны цунами и осуществляется моделирование отражения этой волны от побережья Японии. Так как расстояние от Японии до Приморья не может быть покрыто единой мелкосеточной картой, что было бы и неразумно ввиду многократного увеличения времени вычислений, то в данном случае можно воспользоваться переносом решения на загрубленную генеральную карту, по которой волна цунами доводится до зоны отсечения вблизи Приморья и Сахалина, затем снова осуществляется переход на более подробную карту для моделирования воздействия цунами на Российском побережье, с учетом основной волны цунами и ее отраженной от побережья Японии составляющей.

Опыт работы по проведению подобных вычислительных экспериментов при моделировании реальных цунами показывал очень хорошие результаты, которые, по нашему мнению, дают достаточно хорошее соответствие с мареографными записями цунами на интервале времени соответствующем количеству волн, сохраненных при переходе с одной карты на другую. Вполне удовлетворительные результаты получены также при оценке длительности процесса цунами, которую представилось возможным выполнить при моделировании цунами в октябре 1994 года.

3.4. Пример оценки заблаговременности предупреждения гидрофизической подсистемы цунами для острова Сахалин

Вблизи мыса Левенорна на острове Сахалин расположен хорошо оснащенный гидроакустический стационар СКБ САМИ ДВО РАН. В соответствии с программой ЕАСЦ, в начале 90-х годов на этом стационаре был установлен и испытан донный глубоководный регистратор цунами. Это кабельный прибор, вынесенный белее чем на 20 км в море, который зондирует поверхность моря гидроакустическими методами.

По нашим оценкам, гидроакустические методы могут оказаться наиболее эффективными в случае создания систем непрерывного и оперативного контроля морских течений, изменчивости уровня моря и характеристик штормового волнения, а также ледовой обстановки в шельфовой зоне и сейсмического фона Земли. Необходимо также учитывать, что задачи наблюдения за состоянием моря должны решаться комплексно, то есть на каждом береговом посту наблюдения должны стоять приборы контроля гидрофизических, гидрометеорологических и сейсмических параметров окружающей среды. В задачах же *заблаговременного* оповещения об опасных морских явлениях и природных катастрофах важную роль играет географическое положение такого оперативного поста наблюдения (см также часть 1 настоящей книги).



Рис.3 Южная часть Охотского моря и зоны заблаговременного предупреждения для береговых пунктов в Корсакове, Поронайске и в Ногликах обеспечиваемые гидрофизической станцией на мысе Левенорна.

Указанному критерию для острова Сахалин вполне удовлетворяет полигон СКБ САМИ на мысе Левенорна, который ближе всего подходит к глубоководной Курильской котловине и на котором уже установлен комплекс гидрофизического, гидроакустического и метеорологического оборудования, где имеются береговые лабораторные и жилые помещения.

Максимальное время, которое может обеспечить гидрофизическая станция на мысе Левенорна для выполнения действий по тревоге цунами, составляет 90 минут. Учитывая близость мыса Левенорна к Курильской котловине, оперативная регистрация скорости течения и изменения уровня моря позволит использовать установленный здесь гидрофизический пост в качестве опорной точки при вычислительном моделировании гидродинамических процессов в Охотском море, которое необходимо выполнять с целью прогноза не только цунами, но также штормовых нагонов и тягунов в портах всего Охотоморского побережья Сахалина и Курильских островов.



Рис. 4. Кинематическая картина длинноволнового взаимодействия между побережьем Сахалина и Курильскими островами. На рисунке также отмечена стационарная гидроакустическая трасса СКБ САМИ, на которой до 1992 года выполнялось изучение глобальных гидрометеорологических и гидрофизических процессов в южной части Охотского моря.

На рисунке показан кинематический расчет волновых фронтов от источника вытянутого вдоль Курило-Камчатского желоба. Хорошо видно, что на мысе Левенорна ранее всего регистрируются отклики на длинноволновые процессы в Тихом океане и на Охотоморском побережье Курильских островов. Комплексная гидрофизическая станция вблизи этого мыса может быть эффективно использована при прогнозе опасных морских явлений как цунами и штормовые нагоны.

Задействование в постоянном режиме акустического канала между Сахалином и Итурупом, может позволить, также, оперативно контролировать гидрофизику и гидродинамику во всей южной части Охотского моря, в том числе характер ветрового волнения и зыби, а также позволит регистрировать акустическими методами состояние сейсмической активности с целью прогноза землетрясений и извержений подводных вулканов.

3.5. Пример оперативного моделирования цунами 5 октября 1994 г.

Шикотанское цунами 5 октября 1994 г относится к наиболее значительным событиям на Курильских островах за последние годы. Его описание можно найти в [Иващенко и др., 1996], куда включен в сокращенном виде и материал настоящего раздела, включая рисунки. На рисунке 5 приведена обзорная схема этого события.

Самая первая попытка моделирования цунами производилась непосредственно в сахалинском Центре цунами, утром 5 октября 1994 года. Вычислительные ресурсы компьютера стоящего на дежурстве (PC-386/25), в соответствии с аппроксимационными критериями, позволяли проводить волну по Южно-Курильскому проливу с периодом не менее 12 минут. Расчетная область выбиралась исходя из скорости вычислений на данном компьютере, и размер ее был таким, что очаг землетрясения оказывался вне этой области. Тогда в качестве источника была выбрана одиночная волна с периодом 12 минут, входящая в Южно-Курильский пролив с юго-востока.

По результатам расчетов был определен характер распределения амплитуд цунами по Южным Курильским островам, где коэффициент усиления амплитуды цунами был оперативно скорректирован по сообщению с судовой радиостанции о высоте цунами в Малокурильской бухте, равной двум метрам. На основании вычислительного эксперимента было определена групповая структура волновых пакетов, которые проявлялись максимальными заплесками на побережье островов Южно-Курильского пролива с периодичностью приблизительно равной двум часам. Тревога цунами была отменена в 8ч 45м сахалинского времени, а по результатам расчетов последняя крупная волна цунами проходила около Южно-Курильска в 9 часов утра, что, в частности, отмечалось в процессе оперативных переговоров с наблюдателями в Южно-Курильске (в протоколах ведения тревоги цунами, такая отметка отсутствует).





В последующем, по мере накопления материалов о землетрясении и цунами на Южных Курилах, была произведена новая серия вычислительных экспериментов, с использованием более мощного компьютера: IBM-PC 486/66. В первую очередь был произведен расчет обратных изохрон от Кусиро, Ханасаки, Малокурильска и Южно-Курильска, которые с двух сторон касаются очага цунами. К сожалению мы не имеем достоверных данных о характеристиках волны цунами с островов расположенных к северу от очага землетрясения. Известны только экспедиционные измерения заплесков

в бухте Касатка, где мареограф не работает с 1983 года, а в Северо-Курильске цунами не превышает уровня волн зыби и не может быть надежно выделено по записи на мареографе.

Наиболее показательными являются три варианта численного моделирования цунами 5 октября 1994 года, которые были сделаны до получения данных об экспедиционных наблюдениях на Курильских островах.

1 **Оперативный** очаг цунами строился по эмпирическим формулам А.А. Поплавского, которые предназначены для оперативного использования в службе предупреждения о цунами. В данном случае в качестве исходных данных используется только магнитуда землетрясения 7.9 и координаты очага. Очаг строится в виде эллиптического поднятия уровня воды с амплитудой 2.7 м. и размерами осей 130х40 км. Ориентация задается с помощью направления малой полуоси, в соответствии с усредненным градиентом наклона дна под очагом, в сторону уменьшения глубины.

2 "*Сахалинский*" очаг цунами строился в соответствии с координатами афтершоков землетрясения, полученными на Южно-Сахалинской сейсмостанции. В данном случае используется разлом длиной 160 км., ориентированный поперек Курильского глубоководного желоба, при этом к северу происходит подъем уровня на полтора метра, а к югу такое же опускание. В источнике цунами задается начальное поле скоростей в направлении опускания дна. Размеры очага задаются исходя из требования численной аппроксимации, так чтобы период волны цунами был не менее 8 минут.

3 "Японский" очаг цунами был получен по FAX-у из Японии от Shuto N. (Tohoku University). Его размеры приблизительно 160 км вдоль желоба, где тихоокеанская сторона поднимается на 1.8 м., а остров Шикотан опускается на 70 см. При этом необходимо отметить, что японские измерения координат землетрясения сильно отличаются от сахалинских, а также от координат полученных из американских источников.

Первый вариант расчета имел период волны цунами в источнике приблизительно 3.5 минуты, что недопустимо по аппроксимационным критериям. Для удовлетворения этих критериев, через двадцать минут расчетного времени в Южно-Курильском проливе была произведена смена расчетной карты на более подробную. В это время волна цунами только еще подходила к острову Шикотан, и столь ранняя смена карты привела к потере достаточно большой части волновой энергии цунами, что привело к занижению амплитуд на всех Тихоокеанских мариографных точках (соответствующие значения помечены в таблице 1 звездочкой).

		Ba	Реальные		
Название	Глубина	1	2	3	Наблюдения
Малокурильское	19	3.3/-2.5	4.3/-4.2	3.4/-5.3	2.7,2.9-3.7
Южно-Курильск	11	1.6/-2.4	2.7/-2.3	3.0/-1.9	4.7,4.2
М. Рикорда	8	3.3/-3.0	2.0/-2.4	2.4/-3.0	-
М. Ловцова	8	2.4/-3.8	1.9/-1.7	1.9/-2.3	2.0
Б. Церковная	11	0.6/-1.2 ^{*)}	6.2/-3.3	6.2/-4.7	6.0-8.9, 16.6?
О. Зеленый	16	0.7/-1.7 ^{*)}	3.6/-2.4	3.7/-2.2	1.5,3.5
Ханасаки	8	0.4/-1.1 ^{*)}	3.1/-2.8	2.2/-1.4	3.4

Таблица 1. Результаты расчетов по основным географическим пунктам

Второй вариант очага цунами наилучшим образом согласуются с наблюдениями цунами на побережье. Только в этом случае получается достаточно слабое цунами в бухте Касатка, и сильное цунами на тихоокеанском побережье Хоккайдо, как это и наблюдалось в действительности.

Вариант с японскими данными, где очаг расположен вдоль Курильского желоба, дает волну цунами которая, должна существенно сильнее проявится на островах Кунашир, Итуруп и Зеленом, и не должен был образовывать сильного всплеска в сторону Тихоокеанского побережья Хоккайдо.

По результатам уточненного моделирования цунами с помощью более точного задания очага, и после сравнения с результатами экспедиционных измерений и записями мареографов, оперативное численное моделирование 5 октября 1994 года можно признать вполне удовлетворительным и чрезвычайно полезным для использования в оперативной службе предупреждения о цунами, и особенно для экспертизы воздействия цунами на побережье, которая должна выполняться непосредственно в процессе проведения тревоги. Выявленные недостатки, связанные с занижением амплитуды цунами на границах расчетной области, могут быть легко устранены путем увеличения вычислительной мощности дежурных компьютеров, что было показано последующим моделированием по уточненным очагам.

Еще раз хочется отметить, что неточности в определении положения эпицентра землетрясения могут устранятся, а результаты оперативного численного моделирования будут существенно уточняться, по мере поступления оперативных данных о прохождении реального цунами на побережье.



Рис.6. Результаты численного моделирования Шикотанского цунами 5 X 1994 в районе Южных Курил. *а* - форма очага возмущения уровня океана через 6 мин после землетрясения, максимальное возвышение в источнике 1,7 м; *б* - переход с обзорной расчетной батиметрии с шагом 1,8 км на более подробную (1км); в рамке изображен район Южно-Курильского пролива (новая расчетная область, см. в,г); *в* - прохождение первой волны цунами в Южно-Курильский пролив; [Иващенко и др., 1996 г.]. *г* - образование групповой структуры волн цунами и запирание волновой энергии в мелководном Южно-Курильском проливе.

На рис.5 показаны формы возмущенной поверхности океана в различные моменты времени, на расчетных картах с различным масштабом и шагом сетки, иллюстрирующие ход вычислительного эксперимента по моделированию Шикотанского цунами 5.10.94г. Под каждым рисунком указаны координаты левого нижнего угла сетки, вид картографической проекции, время с момента начала землетрясения (ч,м,с) и градации по высотам уровня, которые служат масштабной шкалой.

3.6. Опыт вычислительного моделирования приливного режима в Охотском море

Охотское море является уникальным регионом для полноценного исследования численных алгоритмов моделирующих приливной режим и режим течений.

Это в первую очередь обуславливается большой разностью широт между Пенжинской губой на севере и островом Хоккайдо на южной границе моря, наличием обширных шельфовых зон в районе Шантарских островов, заливах Терпения и Анивском, в которых зарождаются сильнейшие аккорды собственных высокочастотных колебаний. Большие сложности связаны также с мелководностью Пенжинской губы и обширного мелководного района вблизи Шантарских островов, здесь зарождаются собственные длинноволновые колебания уровня моря с периодом близким к суточному и с очень большими амплитудами приливных волн в вершинах заливов.

Положительным фактором для Охотского моря является его замкнутость и изученность приливного режима во многих пунктах его побережья [Таблицы приливов, 1960], что позволяет проводить качественную проверку численных моделей, граничных условий и методов генерации волновых колебаний уровня и течений.

Такое моделирование может быть использовано при обработке экспедиционных измерений, для более точного разделения приливной и постоянной составляющих течения. Любопытно также рассмотрение задач о восстановлении поля скоростей течений. По видимому, в зоне мелководного шельфа реализованная задача будет давать корректные результаты, в глубоководных же регионах решение задачи о приливах в полных потоках дает только дополнительную (интегральную) информацию, которая может быть использована при обработке результатов экспедиционных измерений течения на различных горизонтах.

Алгоритм восстановления приливного поля реализован для использования в условиях оперативных служб, осуществляющих наблюдение за наводнениями и цунами. Предполагается, что на одном из компьютеров будет производиться непрерывное моделирование приливного режима, а в случае получения прогноза о маршруте и интенсивности циклона, или при поступлении данных о цунамигенном землетрясении, на другом компьютере можно будет продублировать моделирование прилива и по сбалансированному (установившемуся) приливному полю поставить моделирование штормовых нагонов или волн цунами.

Вычислительное моделирование динамики вод Охотского моря является новой задачей, которая конечно же требует продолжения исследований с целью выработки решений для ускорения процесса восстановления приливного режима, а также для решения проблем, связанных с сеточной вязкостью, отсутствием законченных исследова-

ний о характере донного трения и влияния льдов в Охотском море. В действующей версии программы, к сожалению, не реализован учет приливообразующих сил (геопотенциала), не достаточно отработаны вопросы, связанные с законами управления уровнем моря в точках генерации приливной волны. Пока это достаточно сложные вопросы, так как их исследование требует значительных вычислительных ресурсов и времени для проведения численных расчетов.

Для восстановления приливного режима в Охотском море необходимо установить генераторы изменяющегося уровня моря в максимально большом количестве точек со свободными границами в Курильских проливах и в проливе Лаперуза. Для описываемого вычислительного эксперимента такие генерирующие точки имелись для Северо-Курильска, острова Матуа, бухты Касатка, Курильска и поселка Малокурильское, для пролива Лаперуза имелись точки на мысе Крильон и вблизи порта Корсаков. Генераторы приливных волн ставились также в районе Магадана и Охотского. Оценка качества восстановленного прилива производилась по точкам в вершине Пенжинской губы и в районе Шантарских островов. К сожалению качество используемых данных по наблюдениям за уровнем моря нельзя назвать удовлетворительным, данные были собраны из случайных источников [Kim Kye Yong, 1992, Таблицы приливов, 1960], не производилась адаптация фаз гармонических постоянных к смещениям генераторов в море, но основной недостаток исходных материалов состоит в том, что таких генерирующих точек было слишком мало, которые к тому же не перекрывали самый глубоководный пролив Курильской гряды - пролив Фриза.

Наиболее подробная карта, на которой производилось моделирование прилива, имела шаг 10 км. на 52° широты и размерность матрицы 325х374. В этом случае необходимо около 3-х мегабайт оперативной памяти, а вычисления на компьютере IBM-PC 482DX2-66 выполняются со скоростью близкой к реальному времени. В этом случае, в соответствии с аппроксимационными критериями, 4-х часовая приливная гармоника может моделироваться до 2-х метровой минимальной глубины у побережья.

При использовании 20 км сетки требуется около 750 кб оперативной памяти, минимальная глубина для 4-х часовой волны равна 8 метрам, а вычисления на том же компьютере ведутся со скоростью одна минута в секунду. Но оказалось, что даже на этой батиметрии возникла проблема большого расстояния между генераторами приливных волн. По изображению на экране было видно, что высокочастотная составляющая приливов образует "круги на воде", при этом большая часть волновой энергии рассеивалась и гасилась в Курильских проливах. Проявление такого эффекта не позволяло восстановить единый фронт для приливной волны излучаемой от Курильских островов в целом. Суточные же составляющие прилива восстанавливались на 20-ти километровой батиметрии вполне удовлетворительно.

167

Лучшие результаты с высокочастотной составляющей прилива были получены на батиметрии с шагом 39х33 км, которая давала аппроксимационные ограничения для 4-х часовой волны, равные 30-ти метрам. В связи с недостаточностью генерирующих точек в Курильских проливах, на этой батиметрии тоже происходило гашение полусуточной составляющей прилива, тем не менее по остатку можно было сделать выводы о корректности моделирования на качественном уровне. Размерность матрицы 64х64 позволила в два приема произвести вычислительный эксперимент перекрывающий интервал времени около 1-го года.



Рис.7. Карта приливного режима для побережья Охотского моря построенная с использованием гармонических постоянных (Огура, 1933г.)

Постановку полной задачи на восстановление приливного режима предваряло исследование отклика Охотского моря на полусуточную составляющую прилива M2, которая очень быстро восстанавливается в случае задания гармонических постоянных вдоль всей Курильской гряды. Особенностью приливной компоненты M2 для Охотского моря является то, что один из ее котидальных узлов расположен на шельфе в северной части Сахалина, и положение этого узла оказалось очень чувствительным к используемому в вычислительной модели коэффициенту придонного трения. Так если, основываясь на литературных источниках [Kim Kye Yong, 1992], воспользоваться коэффициентом: $K_{\nu} = 0.0025$, то котидальный узел исчезает с поверхности Охотского моря, смещаясь далеко вглубь острова Сахалин. Если же положить $K_v = 0$, то узел смещается от побережья Сахалина далеко в море. Результаты вычислительного эксперимента становятся удовлетворительными при $K_v = 0.0013$, когда котидальный узел устанавливается в районе Сахалинского шельфа. При этом подобранное таким образом значение K_v не следует воспринимать как оценку реального коэффициента донного трения, так как разница $\delta K_v = 0.0012$ со значением, приведенным выше, может быть обусловлена вязкостными свойствами вычислительной модели.



Рис.8. Мареографные записи уровня моря в различных постах наблюдения, зарегистрировавшие начальный период вычислительного эксперимента по моделированию приливного режима в Охотском море. Вычисления производились на батиметрической карте с шагом сетки 20 километров. Цифры справа показывают максимальные и минимальные значения уровня моря, зарегистрированные в изображенном интервале времени. Отметки на левой границе задают масштабную шкалу с шагом 1 метр.

На рисунке 8 показаны записи полученные в процессе установления приливного режима, на основании которых можно сделать вывод о том, что установление формы приливных колебаний происходит примерно через неделю расчетного времени. Этому факту соответствует приведение в соответствие фазовых и амплитудных характеристик моделируемого и реально наблюденного прилива. На основе численного анализа этих

мареограмм можно найти длительность процесса установления приливных (вынужденных) колебаний Охотского моря, который равен примерно 1-му месяцу. Этому сроку соответствует стабилизация среднего уровня моря во всех точках расчетной области, очень любопытного процесса, который можно использовать для моделирования постоянных течений, возникающих в том случае, если средний уровень в точках генерации приливных волн не удерживать на нулевой отметке, а попытаться вывести на какойлибо другой средний уровень.



Рис.9. Продолжение вычислительного эксперимента с целью попарного сравнения наблюденного (верхний ряд, без подписи названия) и восстановленного (нижний ряд с названием) прилива в нескольких пунктах Охотского моря, удаленных от генераторов вынужденных колебаний. Цифры справа показывают максимальные и минимальные значения уровня моря. Отметки на левой границе задают масштабную шкалу с шагом 1 метр.

По рисунку 9 можно сделать вывод о факте качественного восстановления приливного режима в Охотском море. Тем не менее, различие в ширине темной полосы означает, что в вычислительном эксперименте занижена высокочастотная составляющая прилива. Нельзя не заметить вычислительной проблемы, связанной с полугодовым изменением хода огибающей прилива в пункте Эвенск.

Таким образом, приливные гармоники Охотского моря, близкие к суточным и более длинным, хорошо моделируются с помощью "генераторов волн" установленных вдоль Курильской гряды, однако полусуточные и более высокочастотные колебания быстро угасают, так как в приведенном вычислительном эксперименте не учитывалось влияние приливообразующих сил, действующих непосредственно на поверхности Охотского моря.

3.7. Поверочное моделирование штормового нагона 7-8 ноября 1995 года

Для моделирования взаимодействия атмосферы и океана реализованы алгоритмы, которые допускают использование реальных или прогнозируемых полей атмосферного давления и ветра. Для тестирования этих алгоритмов и математических моделей в действующей версии программы реализовано прохождение модельного циклона по гладкой (сплайновой) траектории. Границы циклона задаются с помощью «малого круга», очерченного на поверхности сферической Земли, радиус которого задается в километрах. Динамическое взаимодействие океана и атмосферы задается только внутри этого «малого круга», путем плавного изменения давления в зависимости от расстояния до центра циклона. При необходимости может быть задано, также, вихревое поле ветра, спирально сходящееся к центру циклона.



Рис.10. Траектория центра и границы циклона 7-9 ноября 1995 года. В расчетах задавалась скорость ветра с экстремальным значением 30 м/с.

Здесь приводятся результаты первых пробных расчетов, которые сравнивались с реальным штормовым нагоном, вызванным циклоном, прошедшим над Сахалином 7-8 ноября 1995 года. К сожалению, в отличие от моделирования цунами и приливов, у авторов существенно меньше уверенности в корректности используемой математической модели, которая определяет взаимодействие океана и атмосферы. То есть, для доведения вычислительной модели до уровня, позволяющего говорить о реальном прогнозировании штормовых нагонов и тягунов, необходима отладка и совершенствование математических моделей и эмпирических зависимостей, по фактическим материалам которые имеются в Сахалинском УГМС, и интерпретация которых возможна только совместно со специалистами их морского отдела.

Дата	Время	Широта	Долгота	Давление	Примечание
1995.11.07	18:00	<i>40°</i> 00'	138°30'	975	Размер циклона 950 км.
1995.11.08	00:00	<i>46°</i> 00'	140 <i>°</i> 30'	965	
	06:00	47 <i>°</i> 30'	142 °00'	950	
	12:00	48 <i>°</i> 00'	<i>142°</i> 30'	950	Циклон остановился
	18:00	48 <i>°</i> 00'	<i>142°</i> 30'	950	
1995.11.09	00:00	48 <i>°</i> 30'	144 °00'	965	(с)95, М.Е. Кузнецов , СахУГМС

Таблица 2. Траектория циклона по данным Сахалинского УГМС.

Из протокола, полученного в результате вычислительного эксперимента, экстремальные величины штормовых нагонов равны: в Корсакове - 1.27 м; на мысе Крильон -1.97 м; в Холмске - 3.7 м; в Невельске - 3.5 м; в районе Углегорска - 4.5 м., а также огромные нагоны в Александровске - 7.3м., Ванино - 4.2 м., Де-Кастри - 7.2 м.



Рис.11. Распределение экстремальных значений уровня моря на период прохождения циклона над Анивским заливом.

По непроверенным данным, в Корсакове вода поднималась на 8 метров, по данным Сахалинского УГМС штормовой нагон не превышал 2-х метров. Для получения возможных экстремальный оценок штормового нагона в Анивском заливе, был выполнен дополнительный расчет воздействия циклона проходящего непосредственно через Анивский залив, имеющего относительный перепад давления в центре 50 мб (абс. = 950 мб), максимальную скорость ветра 70 узлов и размер около 300 км.







Рис. 13. Приведен приливной режим в пунктах, подвергшихся штормовому нагону. Хорошо видно, что период нагонной волны примерно соответствует приливной, а их экстремумы во времени практически совпадают.

Последний вариант расчета показал экстремальный уровень штормового нагона в Корсакове 3.5 м., Озерске 4.1 м. В мелководной северной части Анивского залива была зафиксирована скорость течения около 60 узлов (не исключено, что это завышенное значение обусловлено аппроксимационными погрешностями при вычислениях). По данным сводной таблицы, на глубинах 20 и более метров, максимальные скорости нагонных течений находятся в пределах $1-3^{M}/_{C}$ (2-6 узлов).

Atmosphere Cyclone on 3 Basis Points:								
•• 1	Day & T	lme Geo.Coordin	ates	Size[km]	P[wat'c	m] Wind[m/	c] Stre	ess
1:	0	0 45°11' 140°	48'	300.00	-50	.0 35	.0 0.0	02
2:	0	6 ⁴ 47°36' 144°	32'	300.00	-50	.0 35	.0 0.0	02
3:	0	L2 ⁴ 49°36′ 145°	15'	300.00	-50	.0 35	.0 0.0	02
Latit Longit 20 Mario Stations Depth Initial\Extreme +Max/-Min Flow Direction								
~~~~~~	~~~~~~~~		~ [m]~·	~~~~~~~~~~	~~~~~~~~~~	~~~[m]~~~~~~	~~[m¤/s]	~~~~~~~
45'54'	142'06'	Крильон	23	1'03"	4'38'	2.91/0.00	/5./1	39-4/
46°38'	142°40'	Корсаков	24	1 02 03"	4°32'05"	3.47/0.28	25.98	-26°54'
46°21'	143°15'	Новиково	51	56'01"	3°33'03"	3.87/0.44	46.27	-7°38'
45°59'	143°24'	Анива	31	47'05"	5°10'01"	2.86/0.16	65.84	68°56'
46°33'	143°07'	Озерск	25	1°06'06"	3°36'04"	4.07/0.56	27.07	-82°23'
46°27'	142°26'	Кирилово	23	44'04"	4°10'03"	3.05/0.04	37.84	-154°57'
46°11'	142°17'	Утесово	26	37'07"	4°12'01"	3.00/0.00	32.68	178°14'
46°15'	141°17'	Монерон	70	1'03"	2°36'06"	2.66/0.00	24.14	172°56'
46°04'	141°53'	Кузнецово	35	1'03"	2°24'02"	3.04/0.17	42.69	175°18'
46°41'	141°49'	Невельск	42	27'01"	3°03'01"	2.92/0.09	15.10	159°07'
46°25'	141°47'	Шебунино	71	14'02"	2°39'	2.86/0.09	48.50	165°23'
45°44'	142°02'	Лаперуза-пролив	65	1'03"	4°43'06"	2.97/0.00	144.39	100°51'
45°33'	141°58'	Сириусу	33	1'03"	4°42'04"	3.08/0.14	147.36	103°18'
45°27'	141°42'	Вакканай	25	1'03"	2°15'07"	2.82/0.39	61.56	106°13'
45°13'	142°22'	Сарафуцу	25	1'03"	4°55'03"	3.07/0.50	32.99	-35°13'
45°17'	140°59'	Караннай	97	1'03"	2°58'01"	2.51/0.00	56.19	153°30'
45°50'	141°12'	Японское море	114	1'03"	2°32'03"	2.59/0.00	60.77	127°54'
46°05'	142°48'	Анивский-залив	88	28'04"	3°57'04"	2.85/0.08	53.28	35°07'
46°24'	143°37'	Манапушы-рейп	52	1°20'01"	4°25'01"	3 46/0 04	58 16	-14°29'
45°37'	143°01'	Охотское море	112	24'	4°54'	2.89/0.12	55.98	125°02'

### Таблица 3. Сводная таблица по пунктам наблюдения:

При вычислительном моделировании штормовых нагонов удовлетворительные результаты получаются на открытых берегах, к которым относятся Южно-Курильск, Северо-Курильск, Камчатка и северное побережье Охотского моря. Возникают вопросы по поводу результатов моделирования в регионах с большими мелководными участками, в частности, в Татарском проливе возникают огромные штормовые нагоны при любом циклоне, пересекающем северную часть Японского моря. Можно также сделать вывод, что реализованная вычислительная модель корректно работает с атмосферным давлением, но по поводу ветрового воздействия уже можно сказать, что выявлена необходимость пересмотра исходных уравнений (может быть поиск алгоритмической ошибки).

# 3.8. Экспериментально-вычислительная оценка длинноволновых процессов на Сахалинском шельфе

В процессе моделирования прохождения циклона 8 ноября 1995 года над полуостровом Терпения, было обнаружено зарождение интенсивной шельфовой волны, движущейся вдоль Сахалинского шельфа на север.



Рис.14. Изображение на экране ЭВМ в процессе численного моделирования прохождения циклона вдоль Сахалинского шельфа. Столбиками обозначены экстремальные уровни моря в 22 постах наблюдения, стрелки показывают мгновенное поле течений. В нижней левой части экрана приведена масштабная шкала и экстремальные значения уровня моря и течения для всей расчетной области.

На рисунке 14 хорошо видно образование шельфовой сейши, которая движется на север вдоль Сахалинского шельфа с существенным опережением атмосферного циклона, располагающегося в южной части, - в районе мыса Терпения. Моделирование показывает, что в северных районах Сахалинского шельфа происходит усиление сейшевой волны штормового нагона, амплитуда которой превосходит аналогичный нагон в зоне действия циклона. Механизм образования такого опережающего штормового нагона обусловлен отражением длинноволновой энергии от мелководных акваторий полуострова Терпения, которая затем перешла в северную часть Сахалинского шельфа вдоль свала глубин Курильской котловины.



Рис.15. Результаты численного моделирования длинноволновых процессов на Сахалинском шельфе, где в качестве источников возмущения задавался быстродвижущийся циклон и одиночная волна цунами, движущаяся со стороны пролива Фриза.

На рисунке 15 показаны обобщенные результаты численного моделирования штормовых нагонов и цунами для прибрежных районов Сахалинского шельфа. Результаты моделирования могут быть использованы для быстрой оценки опасности наводнений, путем сопоставления результатов измерения в удаленных точках с участками побережья для которого делается такая оценка. При необходимости, такое моделирование может быть выполнено для уточнения возможной опасности морских наводнений и связанных с ними течений, когда в качестве исходных данных будут использованы оценки амплитуды и периода приближающейся к Сахалину сгонно-нагонной волны, сделанные в удаленных точках или, даже, в районе Курильских островов.



Рис.16. Мареографные записи полученные при моделировании циклона, проходящего вдоль Сахалинского шельфа.

Из рисунка видно, что после того как циклон приблизился к полуострову Терпения, на север Сахалина стала распространяться волна «атмосферного цунами» со скоростью распространения сейшевой волны. При этом отраженная от полуострова волна оказалась больше, чем последующее прямое воздействие циклона на северную часть Сахалинского шельфа.

Использованный при моделировании циклон вызвал сейшевую волну с коэффициентом усиления ~5, относительно перепада давления в центре циклона. Опасность такой волны состоит в появлении высокоскоростных постоянных течений вдоль Сахалинского шельфа, которое в приведенном примере достигало 10 м/с (около 20 узлов). Если такие процессы будут происходить в зимнее время, то ледовые подвижки с 20-ти узловыми скоростями будут представлять чрезвычайную опасность для любых морских и прибрежных инженерных сооружений, которые могут быть размыты или разрушены торошащимися ледовыми полями.



Рис. 17. Проявление волны цунами, движущейся к Сахалину со стороны Курильских островов и имеющей амплитуду в источнике 0.5 м.

Следует сделать выводы, что амплитуда волны цунами в районе Сахалинского шельфа усиливается, по крайней мере, в шесть раз, и возбуждает относительно более длительные во времени высокочастотные колебания уровня моря, чем аналогичное длинноволновое «атмосферное цунами» (в приведенном расчете период волны цунами около 12 минут).

Учитывая, что прямое численное моделирование требует сравнительно большого времени счета, в процессе его возможно использование текущих результатов с целью выполнение экспресс анализа или предварительных прогнозов последствий опасных морских явлений, в том числе с использованием эмпирических моделей. По крайней мере такое моделирование должно выполняться с целью оценки времени угасания опасных колебаний уровня моря и вызванных им течений.

# 3.9. Предложения по техническому оснащению сахалинской службы предупреждения об опасных морских явлениях

Для организации оперативного сбора гидрофизической информации о цунами и штормовых нагонах на Дальнем Востоке России, необходимо:

1) дооснащение береговых гидрометеорологических станций и постов наблюдения аппаратурой дистанционного измерения уровня моря;

2) предоставление им каналов прямой связи для непрерывной передачи информации в единый центр обработки гидрофизических данных (Центр цунами, расположенный в городе Южно-Сахалинске);

3) доведение технической оснащенности этого Центра до уровня, достаточного для выполнения экспертных работ по анализу обстановки на море в оперативном режиме.

Посты наблюдения. Для оснащения гидрометеорологических станций и постов наблюдения, в первую очередь необходимо приобретение цифровых регистраторов уровня моря, которые отслеживают процесс развития цунами и других опасных морских наводнений. Регистраторы должны работать в автономном режиме и результаты измерения уровня моря (и других гидрофизических параметров) непрерывно передаваться, по одному из протоколов электронной передачи данных, через узел управления региональной сетью, в центр оперативной обработки гидрофизических данных.

Гидрометеорологические станции, расположенные в населенных пунктах, особенно те, которые задействованы в службе предупреждения о цунами, должны быть дополнительно оснащены вычислительной техникой, с помощью которой будет вырабатываться решение о подаче тревоги цунами в зоне их ответственности. Имеются в виду математические и технические комплексы, которые на основе измерения скорости изменения уровня моря и критических отклонений от приливного режима, активизируют местные системы тревожных оповещений и по местным телефонным линиям вызовут ответственных инженеров - океанологов для принятия экспертных решений об объявлении тревоги. Конечно же, такие местные центры предупреждения могут быть дооснащены оборудованием для отслеживания сейсмических, экологических и других опасных явлений.

Таежные гидрометеорологические посты и автономные станции должны оснащаться оборудованием, которое не требует специально подготовленного персонала для его установки, обслуживания и контроля работоспособности. Здесь необходима выработка решения о создании единой сети сбора телеметрической информации, в которой должны быть электронные сети передачи данных, морские и войсковые системы радиосвязи и даже спутниковые системы сбора данных с автономных регистраторов.

179

Особо следует выделить важнейшую подсистему гидрофизического мониторинга, которая использует удаленные от берега датчики. В системе предупреждения о цунами морские регистраторы уровня должны устанавливаться на расстоянии от берега до 100 или 200 км и на глубинах до 3000-4000 м, что осуществимо только в случае полностью автономных датчиков, работающих из под поверхности воды. Последнее обуславливается ледовой обстановкой во всех Российских Дальневосточных морях.

Ориентировочная стоимость оборудования для ответственных гидрометеорологических станций превысит 25-50 млн.руб. (в ценах 1995 года). Сюда же добавятся расходы по организации прямых линий связи или высокочастотных радиоканалов (3-50 млн.руб), а в случае необходимости переоснащения районных узлов связи, может добавиться стоимость установки телепроцессоров, которая составляет около 25 млн.руб. Ориентируясь на дооснащение 10 гидрометеостанций, стоимость их технического переоснащения превысит 1 млрд. руб.

Переоборудование таежных постов наблюдения и установка автономных станций может составить 25 млн.руб на пост и около 50 млн. руб на средства оперативной связи. Для 10 постов наблюдения эта сумма может превысить 750 млн. руб.

Центр управления связью, в основе которого лежит оборудование для передачи и накопления цифровой информации. В основные обязанности такого центра должно входить предоставление цифровых и аналоговых каналов связи для сбора оперативной информации с гидрометеорологических станций и постов наблюдения. Второй задачей этого центра является обеспечение скоростной оперативной связи для объединения вычислительных ресурсов и экспертных систем в ведомственных центрах обработки информации. В данном случае имеются ввиду другие государственные службы, обеспечивающие жизнедеятельность на островах Сахалинской области, - это сейсмологический, экологический и метеорологический мониторинг, службы обеспечения безопасности мореплавания и рыбопромыслового контроля.

Технология, на которой должен базироваться центр управления сетью передачи оперативных данных, достаточно хорошо отработана в мировой практике, и не является слишком дорогостоящей. После сдачи узла электронной связи и сети передачи данных в эксплуатацию, новая система связи может быть задействована в других задачах по управлению государственными службами и системами жизнеобеспечения в Сахалинской области.

Оборудование узла связи должно быть установлено на территории линейноаппаратного зала (ЛАЗ) телеграфно-телефонной станции (ТТС) города Южно-Сахалинска, где выполняются условия по гарантированному энергоснабжению, обслуживанию, и куда сходятся все городские и междугородние прямые линии связи.
Этот электронный узел связи может быть представлен дуплексом из двух компьютеров класса IMB-PC, работающих по управлением UNIX - системы, обслуживающей несколько десятков прямых и коммутируемых соединительных линий. На магистральные линии связи и на многотерминальные каналы передачи данных должны быть предусмотрены протоколы пакетной передачи данных класса X25 или TCP/IP, единичные терминалы и автономные регистраторы должны быть обеспечены каналами передачи данных, оптимизированными в соответствии со скоростью и объемами передаваемой информации.

Ориентировочные затраты на оборудование для Южно-Сахалинского Центра управления узлом электронной связи и сетью передачи оперативных данных, составят 250 млн.руб. Примерно столько же будет составлять годовой бюджет этой службы.

Центр обработки информации, (Центр Цунами) должен быть укомплектован высококвалифицированными дежурными инженерами - океанологами, и оснащен вычислительной техникой и оборудованием цифровой связи для приема исходной гидрофизической информации, оперативного картирования текущего состояния гидрофизических параметров и проведения численного моделирования в реальном времени, с помощью которого будут отслеживаться опасные морские явления, и вырабатываться экспертные оценки не только для пунктов сбора оперативных данных, но и для всего побережья Сахалина и Курильских островов.

По минимальной схеме, для совершенствования службы цунами и организации предупреждения о других опасных морских наводнениях, информационный центр оперативной обработки гидрофизических данных должен быть оснащен следующими техническими средствами (нумерация в порядке подготовленности действующего Центра Цунами к выполнению задач оповещения).

1. Два высокопроизводительных компьютера класса DEC-ALFA 10000 (или быстрее). Один для выполнения численного моделирования приливного режима в Охотском море в реальном времени. Второй компьютер должен выполнять задачи опережающего численного моделирования с целью оперативного прогнозирования волновых процессов в прибрежной зоне для конкретных цунами и штормовых нагонов на основе приливных полей, снимаемых с первого компьютера. Оперативное моделирование может проводится с использованием приливных полей, которые непрерывно рассчитываются на первом компьютере. Указанный комплекс для проведения вычислительного моделирования может быть реализован в настоящее время, в его основу будут положены разработки лаборатории цунами ИМГиГ. В качестве исходных данных для моделирования будут служить эмпирические модели очагов цунами и атмосферных циклонов, которые, в процессе проведения тревоги, будут адаптироваться к оперативно-

ным данным поступающим от действующих постов наблюдения по телефонным и телеграфным каналам связи.

2. Дуплекс дежурных компьютеров класса IBM-PC, подключенных к узлу электронной связи по многотерминальному протоколу класса X-25. На эти компьютеры должна стекаться вся информация, со всех постов наблюдения включенных в единую систему гидрофизического мониторинга. На графических мониторах этих компьютеров должна отображаться информация о состоянии регистрирующей аппаратуры и каналов связи, а также представляться географические карты с полями измеряемых гидрофизических параметров. Для службы цунами важно, чтобы на эти же компьютеры поступала информация о результатах сейсмического мониторинга, которая может быть доставлена из Опытно-методической сейсмологической партии (ОМСП, условии, что там тоже будет создана сеть сбора оперативных данных между сейсмостанциями).

3. Локальная сеть ЭВМ, объединенная с помощью аппаратуры класса Eithernet. Внутренняя сеть Центра Цунами должна обеспечить независимый съем информации с дежурных компьютеров. Это позволит вырабатывать другие экспертные решения, организовывать связь с Комиссией по чрезвычайным ситуациям и другими службами Сахалинской области. На основе этой же локальной сети должны отрабатываться новые задачи, с помощью которых будет обеспечиваться непрерывное совершенствование вычислительных моделей и экспертных систем. Здесь же должны решаться задачи тестирования и настройки нового телеметрического оборудования.

Ориентировочная стоимость оборудования для решения задачи об оперативном численном моделировании - 50 млн.руб на основе IBM-Pentium, или 250 млн.руб на основе DEC-Alfa. Но, на сегодняшний день службу цунами не восстановить без приглашения грамотных специалистов с материка, для которых существенно обеспечение всего комплекса бытовых услуг: как жилье, связь и заработная плата достойная специалиста высокого уровня и с высокой ответственностью.

Ориентировочная стоимость аппаратуры связи и дополнительных компьютеров не превысит 100 млн. руб. Но если заказывать каналы связи по коммерческим правилам, по которым управление связи работает с ведомственными службами, то затраты на связь многократно превысят все затраты на поддержание оборудования и содержание персонала. Решение проблемы видится только с помощью постановлений правительства о создании единой системы наблюдения и контроля в Сахалинской области и на Дальнем Востоке России. Текущие же работы могут исполняться в соответствии с действующими постановлениями правительства Российской Федерации о создании автоматизированной информационно-управляющей системы предупреждения и действий в чрезвычайных ситуациях (АИУС РСЧС).

### Глава 4. Анализ эффективности сахалинской Службы предупреждения о цунами за период ее существования.

#### 4.1 О принципах оценки качества работы Службы предупреждения о цунами.

Служба цунами не производит и практически не способствует производству материальных благ, а нацелена лишь на обеспечение безопасности людей, проживающих в цунамиопасных районах морского побережья Сахалина и Курил. С этих позиций можно однозначно утверждать, что Служба работает эффективно, ибо с момента ее организации и до настоящего времени человеческих жертв в результате цунами не было (попутно отметим, что до появления Службы такие жертвы имели место). Если учесть, что жизнь человека дороже любых денежных эквивалентов, то упомянутый выше факт одновременно подтверждает также и целесообразность функционирования Службы независимо от размеров материальных и финансовых затрат на ее организацию и повседневное содержание.

Однако деятельность Службы в целом и основных ее подсистем (сейсмической, гидрофизической, подсистемы связи и оповещения) нуждается в более детальном анализе, без которого трудно принимать решение как по ее "оперативному" совершенствованию, так и серьезной технической реконструкции. В последнем случае неизбежно потребуется также и оценка чисто экономических показателей функционирования Службы.

Прежде чем приступать к такому анализу необходимо решить вопрос о критериях оценки деятельности Службы.

По конечным результатам работу сейсмической и гидрофизической подсистем Службы в период угрозы цунами можно сравнить с работой синоптика при угрозе возникновения стихийного гидрометеорологического явления: в обоих случаях конечной целью является своевременное предупреждение населения о надвигающейся опасности. Поэтому для оценки эффективности работы указанных подсистем, по-видимому, правомочно воспользоваться действующими в Гидрометслужбе критериями - оправдываемостью выпущенных предупреждений и степенью предупрежденности об опасном явлении. Первый - есть отношение количества оправдавшихся предупреждений к общему количеству составленных, второй-отношение количества предусмотренных предупреждениями явлений к общему количеству наблюдавшихся. Чем выше оба эти показателя, тем более эффективно работает подсистема или Служба в целом, и наоборот. Именно эти показатели и будут использоваться нами в дальнейшем. При оценке экономической целесообразности функционирования Службы привлекались сведения о затратах на ее содержание, ущербы от сильных цунами, а также конечные результаты работы Службы и ее подсистем согласно упомянутых выше показателей.

И наконец последнее. В настоящем исследовании основное внимание уделялось анализу работы гидрофизической подсистемы Службы. Это ни в коей мере не должно акцентировать ее приоритетность ("пальма первенства" в деле предупреждения о цунами бесспорно принадлежит сейсмической подсистеме), причина в другом: за последние годы эта подсистема практически утратила свою былую работоспособность и, по ряду причин, находится сейчас на грани полного развала. Для ее восстановления и технической модернизации требуются немалые средства, выделение которых едва ли возможно без проработки специального технико-экономического обоснования на подсистему. Поэтому будем надеяться, что приведенный ниже анализ может оказаться полезным при подготовке такого документа в части обоснования необходимости существования этой подсистемы в составе Службы.

## 4.2. Показатели работы гидрофизической подсистемы и в целом Службы за 1958-1994 годы

Первое предупреждение о цунами было выпущено Службой 7 ноября 1958 года. Этот день считается началом ее функционирования, хотя организационно она сформировалась несколько позднее. На начало 1995 года количество составленных предупреждений достигло 64. За указанный период на Сахалине и Курилах было зарегистрировано 40 случаев цунами, 32 из них возникли в ближней зоне (Курило- Камчатская впадина и Японское море) и 8 - в отдельных районах Тихого океана.

Для удобства дальнейшего анализа разделим все случаи условно на три категории: сильные цунами - с высотами волн 2,0 и более метра, умеренные - 0,6 - 1,9 м и слабые - до 0,5 метров включительно. По такой классификации на сильные цунами приходится 7 случаев (6 - в ближней и 1 - в дальней зонах), на умеренные - 9 случаев (8-в ближней и 1-в дальней зонах) и на слабые - 24 случая (18 - в ближней и 6 - в дальней зонах).

В пяти случаях цунами вызывались землетрясениями с магнитудой ниже порогового значения (от 5,3 до 6,9), на которые сейсмическая подсистема по понятным причинам была бессильна отреагировать. В четырех из них наблюдались слабые цунами, а в одном (22.06.79г.) - умеренное.

По различным причинам сейсмическая подсистема оказалась также бессильной отреагировать еще на три сильных (07.11.58г, 20.10.63г, 11.06.75г.) и два умеренных

(16.05.58г, 06.09.71г.) цунами. Все они, за исключением цунами 06.09.71, были предусмотрены гидрофизической подсистемой.

					Ia	олица 4
Подсистема	Оправ предупреж	дываемост сдения о цу	ь нами	Степень предупрежденности о цунами		
(в целом Служба)	составл. предупрежде ний	оправда- лось	%	наблюда- лось цунами	предусмо трено	%
Гидрофизическая	13	8	62	9	8	89
подсистема Сейсмическая	51	19	37	31	19	61
подсистема В целом по Службе:	64	27	42	40	27	68

Показатели работы отдельно гидрофизической и сейсмической подсистем, а также в целом Службы за период 1958-1994 гг. приводятся ниже:

Тобятно 4

Предположение о том, что Служба работает без гидрофизической подсистемы, безусловно является чисто гипотетическим. Если такой факт имел бы место, то сейсмическая подсистема вынуждена была бы каким-то образом срабатывать и на удаленные землетрясения, т.е. показатели работы такой Службы могли бы отличаться от приведенных в таблице в худшую или лучшую сторону.

Как следует из таблицы, гидрофизической подсистемой пропущено лишь одно цунами (08.08.93г.). Оно относится к категории слабых, тревога цунами не объявлялась по двум причинам: эпицентр землетрясения располагался в Марианской впадине, откуда еще не было случаев подхода цунами к Курилам; кроме того, по данным японских приливных станций зародившееся цунами не превышало одного метра (об этом было известно в момент распространения волны по поступающим сводкам из Японии).

Рассмотрим, каким образом срабатывала гидрофизическая подсистема на сильные и умеренные цунами:

- 1. Сильное цунами 07.11.58г. *(землетрясение в ближней зоне)* тревога по всем Курилам объявлялась по данным Японского Метеорологического Агентства.
- Сильное цунами 23.05.60г. (землетрясение в дальней зоне) объявлена тревога по всем Курилам на основе сообщения дежурного портопункта "Северо-Курильск" о фактически наблюдаемом цунами.
- 3. Сильное цунами 20.10.63г. (землетрясение в ближней зоне) по данным таежной гидрометстанции "Ван-Дер-Линд" (на сегодняшний день станции не существует) о фактически наблюдаемом цунами.

- 4. Сильное цунами 11.06.75г. (землетрясение в ближней зоне) по данным гидрометстанции "Южно-Курильск" и работников Южно-Курильского районного узла связи о фактически наблюдаемом цунами. Эта тревога была дана с большим опозданием, так как гидрометстанция Малокурильское в условиях плохой видимости (цунами наблюдалось ночью) не смогла первой зарегистрировать цунами и "пропустила" его в Южно-Курильск.
- 5. Умеренное цунами 16.05.68г. *(землетрясение в ближней зоне)* по магнитудному критерию, полученному от Южно-Сахалинской сейсмостанции.
- 6. Умеренное цунами 18.10.66г. (землетрясение в дальней зоне) по данным зарубежных служб.

При внимательном рассмотрении приведенных выше данных нетрудно обнаружить кажущийся парадокс, наличие которого еще раз подчеркивает беспомощность Службы предупреждения о цунами без гидрофизической подсистемы: четыре из шести цунами зародились в ближней зоне, за которую несет ответственность сейсмическая подсистема, но на которые она не смогла отреагировать. И дело здесь не столько в субъективных причинах, хотя и они имели место (главная из них - работа сейсмологов в условиях стрессовой ситуации и жесткого лимита времени, когда объективно возрастает вероятность ошибочных действий), сколько в до конца еще не изученной природе самих землетрясений. К примеру, на сильное землетрясение 11.06.75 не отреагировала и сейсмическая подсистема Японии (тревога цунами ими не объявлялась) из-за сложного характера его записи на сейсмограммах, не менее сильное землетрясение 20.10.63 в районе острова Уруп совершенно не ощущалось на Курилах и также "нестандартно" регистрировалось приборами и т.д.

Однако и гидрофизическая подсистема становится бессильной при отсутствии информации о параметрах зародившегося цунами, получаемых как от собственных, так и зарубежных приливных станций. Практически все ложные тревоги, выпущенные подсистемой (см. табл.4), оказались ложными именно по этой причине. В этих случаях подсистема, перестраховываясь, вынуждена работать по магнитудным критериям, получаемым от сейсмической подсистемы.

Тем не менее, как следует из табл.4, показатели работы Службы цунами с гидрофизической подсистемой значительно выше, чем без нее; оправдываемость предупреждений возрастает на 5%, а степень предупрежденности явления - на 20%. Еще более убедительными представляются данные табл.5, где приводится оценка работы Службы только при умеренных и сильных цунами.

#### Таблица 5

Подсистема	Оправ предупреж	дываемост сдения о цу	ь нами	Степень предупрежденности цунами		
(в целом Служба)	составл. предупрежде ний	оправда- лось	%	наблюда- лось цунами	предусмо трено	%
Гидрофизическая	6	6	100	6	6	100
подсистема Сейсмическая	8	8	100	10	8	80
В целом по Службе:	14	14	100	16	14	88

Показатели работы Службы только при сильных и умеренных цунами

Как следует из этой таблицы, без гидрофизической подсистемы, несмотря на 100% оправдываемость выпущенных Службой тревог, половина случаев цунами (шесть - в ближней и два - в дальней зонах) оказалась бы пропущенной, с гидрофизической подсистемой степень предупрежденности явления возрастает на 38%

Таким образом, приведенный выше анализ еще раз свидетельствует о том, что Служба предупреждения о цунами не может обойтись без гидрофизической подсистемы, а следовательно и затраты на ее создание будут всегда оправданы, независимо от их размеров (напомним, что функционально подсистема нацелена на защиту человеческих жизней).

#### 4.3 О прямых оценках экономической эффективности (ущерба) от функционирования гидрофизической подсистемы и Службы в целом.

В предыдущем разделе мы обосновали необходимость создания подсистемы, мотивируя лишь социальной ее значимостью и более лучшими показателями работы Службы с подсистемой, чем без нее. Здесь же остановимся на чисто экономических аспектах затронутой проблемы.

Анализ негативных последствий 40 наблюдавшихся в области цунами показывает, что абсолютно "безвредными" оказались, как и следовало ожидать, все слабые цунами (24 случая), не нанесло материального ущерба также и ни одно умеренное цунами (9 случаев) и лишь сильные цунами (7 случаев) сопровождались, как правило, значительными материальными потерями. Отсюда следует, что экономическая целесообразность функционирования Службы возникает лишь при сильных цунами, в остальных случаях ее деятельность для экономики области может оказаться ущербной.

Прежде чем переходить к рассмотрению баланса негативных и позитивных последствий функционирования Службы, выясним характер ущерба, порождаемого как самим явлением цунами, так и фактом существования Службы. Их можно разделить на три основных группы:

1) вынужденная остановка предприятий со всеми вытекающими из этого последствиями (всегда имеет место, когда Службой выпускается предупреждение или наблюдается сильное цунами); 2) разрушение береговых сооружений, (дорог, мостов, жилых домов и т.д.) всегда имеет место при сильных цунами, независимо от того - выпускалось или нет предупреждение; 3) гибель плавсредств, находящихся в момент цунами у причалов (имеет место только в случае пропуска службой сильных цунами)

Очевидно, что первые две группы можно отнести к категории неизбежных, а последнюю - к категории потенциально предотвратимого ущерба;: если службой выпускается предупреждение на сильное цунами, то ущерб минимальный (плавсредства, как правило, выводятся в море) и наоборот. Теоретически предполагается также, что при угрозе цунами вывозятся материальные ценности. Однако из-за скоротечности явления (более 80% цунами возникают в ближней зоне, когда заблаговременность предупреждений исчисляется минутами) предприятиями реально спасаются лишь документы и деньги в заранее заготовленной для этих целей таре.

Оценим величину потенциально предотвратимого ущерба, а следовательно - и позитивные последствия существования Службы.

Несмотря на то, что формально все сильные цунами Службой были предусмотрены, фактически за "эталонное" пропущенное цунами такой интенсивности можно принять случай 05.10.94г, когда тревога в Южно-Курильском районе не объявлялась из-за поломки в результате землетрясения наземной системы оповещения. Этим цунами на берег было выброшено два MPC, пять плашкоутов, несколько ботов и кунгасов.

По оценкам Сахалинского рыбакколхозсоюза стоимость одного MPC по состоянию на 01.01.95 составляет 500 млн.руб., плашкоута - 15 млн.руб, следовательно, ущерб составил около 1,1 млрд. руб. (округленно с учетом ботов и кунгасов). Чтобы получить заведомо не заниженный результат (в летнее время у причалов может находиться большее количество судов, в том числе и крупнотоннажных), утроим эту цифру и получим величину предотвращенного ущерба на одно цунами, равную 3,3 млрд. руб. При семи предусмотренных сильных цунами позитивные последствия Службы за период ее существования оцениваются в 23,1 млрд. руб.

К негативным последствиям функционирования Службы относятся все выпускаемые ею ложные тревоги, оправдавшиеся тревоги на слабые и умеренные цунами, а также затраты на содержание самой службы. Оценка первых приводится в [ТЭО-2, 1986] разработанном при создании Единой автоматизированной системы цунами (ЕАСЦ). В частности, ущерб от ложной тревоги (в нашем случае также и от оправдавшейся, но на слабое или умеренное цунами) составлял на середину восьмидесятых годов 84 тыс.руб, на 01.01.95 - соответственно 84 млн.руб. С 1958г. Службой выпущено 57 таких тревог, ущерб составил 4,8 млрд. руб.

Расходы на содержание Службы составляют: по гидрофизической подсистеме (только содержание круглосуточной службы в г. Южно-Сахалинске и аренда прямых каналов связи с Южно-Курильском, Северо-Курильском и Курильском) - 200 млн. руб./год или 7,4 млрд. руб. за 37 лет существования Службы; по сейсмической подсистеме (только содержание одной Южно-Сахалинской сейсмостанции) - 324,8 млн. руб. в год или 12 млрд. руб. за время существования Службы. Итого, расходы на содержание Службы составляют: 7,4+12,0 = 19,4 млрд. руб, а негативные последствия ее функционирования: 19,4 + 4,8=24,2 млрд. руб.

Таким образом, баланс позитивных и негативных последствий функционирования Службы оказался в пользу последних, т.е. с чисто экономических соображений служба является убыточной, убытки ежегодно составляют около 30 млн.рублей, Если учесть, что негативные последствия оценены по минимуму (не учтены затраты на содержание периферийных сейсмостанций в Северо-Курильске, Курильске и Малокурильске, а также на содержание сети гидрометслужбы (ГМС), а позитивные - по максимуму (величина предотвращенного ущерба утроена), то реальные убытки от функционирования Службы, по-видимому, значительно выше.

Убыточность Службы резко возрастает без гидрофизической подсистемы. Как уже упоминалось выше, в этом случае было бы пропущено три сильных цунами в ближней зоне (07.11.58, 20.10.63 и 11.06.75) и одно - в дальней (23.05.60). При этом негативные последствия составили бы:  $3.3 \cdot 4 + 12 + 47 \cdot 0,08 = 28,9$  млрд.руб, где: 4 - количество пропущенных сильных цунами;

3,3 - величина потенциально предотвратимого ущерба от одного цунами (в случае пропуска цунами ущерб имеет место);

12 - затраты на содержание сейсмической подсистемы;

47 - число выпущенных сейсмической подсистемой тревог без учета трех оправдавшихся тревог на сильные цунами;

0,08 - величина ущерба от выпущенной тревоги.

Позитивные последствия составили бы всего: 3.3 · 3 = 9,9 млрд. руб, где 3 - количество предусмотренных сильных цунами.

Таким образом, за период существования такой Службы убытки составили бы: 28,9 - 9,9 = 19 млрд руб. или 500 млн руб. ежегодно, что в 17 раз выше прежнего показателя.

Наконец, чисто гипотетически оценим баланс позитивных и негативных последствий в том случае, если Служба состояла бы только из гидрофизической подсистемы. Учитывая, что в этом случае было бы пропущено три сильных цунами (13.10.63, 12.08.69г. и 05.10.94г.), негативные последствия составят:  $3,3 \cdot 3 + 7,4 + 9 \cdot 0,08 = 18,2$ млрд.руб., а позитивные:  $3,3 \cdot 4 = 13,2$  млрд.руб. За период существования такой Службы убытки составили бы 5 млрд.руб. или 135 млн.руб. ежегодно, что в 4,5 раза выше первоначального показателя.

Естественно, что Служба не может состоять только из гидрофизической подсистемы. Однако приведенная оценка еще раз свидетельствует о том, что Служба становится минимально убыточной лишь при наличии в ее составе обеих подсистем: и сейсмической, и гидрофизической.

#### 4.4. Выводы

Целесообразность восстановления работоспособности гидрофизической подсистемы не вызывает сомнения, о чем свидетельствуют приведенные выше оценки: при наличии подсистемы Служба предупреждения о цунами становится минимально убыточной, оправдываемость предупреждений возрастает на 5%, степень предупреждаемости всех цунами - на 20%, только умеренных и сильных - на 38%. Ориентация подсистемы на обеспечение, прежде всего, безопасности жизни людей требует незамедлительного проведении таких работ.

Если подсистема не будет восстановлена (ее распад практически уже завершился в октябре 1994 года), то убыточность Службы возрастет в 17 раз и составит 500 млн. рублей в год, а показатели работы Службы снизятся на указанные выше величины и составят: оправдываемость предупреждений - 37%, степень предупрежденности всех цунами - 48%, только умеренных и сильных - 50%.

Необходимость существования гидрофизической подсистемы в составе Службы объективно диктуется и природой самого явления. Цунами возникают не только при сильных, но и при относительно слабых землетрясениях, на которые сейсмическая подсистема бессильна отреагировать. Кроме того, как следует из исторических сведений о цунами и предположений ученых, подводное землетрясение может оказаться не единственной причиной возникновения этого явления. В этом случае предупреждение о цунами возможно лишь по факту обнаружения зародившейся волны , т.е. только с помощью гидрофизической подсистемы. Нельзя считать удовлетворительными и показатели работы сейсмической подсистемы (оправдываемость выпущенных предупреждений составляет всего 37%, а степень предупрежденности цунами- 61%), хотя подсистема и работает на пределе своих возможностей. Также как и гидрофизическая , она нуждается в коренной модернизации, основным результатом которой должна стать возможность оперативного определения параметров случившегося землетрясения по группе станций (в настоящее время оценка параметров осуществляется по данным регистрации землетрясения одной станцией).

Несмотря на некоторую условность экономических оценок функционирования Службы (величина потенциально предотвратимого ущерба произвольно увеличена именно в три, а не в большее или меньшее число раз),по-видимому, следует признать тот факт, что с чисто экономических соображений она является убыточной, а в ценах на 1 января 1995 года ежегодные убытки составляют около 30млн руб.

Как и следовало ожидать, Служба становится минимально убыточной лишь при наличии в своем составе обеих подсистем: и сейсмической, и гидрофизической.

## Глава 5. Анализ действий Центра Цунами и отдельных звеньев Службы при тревогах цунами за период 1986-1995 годы

#### 5.1. О функциях Центра цунами.

В соответствии с действующими регламентирующими документами Центр Цунами входит в состав гидрофизической подсистемы цунами Сахалинского УГМС в качестве круглосуточной службы сбора, обработки информации и принятия решений при угрозе цунами и является структурным подразделением Сахалинского УГМС. Информация в Центр поступает как от объектов подсистемы (сеть гидрометеорологических станций и постов), в том числе и от зарубежных ее аналогов, так и от других источников, среди которых основным является сейсмическая подсистема Службы.

Центр "венчает" работу всей гидрофизической подсистемы, так как именно здесь происходит анализ поступающей информации и принимается окончательное решение сообразно той или иной ситуации.

Основные функции Центра сводятся к следующему:

- 1. Объявлять тревогу цунами и передавать ее в областной штаб ГО первый адрес, на ЦТ Южно-Сахалинска второй адрес, а также в другие адреса в случае:
  - регистрации сильных землетрясений в Тихом океане с эпицентральным расстоянием более 3000 км от Южно-Сахалинска (при меньших эпицентральных расстояниях тревога объявляется сейсмической подсистемой);
  - регистрации землетрясений с эпицентральными расстояниями менее 3000 км, если ожидается распространение цунами на районы, не охваченные тревогой, выпущенной сейсмической подсистемой;
  - обнаружения цунами при относительно слабых землетрясениях или отсутствии факта их регистрации вообще.
- 2. Рассчитывать после случившегося землетрясения время подхода цунами к населенным пунктам Сахалина и Курильским островам.
- 3. Определять окончание угрожающего периода и давать отбой как собственным тревогам, так и тревогам, выпущенным сейсмической подсистемой.
- 4. Взаимодействовать с зарубежными центрами предупреждения о цунами в соответствии с международным регламентом.
- Распространять в установленные адреса предупреждения о цунами и оповещения об окончании их угрозы (отбой тревоги), информацию об интенсивности (в баллах) случившегося землетрясения, сведения о фактически наблюдаемом цунами.

6. Осуществлять подготовку для областной КЧС информации о предполагаемом и фактическом развитии событий после случившегося подводного землетрясения, а также подготовку фактической информации об ощущаем ости и последствиях сильных землетрясений на суше.

#### 5.2. Показатели работы Центра и в целом Службы за 1986-1995 годы

Таблина 6

За указанный период в Курило-Камчатской впадине, Японском и Охотском морях произошло 19 землетрясений с магнитудой 7,0 и более, Службой было выпущено 23 предупреждения о цунами, (см. приложение **B**), на Сахалине и Курилах отмечалось семь случаев цунами, в том числе одно сильное (05.10.95г.), одно умеренное (13.07.93г.) и пять слабых.

Показатели работы Службы и ее подсистем приводятся ниже:

Подсистема	Оправ предупреж	дываемости сдения о цу	ь нами	Степень пре	нности	
(в целом Служба)	составл. предупрежде ний	оправда- лось	%	наблюдалось цунами	предусмо трено	%
Гидрофизическая	1	0	0	1	0	0
подсистема Сейсмическая подсистема	22	5	23	6	5	83
В целом по Службе:	23	5	22	7	5	71

Как следует из приведенных данных, с января 1986 и по октябрь 1995 года включительно оправдываемость выпущенных службой предупреждений составляет всего 22%. Если учесть, что до 1986 года этот показатель в целом по Службе достигал 50% (из 44 предупреждений оправдалось 22), то вывод напрашивается сам собой: за последнее десятилетие эффективность работы службы по этому показателю резко снизилась. Об этом свидетельствует также и простое сопоставление количества сильных землетрясений с количеством тревог: последних было выпущено больше, чем случилось землетрясений.

Что касается второго показателя (степень предупрежденности явления), то делать по нему аналогичные или другие выводы было бы не корректно из-за малого количества наблюдавшихся в последнее время случаев цунами.

Не лучшим образом сработала и гидрофизическая подсистема. предупреждения о цунами 10.10.95г. не следовало составлять вообще (достаточно было установить лишь наблюдения за уровнем моря), так как эпицентр землетрясения находился в "зоне те-

ни", откуда за всю историю наблюдений не было случаев подхода цунами к побережью Сахалина и Курил. Тем не менее, фактически события развивались по "другому сценарию" (см. приложение **B**). В частности, Японское Метеорологическое Агентство отреагировало на это землетрясение тревогой цунами по тихоокеанскому побережью Хоккайдо и Хонсю, а дежурный океанолог Центра, не имея никакой информации из Гонолулу (по непонятным причинам связь с этим центром отсутствует уже более полутора лет), не стал в этой ситуации брать ответственность на себя и тоже объявил тревогу по всем Курилам.

Несмотря на то, что океанолог действовал в основном в пределах инструкций, приведенный выше факт наводит на грустные размышления: конечные результаты работы Центра в условиях минимума информации о случившемся событии целиком зависят от личных качеств и профессионализма специалиста, принимающего то или иное решение.

Такая зависимость бесспорно характерна и для сейсмической подсистемы, о чем свидетельствует многолетний опыт взаимодействия с ее специалистами при угрозе цунами.

В связи с этим следует признать, что обусловленность принимаемых решений субъективными факторами - есть, пожалуй, одно из самых уязвимых мест действующей Службы: в таком деле, как обеспечение безопасности жизни людей следует полагаться не столько на интуицию и опыт специалистов, сколько на результаты объективной оценки случившегося события, будь то землетрясение или цунами. Это возможно лишь при соответствующей технической вооруженности Службы и ее тесной интеграции с зарубежными аналогами. К сожалению, ни тем, ни другим действующая Служба в настоящее время не располагает. Более того, по ряду причин за последнее десятилетие произошла фактически полная ее деградация и как следствие - потеря былой работо-способности.

## 5.3. О причинах ухудшения работы Службы и основных ее подсистем в последнее десятилетие

Для понимания случившегося необходимо хотя бы коротко коснуться эволюции гидрофизической и сейсмической подсистем Службы с начала их функционирования.

На этапе становления Службы гидрофизическая служба базировалась исключительно на визуальных наблюдениях и лишь в начале шестидесятых годов ее наблюдательная сеть стала оснащаться поплавковыми регистраторами цунами ГМ-23-1, гидростатическими регистраторами ГМ-23-11 и сигнализаторами цунами ГМ-30. Однако все эти приборы не смогли вывести подсистему на качественно новый уровень, так как ни один из них не позволял воспользоваться результатами регистрации уровня моря непосредственно в момент цунами, а следовательно и не был пригоден для оперативных целей.

Техническое средство, отвечающее требованиям оперативной практики, появилось в конце семидесятых годов. Дистанционные приставки к СУМ (ГМ-39), которыми были оснащены все мареографные пункты на Курилах, обеспечивали передачу на гидрометстанцию по двухпроводной связи кривой хода уровня моря, что при соответствующем организационном обеспечении и аренде прямых каналов связи со станциями позволяло оперативно получать характеристики цунами в момент его проявления, обеспечивать безопасность проведения самих наблюдений, а также соблюдать регламент обмена срочными сведениями о цунами с зарубежными службами. Подсистема была близка к зарубежным аналогам того времени и позволяла достаточно уверенно выполнять возложенные на нее функции.

Однако из-за конструктивных недоработок эти приборы смогли просуществовать лишь до начала восьмидесятых годов. Позднее, уже в ходе так и незавершенных работ по созданию ЕАСЦ, для регистрации цунами разрабатываются специальные береговые комплексы "Мега", которые также оказались неработоспособными в условиях Сахалина и Курил. В результате функциональные возможности подсистемы постепенно снижаются до уровня 1958 года, а из-за финансовых трудностей последних лет происходит практически полный ее развал: отток на материк персонала таежных станций и отсутствие средств на содержание последних привело к сокращению наблюдательной сети и невозможности проводить на отдельных станциях даже визуальные наблюдения.

Обстановка еще более осложнилась после стихийного бедствия пятого октября 1994 года, когда в результате землетрясения практически полностью были выведены из строя гидрометстанции "Малокурильское" и "Южно-Курильск", а отток специалистов с Курил стал более интенсивным. Из-за дефицита финансирования закрываются практически все арендовавшиеся ранее прямые каналы связи с гидрометстанциями. Визуальные наблюдения за цунами проводятся лишь в дневное время суток, а станциями с ограниченной численностью - не проводятся вообще. С марта 1994 года гидрофизическая подсистема утрачивает оперативную связь с зарубежными центрами в Гонолулу и Палмере, что окончательно лишает ее возможности выполнять возложенные на нее функции.

С 21 апреля 1995 года в Центре цунами вводится в штатный режим работы программно-технический комплекс из двух ПЭВМ, позволяющий в 2-3 раза ускорить в сравнении с ручной технологией обработку и передачу в канал связи сообщений о цунами. Однако при неработающей в целом подсистеме возможности комплекса остаются практически невостребованными.

Таким образом, в настоящее время гидрофизической подсистемы, как таковой, не существует (об этом свидетельствуют и данные приложения 2: при прохождении последних тревог никакой информации об изменениях уровня моря со станций не поступало). Остался не разрушенным лишь ее "венец" Центр цунами, который в сложившейся ситуации вынужден, как и сейсмическая подсистема, руководствоваться при принятии решений о тревоге цунами исключительно магнитудным и географическим критериями случившегося землетрясения.

Нечто подобное произошло и с сейсмической подсистемой Службы, изначально состоявшей из четырех круглосуточно работающих сейсмических станций: "Южно-Сахалинск" - центральная, "Северо-Курильск", "Курильск" и "Шикотан" - периферийные.

Намечавшаяся в ходе создания ЕАСЦ ее коренная модернизация завершилась по ряду причин полным провалом. Не была решена главная задача: оперативное определение характеристики случившегося землетрясения по результатам его регистрации не одной, а одновременно несколькими станциями, что в конечном счете позволило бы повысить оправдываемость выпускаемых подсистемой предупреждений о цунами. Для этого требовалась разработка новых средств регистрации землетрясений, соответствующего математического и программного обеспечения для обработки результатов регистрации, а также организация постоянно действующих прямых каналов связи между сейсмическими станциями.

Однако, фактически подсистема получила лишь единственную разработку - автоматическую сейсмостанцию "Волна". Но и она оказалась непригодной для внедрения в штатный режим работы из-за ряда конструктивных недоработок, выявленных в ходе опытной эксплуатации изделия на сейсмических станциях.

Несмотря на то, что в работу над ЕАСЦ было вовлечено около двух десятков институтов и КБ различных министерств и ведомств бывшего Союза ССР, их усилия не увенчались успехом. Причины такого финала кроются, по-видимому, в некомпетентности и безответственности как основных идеологов системы, так и ее исполнителей, а также в пренебрежении мировым опытом создания подобного рода систем. В самом деле, при наличии за рубежом готовых автоматических средств регистрации землетрясений в ходе создания ЕАСЦ расходовались огромные средства на разработку собственных, матобеспечение системы базировалось на отечественной вычислительной технике, оказавшейся к концу восьмидесятых годов в сравнении с зарубежной абсолютно неконкурентоспособной и непригодной для подобного рода систем, проводились многочисленные и весьма дорогостоящие эксперименты по обнаружению цунами в открытом море - задача, оставшаяся неразрешимой и по сей день, несмотря на усилия мирового сообщества и современные зарубежные технологии.

Между тем в ходе десятилетних работ над ЕАСЦ (1980-1990 гг) сейсмическая и гидрофизическая подсистемы функционировавшей в то время Службы постепенно приходили в упадок. Средств на поддержание их работоспособности, а тем более - реконструкцию не выделялось, ибо предполагалось, что они "доживают свой век" и вскоре будут заменены на подсистемы качественно нового уровня.

В последние годы сейсмическую подсистему постигает та же участь, что гидрофизическую: из-за дефицита финансирования в декабре 1993 года на две недели прекращают работу все сейсмические станции подсистемы, с марта 1994 года две из них закрываются вообще ("Курильск" и "Шикотан"), наблюдается интенсивный отток опытных специалистов на материк.

Таким образом, на сегодняшний день обе подсистемы Службы оказались в глубочайшем кризисе, порожденном двумя основными причинами: провалом работ по ЕАСЦ и резким ухудшением экономической ситуации с начала девяностых годов.

## 5.4. Анализ ошибок и сбоев различных звеньев Службы при тревогах цунами за период 1986-1995гг.

За указанный период гидрофизической подсистемой было выпущена единственная тревога (10.10.95). Этот случай - наглядный пример кризисного состояния подсистемы: несмотря на то, что тревога проходила в дневное время суток и объявлялась по всем Курилам, ни от одной гидрометстанции не поступила в Центр цунами уровенная информация (исключение составляет Северо-Курильск, где наблюдения за цунами проводятся не работниками гидрометеослужбы, а пограничниками на сопке "Сигнальная".

В таком состоянии подсистема находится уже три последних года, а с марта 1994 года, когда прекратилась оперативная связь с Гонолулу и Палмером, она оказалась в изоляции и от международного сообщества стран тихоокеанского бассейна (связь поддерживается лишь с Токио).

В сложившейся обстановке Центр цунами вынужден при землетрясениях в дальней зоне принимать решение о тревоге не по гидрофизическим данным, а также как и сейсмическая подсистема - по характеристикам случившегося землетрясения, что резко снижает эффективность работы подсистемы. Отбой выпускаемых Службой тревог также осуществляется не на основе наблюдений за уровнем моря, а исключительно по расчетным данным о подходе волны. Не имея информации от собственных станций, дежурный океанолог вынужден пользоваться порой противоречивыми сведениями о цунами из других источников (в/ч, предприятия Минрыбхоза, главы администрации районов).

Как следует из оперативных материалов (см. приложение В), при срабатывании сейсмической подсистемы ошибки и сбои в работе дежурного океанолога Центра цунами носят локальный характер и в основном не влияют на ход тревоги в целом. Это объясняется тем, что по приоритетности адрес Центра стоит у сейсмологов третьим после Гражданской обороны и Центрального телеграфа, то есть система оповещения на местах уже, как правило, срабатывает, после чего Центр приступает к выполнению своих функций.

К наиболее характерным ошибкам океанолога в таких случаях можно отнести следующее: не проставлено время передачи того или иного сообщения или фамилия принявшего, ошибка в текстовой части сообщения, нарушена последовательность передачи информации, не передана информация в тот или иной адрес или передана с опозданием и т.д.

Особенно часто случались сбои во взаимодействии океанолога с дежурной сменой телеграфистов САСПД. Последние вынуждены распространять информацию о тревоге и времени подхода цунами одновременно по нескольким видам связи (радио, прямые каналы, абонентская связь) и в зависимости от ситуации выбрать тот или иной список адресов. В условиях стрессовой ситуации и малой численности работающих нередки случаи передачи с опозданием или не передачи вообще какой либо информации в тот или иной адрес.

Из оперативных материалов следует также, что сбои в работе океанолога наблюдаются, как правило, в нестандартных ситуациях, которые в свою очередь возникают вследствие ошибочных действий сейсмолога. Такие действия при нынешнем состоянии сейсмической подсистемы неизбежны. Они вызваны в первую очередь дефицитом информации о случившемся землетрясении: данных регистрации землетрясения одной станцией, по-видимому, не всегда хватает для точного определения его характеристик. А жесткий лимит времени, в течение которого сейсмолог обязан принять решение о тревоге в сочетании с бременем ответственности за принимаемое решение неизбежно порождает стрессовую ситуацию, безошибочно действовать в которой способен не каждый человек.

Видимо, по этим причинам в 12 из 22 случаев сейсмической подсистемой отменялись первоначально выпущенные тревоги (в восьми случаях - из-за завышения магнитуды землетрясения, в четырех - из-за неточного определения местоположения эпицентра), в девяти - уточнялись характеристики случившегося землетрясения в течение первых 30 минут после его регистрации. Сигнал отмены тревоги поступил в административные районы, как правило, уже в ходе эвакуации населения или после ее окончания, что по негативным последствиям практически равноценно неоправдавшемуся предупреждению, но лишь с более коротким периодом пребывания населения в стрессовой ситуации.

До сих пор мы не касались третьей и очень важной составляющей Службы - подсистемы связи и оповещения. Следует признать, что в отличие от первых двух она не только сохранила свою былую работоспособность, но в последние годы и значительно усовершенствовалась. В частности, в районных центрах на Курилах задействованы специальные технические средства, позволяющие включать систему оповещения населения об угрозе цунами (сирены, громкоговорящая связь, радио, телевидение) непосредственно из Южно-Сахалинска. Это осуществляется оперативным дежурным областного штаба ГО и ЧС с получением предупреждения о цунами от сейсмической или гидрофизической подсистемы.

Однако, и эта подсистема дала сбой при разрушительном землетрясении 5 октября 1994 года: из-за поломки в результате землетрясения наземных средств связи в Южно-Курильске предупреждение о цунами поступило туда с большим опозданием.

# 5.5. Основные недостатки действующей службы предупреждения о цунами, их причины и следствия Таблица 7

Nº Nº	Недостатки	Для какой подсистемы характерны		Основные причины недостатков	К каким последствиям приводят
	2	$\Gamma/\Phi$	Сейсм	5	6
1.	Принимаемые Службой решения о тревоге ба-	+	+	Слабая техническая воору-	При принятии решения преобладают не объективные а субъективные факторы со
	ной оценки случившегося события, сколько на интуиции специалиста и его способности рабо- тать в стрессовых ситуациях			ное отсутствие средств авто- матизации обработки инфор- мации и принятия решений	всеми вытекающими из этого последстви- ями
2.	Дефицит высококвалифицированных специа- листов инженерного состава принимающего окончательное решение о тревоге после слу- чившегося землетрясения	+	+	Низкая оплата труда, отсут- ствие перспектив на улучше- ние состояния дел в Службе	С учетом п.1-резко снижается эффектив- ность работы Службы
3.	Неукомплектованность наблюдательным со- ставом труднодоступных таежных гидро- метстанций на Курилах и Сахалине.	+	-	Причины те же, что в пункте 2.	Не проводятся визуальные наблюдения за уровнем моря, в связи с чем нет возмож- ности вносить коррективы в первоначаль- но выпущенную тревогу своевременно лать отбой тревоге.
4.	Отсутствуют научно-обоснованные критерии для объявления тревоги на Курилах при дви- жении цунами из отдаленных районов Тихого океана.	+	-	До сих пор наука пока не в силах решить эту задачу вви- ду сложности процессов, про- исходящих в океане при рас- пространении волны.	Тревоги объявляются на слабые цунами, не представляющих опасности для населе- ния, или не оправдываются вообще
5.	Ошибки в определении магнитуды и местопо- ложения эпицентра землетрясения.	-	+	Причины те же, что и по пункту 1. Кроме того, пара- метры землетрясения оцени- ваются по результатам его регистрации на одной стан- ции, а не группой станции.	Возрастает вероятность ложной тревоги или пропуска цунами, тревога может быть объявлена не по тем районам, где действительно следует ожидать цунами, и наоборот

	2	$\Gamma/\Phi$	Сейсм	5	6
6.	Специалист Службы превышает выделенный	+	+	Причины те же, что и по	Тревога подается с опозданием, когда вол-
	ему лимит времени для решения вопроса о тревоге цунами.			пункту 1.	на цунами уже подошла к побережью (могла подойти, в случае ее зарождения)
7.	Полное отсутствие инструментальных наблю-	+	_	Отсутствие на приливных	Служба лишается возможности:
	дений за цунами в ходе тревоги			станциях соответствующих	•объявлять тревогу в случае пропуска цу-
				регистраторов, линий связи	нами сейсмической подсистемой;
				между мареографом и станци-	<ul> <li>по первым вступлениям оценивать вели-</li> </ul>
				ей, постоянно действующих	чину максимальной волны;
				каналов связи между станци-	•вносить коррективы в тревоги, выпус-
				ями и центром цунами.	каемые сейсмической подсистемой;
					•участвовать в международном обмене
					срочными свеоениями о цунами;
					•своевременно оавать отоои выпущен- ным тревогам:
					•своевременно представлять в КЧС объ-
					ективную информацию о цунами;
					•применять расчетные методы оценки
					динамических характеристик цунами.
8.	Занижен магнитудный критерий для объявле-	-	+	Не проведены дополнитель-	Большое количество ложных тревог, а
	ния тревоги при землетрясениях в Курило-			ные исследования по его кор-	также тревог на слабые цунами
0	Камчатской впадине.			ректировке.	
9.	Практически полное отсутствие прямых кана-	+	+	Отсутствие средств на аренду	Сейсмическая подсистема лишается воз-
	лов связи между ооъектами подсистемы, рас-			каналов связи.	можности оперативно уточнять характери-
	положенными в населенных пунктах.				стики землетрясения на основе его реги-
					спрации несколькими станциями и колле-
					гилрофизическая - оперативно опрашивать
					объекты о наличии пунами и перелавать
					тревоги на места.
10.	Отсутствие на таежных гидрометстанциях со-	+	_	Отсутствие средств на	Таежные станции лишены возможности
	временных малоэнергоемких радиостанций для	'		приобретение.	оперативно передавать результаты наблю-

	2	$\Gamma/\Phi$	Сейсм	5	6
	связи с управлением в Южно-Сахалинске, а также портативных радиостанций - для связи наблюдателя с гидрометеостанцией при прове- лении наблюлений за цунами				дений за цунами в Южно-Сахалинск.
11.	Неспособность Службы отреагировать на цу- нами с очагами зарождения в непосредствен- ной близости от некоторых населенных пунк- тов Сахалина и Курил.	+	+	Не проведены соответствую- щие исследования, отсут- ствуют технические средства, позволяющие в автоматиче- ском режиме регистрировать близкие землетрясения с од- новременном включением системы оповещения о цуна-	Пропуск Службой локальных цунами (возможны в Буревестнике, Малокуриль- ске, Углегорске, Одопту, Шебунино и др.).
12.	При принятии решения о тревоге не учитыва- ется дополнительный критерий цунамигенно- сти случившегося землетрясения - глубине его очага.	-	+	ми в населенном пункте. Причины те же, что и в п.1. Кроме того, требуются до- полнительные исследования для Курило-Камчатских зем- летрясений	Ложные тревоги при глубокофокусных землетрясениях.
13.	Выход из строя системы оповещения в насе- ленных пунктах морского побережья при угро- зе пунами.	Подси свя опове	істема зи и чцения	Разрушение наземных техни- ческих средств в результате землетрясения.	Не объявляется тревога в населенном пункте.
14.	Частые отмены только что выпущенных тревог.	-	+	Причины те же, что и по пунктам 1 и 5.	По негативным последствиям отмененная тревога аналогична ложной <i>(не оправдав-шейся)</i> , с коротким периодом пребывания населения в стрессовой ситуации.
15.	Недостаточная техническая оснащенность ра- бочего места специалиста, (отсутствие средств индивидуальной связи для вызова специалиста, способного оказать помощь в момент тревоги - радиотелефон, пейджер, "уоки-токи").	+	+	Отсутствие средств на приобретение.	Снижается эффективность принимаемых решений.
16.	При угрозе цунами нерегулярно поступает от	+	-	Причины сбоев не всегда яс-	Решения о тревоге при землетрясениях в

	2	$\Gamma/\Phi$	Сейсм	5	6
	зарубежных центров оперативная информация			ны.	дальней зоне принимаются не по гидрофи-
	о землетрясении и цунами.				зическим данным, а по магнитудному кри-
					терию, что приводит, как правило, к лож-
					ным тревогам.
17.	Закрыты цунамистанции в Малокурильске и	-	+	Отсутствие средств на содер-	При землетрясениях в непосредственной
	Курильске.		-	жание станций.	близости от указанных пунктов тревога из
					Южно-Сахалинска может быть подана с
					опозданием.
18.	Районирование морского побережья Сахалина	+	-	Не проведены	Рекомендации по выносу из цунамиопас-
	и Курил по размерам зон затопления и повто-			соответствующие	ных зон жилых и хозяйственных объектов
	ряемости цунами неточно отражает реальную			исследования.	выдаются на устаревших материалах, осо-
	картину происходящих событий.				бенно по населенным пунктам Сахалина.
19.	Межведомственная разобщенность Службы.	BII	эпом	Исторически сложившийся	Затруднено решение организационных
		Ъц	0,10,101	факт.	вопросов в целом по Службе.
20.	На недостаточном уровне осуществляется пла-	Слу	ижба	Районные администрации не	Излишняя обеспокоенность населения
	номерная подготовка населения цунамиопас-			получают от Службы доста-	слухами о предстоящих землетрясениях,
	ных районов к поведению в стрессовых ситуа-			точной методической помо-	неспособность воспользоваться мерами
	циях при землетрясении и цунами.			щи.	самозащиты от стихийных явлений.
21.	Подсистемы Службы не готовы к интеграции с	+	+	Причины те же, что и по	Снижается оперативность и точность при-
	зарубежными аналогами стран тихоокеанского			пункту 1	нимаемых Службой решений. Кроме того,
	бассейна				из-за неравноценного обмена информаци-
					ей (Служба неспособна информировать
					тихоокеанское сообщество о проявлении
					цунами на Курилах не исключены адек-
					ватные действия со стороны зарубежных
					центров (см.пункт 16)

#### 5.6. Предложения по улучшению работы Службы.

Из анализа работы службы за последнее десятилетие следует, что ни гидрофизическая, ни сейсмическая подсистемы практически не выполняют возложенных на них функций: нельзя считать работу Службы удовлетворительной, если на 7 случаев цунами, 6 из которых не представляли никакой опасности для населения, Службой было выпущено 23 тревоги.

Как уже упоминалось выше, такие результаты- следствие кризисного состояния обеих подсистем. Поэтому для улучшения работы Службы необходимо сначала выйти из кризиса, восстановив былую работоспособность подсистем, и лишь затем браться за их коренную модернизацию.

Возникает вопрос, нужна ли модернизация, тем более коренная?

На этот вопрос можно однозначно ответить - да, поскольку оправдываемость принимавшихся Службой решений при "былой работоспособности" (до 1986 года) хотя и была выше нынешней, но не превышала 50% (таких "успехов", как известно, можно добиться, решая вопрос о тревоге не на научной основе, а путем подбрасывания монеты). Кроме того, как следует из табл. 7, причины многих недостатков Службы кроются как раз в слабой технической ее вооруженности и полном отсутствии средств автоматизации обработки информации и принятия решений.

Предложения по улучшению работы сейсмической подсистемы могут грамотно и в полном объеме сформулировать лишь специалисты этой подсистемы. К сожалению, таковых в Центре цунами нет, поэтому приведенные ниже рекомендации следует рассматривать как "взгляд со стороны" непрофильных специалистов-океанологов, знающих сейсмическую подсистему весьма поверхностно, но вынужденных, тем не менее, решать совместно с ее специалистами одну и ту же задачу, используя при этом принципиально иные "инструменты". Будем надеяться, что опыт многолетнего взаимодействия двух подсистем может частично компенсировать упомянутый недостаток и приведенные ниже рекомендации окажутся полезными при разработке и реализации соответствующих программ.

В качестве неотложных первоочередных мер по восстановлению работоспособности подсистемы представляется целесообразным:

 Открыть вновь цунамистанции "Шикотан" и "Курильск", оснастить их необходимыми техническими средствами для выполнения функций по предупреждению о цунами и довести численность ИТР до штатной.

- Организовать прямые каналы связи между центральной сейсмостанцией в г. Южно-Сахалинске и периферийными станциями в Северо-Курильске, Курильске и Малокурильском с целью оперативного обмена сейсмической информацией при регистрации сильного землетрясения и принятия решения о тревоге на коллегиальной основе.
- Организовать прямой канал связи УГМС Южно-Сахалинская сейсмостанция для получения последней в автоматическом режиме сведений об ощущаемости землетрясений гидрометстанциями Сахалина и Курил.
- 4. Провести соответствующие исследования и решить вопрос об увеличении порогового значения магнитуды для объявления тревоги цунами при Курило-Камчатских землетрясениях с 7,0 до 7,1 - 7,2.

Дальнейшая модернизация подсистемы должна сводиться к организации автоматизированной обработки результатов регистрации землетрясения четырьмя упомянутыми сейсмостанциями с последующим подключением к ним, при необходимости, других станций Дальнего Востока. При этом, процесс обработки может осуществляться либо на центральной станции "Южно-Сахалинск", куда в таком случае должна поступать в оцифрованном виде первичная информация от периферийных станций, либо одновременно и на периферийных станциях с последующей передачей параметров, по мере их определения, на центральную станцию.

#### <u>Для этого потребуется:</u>

- Оснастить сейсмические станции современной регистрирующей аппаратурой в комплекте с оцифровывающими устройствами и ПЭВМ, в том числе и аппаратурой, "нацеленной" на регистрацию лишь сильных (с магнитудой 6,0 и более) землетрясений в пределах Курило-Камчатской впадины и Японского моря.
- На базе центральной сейсмостанции "Южно-Сахалинск" организовать центр сбора и обработки сейсмической информации, оснастить его необходимыми техническими средствами и вычислительной техникой.
- 3. Разработать программное обеспечение:
  - расчета параметров землетрясения (включая глубину очага) поданным его регистрации одной станцией и группой станций;
  - функционирования центральной и периферийных станций в режиме регистрации землетрясения.
- 4. Выполнить научно-исследовательские работы:
  - по защите населенных пунктов от локальных цунами;

- по поиску дополнительных критериев цунамигенности курило-камчатских землетрясений;
- по цунамирайонированию побережья Сахалина и Курил.

#### 5.7. Подсистема связи и оповещения

Относительно подсистемы связи и оповещения можно сказать следующее. В первую очередь необходимо извлечь уроки из события 4 ноября 1994 года, когда в результате сильного землетрясения в Южно-Курильском районе были повреждены все наземные средства связи и оповещения. Чтобы избежать этого, необходимо, повидимому, еще на стадии проектирования средств, размещаемых в сейсмоактивных районах, вносить в ТЗ дополнительные требования на их "живучесть" к различного рода колебаниям и толчкам.

Вторая, не менее важная задача - разработка системы оповещения, которая срабатывала бы без участия человека при достижении землетрясением или цунами определенной пороговой интенсивности, представляющей опасность для жизни людей. Установка таких систем необходима в населенных пунктах, где действующая Служба по объективным причинам бессильна своевременно оповестить население об угрозе цунами.

Нуждаются также в существенной доработке и схемы оповещения о цунами, разработанные еще в 1980 году и действующие до сего времени.

# Глава 6. Краткие инструкции по практическому использованию вычислительных моделей и программных комплексов

Комплекс программ запускается в работу с помощью следующих команд.

#### >ANI.exe D:\Path\FileName.inf

При запуске программы можно указать имя информационного файла, в котором описываются батиметрические данные. Если такого имени не указывается, то программа выдает на экран оглавление библиотеки и делает запрос на ввод информационного файла.

#### >MARIO.exe D:\Path\FileName.mar

Вызов программы обработки временных рядов наблюдения, с указанием имени файла мореографных данных.

#### >MARIO.exe D:\Path\FileName.tim

Вызов программы с указанием на каталог мореографов и их приливных гармонических постоянных.

#### >WORLD.exe D:\Path\FileName.lts

Вызов программы с указанием на каталог сейсмических событий и цунами.

Все программы переключают терминал ЭВМ IBM-PC в графический режим сразу же после старта и никогда не возвращается к обычному текстовому режиму. Все внутренние сообщения программы переведены на английский язык и представляются наборами ключевых слов, указывающих на характер выполняемых операций или тип обрабатываемых объектов. В информационных файлах и внутри каталогов данных могут содержаться сообщения на русском языке, если, конечно, DOS и Windows поддерживают соответствующие языковые кодовые таблицы (*DOS-866; Windows-1251*).

#### 6.1. Расстановка мареографных постов наблюдения

**F2** Mario - на экране появляется подвижный курсор в виде крестика, который перемешается с помощью стрелок на клавиатуре или "мышки". С помощью команды <*F1 Inf*> в левом верхнем углу экрана выставляется или убирается окно с информацией о местоположении подвижного курсора.

Для установки нового поста наблюдения, необходимо подвести курсор в нужную точку и нажать клавишу *Insert*. В нижнем левом углу появится запрос на ввод названия поста наблюдения.

Быстрая установка курсора на один из существующих постов наблюдения выполняется с помощью команд: *«Enter»* - с поиском ближайшего к курсору поста; *«+»* или *«-»* - перебор уже установленных точек по списку. Когда же курсор установлен на мариографную точку, то она может быть удалена по команде *«Delete»* или перемещена на другое место, если при перемещении курсора удерживать нажатой клавишу *«Shift»*. Закрепление поста на новом месте выполняется по команде *«Shift+Enter»*.

Если включено информационное окно  $\langle F1 Inf \rangle$  и курсор передвигается с удерживаемой клавишей  $\langle Shift \rangle$ , то в окне появляются две дополнительные строки с информацией о расстоянии и азимутах между двумя контрольными точками, которые соединены линией на изображенной на терминале карте. Вторая точка совмещается с подвижным курсором по команде  $\langle Shift+Delete \rangle$ , по команде  $\langle Shift+BkSp \rangle$  эти две точки меняются местами.

При включенном информационном окне может быть использована также команда *<ВkSp>*, которая позволяет скорректировать значение глубины в точке под подвижным курсором.

Корректировка списка мариографных точек производится только в оперативной памяти программы ANI, поэтому, после завершения расстановки постов наблюдения необходимо выйти на главный уровень по команде *«Escape»*, и сохранить данные по команде *«F3 Write»*, указав, при необходимости, режим обновления информационного файла [*Inf only*].

#### 6.2. Редактирование батиметрических карт

**F4 Chart** - на экране появляется подвижная рамка оконтуривающая текущую матрицу батиметрии. Стрелками на клавиатуре перемещается верхняя и правая границы рамки, если же удерживается клавиша *Shift>*, то перемещается вся рамка. *Enter>* переключает режимы смещения всей рамки и верхней - правой границы. Буква *R>* вращает рамку против часовой стрелки, *r>* - соответственно, в другую сторону.

Все параметры батиметрической матрицы и ее картографической проекции могут быть определены в специальной таблице, которая вызывается по команде  $\langle F4 \ Edit \rangle$ . Необходимо отметить, что когда в таблице изменяется сеточный шаг или размерность матрицы, и если нажимается  $\langle Enter \rangle$  в тот момент, когда курсор находится в поле измененного числа, то программа пытается подстроить другие параметры карты так, чтобы рамка осталась на старом месте.

Для выхода из редактирования дается команда *<Escape>*, за которой следует запрос о способе выхода из процедуры. *<Enter>* означает, что исправления сделанные в процедуре принимаются, *<BkSp>* отменяет все корректировки. Если в процессе редактирования считывались другие карты, то по *ВkSp* возвращается последняя из прочитанных батиметрических карт.

#### 6.3. Кинематические расчеты волновых фронтов и лучей

**F5** Time - диалог построен также как в  $\langle F2 \ Mario \rangle$ , здесь тоже можно редактировать список постов наблюдения и проводить измерение расстояний. В простейшем случае достаточно подвести курсор к заданной точке или выбрать эту точку из каталога исторических событий  $\langle F7 \ Seismic \rangle$ , затем по команде  $\langle F4 \ Front \rangle$  запустить процесс моделирования распространения фронта цунами. Времена пробега волны до отмеченных постов наблюдения могут быть просмотрены при вызове списка  $\langle F6 \ List \rangle$ , а сформированный на экране список может быть выведен в текстовый файл с помощью команды  $\langle F2 \ Write \rangle$ .

Если немного подождать, пока по команде  $\langle F5 Rays \rangle$  будут подготовлены данные для быстрой прорисовки лучей и фронтов, то луч и (или) фронт будет рисоваться в том же темпе, что и движение активного маркера. Команда  $\langle Tab \rangle$  закрепляет линию луча и фронта на экране.

Для задания сложного по форме источника или нескольких источников сразу, можно воспользоваться буквой  $\langle T \rangle$  - для установки одного источника и задания относительного времени его срабатывания; буквой  $\langle O \rangle$  - для задания одной точки источника с тем же относительным временем;  $\langle M \rangle$  - начинают отмечаться все точки, по которым проходит курсор. Повторное нажатие клавиши  $\langle M \rangle$  отменяет отметку точек источника, отметка отменяется также в случае запуска процесса расчета изохрон  $\langle F4$ *Front* $\rangle$ .

Команда  $\langle F3 \ Save \rangle$  переключает процедуру Time в режим расчета разностей времен добегания от различных точек регистрации фронта волны. В момент первого срабатывания  $\langle F3 \ Save \rangle$  происходит сохранение поля времен пробега волн, которое затем всегда вычитается из последующих расчетов. Повторное исполнение  $\langle F3 \ Save \rangle$  приводит к сохранению матрицы разностей, и последующие расчеты будут только корректировать сохраненные разности. Для удаления матриц разностей времен добегания и восстановления режима расчета поля времен добегания, необходимо вернуться на главный уровень программы ANI и снова войти в процедуру  $\langle F5 \ Time \rangle$ .

Для прорисовки результатов можно вызвать *<F2 Service>*, где будут предложены обращения к программе рисования изолиний с матрицами данных, которые уже распределены в оперативной памяти. Здесь же происходит настройка режимов быстрого интегрирования лучей и фронтов, а также включение алгоритмов для расчета коэффи-

циентов усиления и делается указание на заполнение поля идентифицирующего излучатели.

В настоящей версии программы не предусматривается получение других результатов, кроме как в форме протоколов со списками постов наблюдения, а также в виде графических изображений на экране ЭВМ, которые могут записываться в файлы растровых изображений или печататься на принтере.

#### 6.4. Моделирование распространения волны цунами

**F6** Simulation - вызов комплекса процедур для моделирования длинноволновой динамики океана. В предыдущей главе описывался регламент вычислительного моделирования цунами применительно к действующей службе предупреждения о цунами в Сахалинской области, который ориентирован на Центр цунами Сахалинского УГМС. Рассмотрим здесь последовательность команд для реализации численного моделирования распространения волн цунами. Моделирования которое может быть использовано для анализа обстановки на побережье и предупреждения населения об опасности конкретной волны цунами.

Для запуска вычислительного эксперимента необходимо иметь батиметрическую карту охватывающую очаг землетрясения и защищаемое побережье. Желательно до начала моделирования сформировать в информационном файле список постов наблюдения за уровнем моря. Программа ANI должна получить информационный файл этого региона в качестве дополнительного параметра командной строки. После того как карта будет изображена на экране необходимо перейти в режим моделирования <**F6 Simulation**>.

Для установки очага землетрясения необходимо вызвать меню  $\langle F4 \ Source \rangle$ , и заполнить в нем координаты очага землетрясения, задать размеры очага и амплитуду в источнике. Если размеры и амплитуда неизвестны, то можно воспользоваться командой  $\langle F7 \ Seismic \rangle$ , которая доступна в режиме  $\langle F4 \ Source \rangle$ , и задать магнитуду землетрясения, тогда размеры, ориентация и амплитуда в очаге будут вычислены автоматически, на основе эмпирических формул А.А. Поплавского. Необходимо обратить внимание на прогнозируемый период волны, который будет получен в результате применения эмпирических формул (*указывается в первой строке меню*), так как он может оказаться слишком малым для удовлетворения аппроксимационных критериев.

Если период мал, то его следует увеличить искусственно. При моделировании цунами, подходящего к побережью Сахалина или Курильским островам, этот период можно выбрать приблизительно, в зависимости от местоположения очага цунами (по историческим данным):

30-40 мин.	для источников на другом берегу Тихого океана;
10-12 мин.	в районе Курило-Камчатского глубоководного желоба,
4-6 мин.	для источников цунами в Японском море.

В том случае, если источник цунами выходит за пределы расчетной области, то волну цунами можно задать с помощью периода во времени и направления подхода ее к свободной границе расчетной области. Определение такой волны выполняется с помощью меню  $\langle F3 \ Period \rangle$ , в котором необходимо заполнить ячейки с периодом волны, амплитудой и направлением ее подхода. Такая волна будет проникать в расчетную область через свободные границы, и этот процесс будет начат сразу же после запуска вычислительного эксперимента. Последнее означает только то, что при указании времени для физического процесса, необходимо делать поправку на время подхода волны к расчетной области.

До запуска расчетов желательно проверить согласование аппроксимационных критериев для заданного минимального периода волны цунами. С этой целью необходимо вызвать меню  $\langle F2 \; Service \rangle$ , в трех окнах нижней строки которого реализован специализированный калькулятор. Необходимо выбранный период волны (*в минутах*) внести в окно "*Time*", затем перейти в окно "*Depth*" и нажать на "ввод". В окне "*Depth*" появится минимально допустимая глубина моря, до которой возможно моделирование волны цунами. Повторив команду  $\langle F2 \; ReDraw \rangle$ , можно увидеть величину области отсечения на мелководье. Если эта область слишком велика, то можно попытаться уменьшить количество точек аппроксимирующих полуволну в среднем окне "*Cells*" до 4-х, и снова уточнить минимально допустимую глубину. Если этого мало, то необходимо вручную выставить минимальном периоде волны для данной батиметрической карты. Затем следует выставить период волны в источнике цунами в соответствии с периодом, минимально допустимым по аппроксимационным критериям.

Запуск процесса моделирования волны цунами производится по команде  $\langle F9$ *Start*>. При первом запуске на экране появляется окно запроса на общее имя файлов протокола и мариографных данных, в этом же окне необходимо скорректировать физическое время начала вычислительного эксперимента и дискретность записи мариографных рядов. Вычислительный эксперимент может быть остановлен в любой момент времени по нажатию одной из клавиш на клавиатуре, для продолжения расчетов необходимо снова дать команду *F9 Start*>, которая уже не будет сопровождаться дополнительными запросами.

По мере подхода волн цунами к мариографным постам наблюдения, на них будут появляться: сначала записи о времени регистрации первого изменения уровня; затем

будут изображены столбики и надписи с экстремальными значениями уровня моря и временем его регистрации.

Если необходимо произвести уточненный расчет вблизи конкретного пункта на побережье, то можно воспользоваться методом "переката", то есть замены одной батиметрии на более подробную, непосредственно в процессе вычислений. Для этого необходимо приостановить расчеты и вызвать редактор батиметрических карт по команде < F6 Chart>. В редакторе может быть назначена переинтерполяция текущей матрицы с целью уменьшения шага сетки, с соответствующим уменьшением размеров расчетной области, или по команде < F3 Read> может быть прочитана другая батиметрическая карта. После выхода из редактора будет интерполирована не только матрица батиметрии, но и все расчетные гидродинамические поля. До запуска вычислений на новой карте, желательно снова обратиться к меню < F2 Service>, где необходимо сделать повторное уточнение и установку минимальной глубины моря в соответствии с аппроксимационными критериями.

В программе ANI предусмотрена только временная блокировка файлов протокола и мариографных данных, которая делается только на моменты их обновления, обусловленные дискретностью записываемых временных рядов. Это означает, что текущие результаты вычислений могут быть просмотрены с другого компьютера, имеющего доступ к файлам результатов через локальную сеть. При этом текущие файлы результатов могут быть удалены или переименованы, программа ANI это обнаружит и оформит их заново, начиная с текущего момента времени.

Если в меню *F2 Service* установлен режим записи контрольных точек "*Check-Point*", то на другом сетевом компьютере может быть продублирован расчет, что может потребоваться для уточненного моделирования в нескольких береговых пунктах одновременно.

На первом этапе моделирования цунами, которое должно выполняться в оперативном режиме, требуется наискорейшее вычисление амплитуды и времени подхода максимальной волны цунами. Эта информация непрерывно показывается и обновляется на графическом экране ЭВМ. По трехмерному изображению волнового поля, которое тоже периодически обновляется на экране, можно сделать оценку времени угасания волнения, вызванного цунами, что требуется для принятия решения о прекращении тревоги цунами.

Основные результаты моделирования цунами, а также все характеристики расчетной области и параметры генерируемых волн записываются в виде текстового протокола, с помощью которого возможно точное воспроизведение всего вычислительного эксперимента.

#### 6.5. Моделирование приливного режима

Моделирование приливных колебаний в Охотском море основывается на использовании приливных гармонических постоянных в качестве исходных данных для генерации волновых движений в окрестности мариографных постов, на которых эти гармоники измерялись.

Для моделирования приливного режима необходимо перестроить параметры математической модели, для этого вызывается меню  $\langle F2 \ Service \rangle$  и устанавливается режим учета вращения Земли "*Coriolis Forces*", добавляется учет вязкости "*Friction* = 0.0025" (*для Охотского моря 0.0013*). При моделировании столь длительных во времени процессов, как приливные колебания, встает вопрос уже не о соблюдении аппроксимационных критериев, а об обеспечении аппроксимационной точности. Это означает увеличение количества аппроксимирующих волну ячеек до 24÷30 вместо 6÷4, использованных ранее для моделирования цунами.

Приливные гармоники и координаты мариографных постов хранятся в файле ANI.tim, который автоматически открывается из меню *<F3 Time>*, при обращении к окну "*Tide**Wave*" в первое строке этого меню. При последующих вызовах "*Tide**Wave*" будет предложено выбрать другой файл с приливными гармониками, по маске "*.tim". Когда на экране изображен список приливных станций, то пробелом можно исключить некоторые из них из процесса генерации приливных волн, исключенные станции помечаются знаком "**#**".

Если выйти из списка по команде  $\langle Escape \rangle$ , то все доступные приливные станции будут работать в качестве генераторов приливных волн. Если же из списка выйти по команде  $\langle Enter \rangle$ , то приливные гармоники той станции, на которую указывает курсор, будут использованы в качестве генератора приливных волн входящих через свободные границы. Первый вариант:  $\langle Escape \rangle$  - может быть использован для восстановления приливного режима в больших полузакрытых областях, когда в восстановлении приливного поля задействуется весь комплекс наблюдений на открытых границах расчетной области. Второй вариант:  $\langle Enter \rangle$  - может быть использован при восстановлении приливного поля в малых расчетных областях или при исследовании вынужденных колебаний от простых источников.

Запуск процесса вычислений производится по команде *<F9 Start*>, за которой следует более сложный запрос, где кроме имен файлов, времени начала и дискретности записи мариограмм, может быть сделан запрос на уточнение физического времени начала вычислений. Последнее учитывает тот факт, что запуск приливной волны делается с момента смены знака амплитуды приливной волны (*когда волна имеет нулевую амплитуду*). При моделировании приливного режима в Охотском море, процесс уста-

213

новления приливных колебаний длился около одной недели физического времени, качественные результаты по амплитудам и фазам приливных волн были получены примерно через один месяц вычислительного процесса.

Моделирование приливного режима может быть приостановлено на контрольной точке, при этом в файл рестарта будут записаны все данные, необходимые для восстановления вычислительного процесса, в том числе данные по батиметрии, постам наблюдения и приливным станциям. То есть для продолжения расчетов достаточно одного файла рестарта: "FileName.chk".

Алгоритмы расчетов прилива еще не доведены до уровня, достаточного для включения в режим непрерывного моделирования, по нескольким причинам:

- 1. еще не было выполнено ни одного расчета, где количество приливных станций было бы достаточным для перекрытия всех Курильских проливов;
- не отрабатывались эмпирические параметры связанные с величиной и изменчивостью придонного трения и искусственной вязкости, присутствующей в разностных аппроксимациях гидродинамических уравнений;
- не корректировалась топография морского дна вблизи от приливных станций, что необходимо делать для согласования фазовых характеристик приливных волн проходящих по реальному морю и по сеточной расчетной области;
- 4. в программе реализованы законы управления уровнем моря вблизи точек генерации приливной волны, которые слишком жестко отслеживается абсолютный уровень моря, это будет мешать совместному моделированию приливов со штормовыми нагонами и цунами.

Это те вопросы, которые нуждаются в доработке, при этом первые два из них могут быть решены только при помощи или участии Сахалинского УГМС.

#### 6.6. Прохождение атмосферного циклона и прогноз штормовых нагонов

Реализация алгоритмов моделирующих взаимодействие атмосферы и океана, изначально была ориентирована на использование реальных полей атмосферного давления и ветра. В настоящей же версии программы используется упрощенное представление атмосферного циклона, который на поверхности воды имеет форму окружности, внутри которой задано вихревое распределение скорости ветра с небольшим спиральным закручиванием к центру циклона.

Моделирование циклона производится в программе  $\langle F6 Simulation \rangle$ , где для задания траектории и параметров циклона предусмотрена процедура  $\langle F5 Meteo \rangle$ . На графическом экране ЭВМ циклон изображается в виде окружности, с осью ориентированной по меридиану. Если внутри циклона задается перепад давления или определяется скорость ветра, то внутри окружности появляются кривые линии, показывающие функции распределения этих полей.

Все параметры циклона могут быть определены в меню, которое вызывается по команде *«Enter»*. Позиционирование циклона может быть выполнено, также, с помощью стрелок на клавиатуре. Фиксация контрольной точки на траектории выполняется по *«Insert»*.

Команда  $\langle Space \rangle$  - пробел, связывает подвижную отметку с ближайшей контрольной точкой на траектории циклона, такую же привязку можно сделать с помощью  $\langle + \rangle$  и  $\langle - \rangle$ , где контрольные точки будут перебираться по списку. Если подвижная отметка связана с контрольной точкой, то ее можно удалить с помощью  $\langle Delete \rangle$ , или передвинуть на новое место, для этого необходимо перемещать отметку удерживая нажатой клавишу  $\langle Shift \rangle$ .

Моделирование циклона можно выполнять по тем же правилам что и цунами, но учитывая что циклон обычно покрывает большие расчетные области, необходимо ввести учет сферичности и вращения Земли, а также подобрать коэффициенты придонного трения.



*Приложение А.* ANI - программный модуль вычислительного моделирования гидродинамики океана

В основном режиме работы, на графическом экране ЭВМ изображается географическая карта исследуемой акватории и информационная строка с обозначением основных команд управления. Результаты вычислений всегда представляются в форме иллю-
стрированных географических карт или снимаются с экрана путем подведения курсора к интересующей исследователя точке.

В случае проведения вычислительных экспериментов в волновой динамике океана, комплекс обеспечивает ведение подробного протокола с описанием всех условий моделирования и всех действий исследователя по управлению процессом вычислений, а также поддерживает оперативную регистрацию состояния моря в заранее указанных постах наблюдения.

Если моделирование производится на компьютере подключенном к локальной вычислительной сети, то с другого компьютера допускается просмотр результатов и протоколов вычислений. Предусмотрен также режим рестарта с контрольной точки, который можно использовать для продолжения вычислений после временной остановки или для дублирования расчетов с другими параметрами внешнего возмущения на другом сетевом компьютере.

Перед началом работы с программой ANI желательно исполнить команду DispCCCP, которая предназначена для русификации терминала ЭBM, или обеспечить заполнение соответствующей (8х8) графической таблицы DOS с помощью утилиты GrafTabl (*если, конечно, в названиях пунктов наблюдения или в комментариях информационного файла есть слова с русскими символами*).

Программа переключает терминал ЭВМ IBM-PC в графический режим сразу же после старта и никогда не возвращается к обычному текстовому терминалу. Так как графическая система программы построена только на примитивах стандартной графической библиотеки компилятора Borland C++, то проблема выбора типа монитора связана только с наличием соответствующего BGI-драйвера. Программа тестировалась на мониторах CGA и Hercules. Драйверы для EGA, VGA и SVGA включены в тело программы.

Все внутренние сообщения программы переведены на английский язык и представляются наборами ключевых слов, указывающих на характер выполняемых операций или тип обрабатываемых объектов.

Формат запуска программы из командной строки имеет стандартный для операционных систем вид:

## >ANI.exe D:\Path\FileName.inf

При запуске программы можно указать имя информационного файла.

Файлы содержащие батиметрические материалы и их текстовое описание, являются обязательными исходными данными для программы ANI. Цифровая батиметрия определяется с помощью матрицы, оцифрованной с помощью равномерной прямо-

угольной сетки, которая может быть либо в Меркаторской, либо в географической проекции. Описание батиметрических данных производится в информационном файле, помеченном расширением (.inf), внутри которого делается ссылка на реальные цифровые данные, сформированные в текстовом (.dat), целочисленном (.int) или байтовом (.byt) форматах.

Образец	информационного	файла

- 1. Название или назначение батиметрической карты может быть
- 2. задано в первых двух строках комментариев.

```
Okhotsk.int
3
      2
                                       0:Text; 1:Byte; 2:Integer
                          | Type
4.
      2
                            Format
                                       0:Var; 1:Line; 2:Field; 3:Space
5.
                          Ny Nx
                                       Field's Dimension
   144 256
6.
                          Jy Jx Ly Lx Field's Base & Size
     12 16 62 76
7.
                          Max Min
   8650 -2957 m
                                       Bathimetry Extreme & Scale
8.
     12 12 ' 50
                            Sy Sx ' Fe
                                       Grid's Step, <'dkm> & Lat. of Scale
q
10. 18 42°36′ 141°55′
                          Cs Fi°'Lo°'
                                       Course, Latitude & Longi-tude
                            Nc
                                       Number of Marigrams (control points)
      5
11
                       Korsakov
                                     46°18′ 142°53′
                                                        64
   11.5
           6.2
   59 21
                       Magadan
                                     58°60' 142°39'
                                                        52
                       Усть Камчатск;
   55:50' 162:39'
                                           комментарий после точки с запятой
  ; 22.3
            50.1
                       Petropavlovsk -- эта строка исключена полностью
   52°50' 159°02'
                       Петропавловск Камчат^ский, в имени только 20 букв
                                     53°47′ 143°30′ 110 здесь имя из одного слова
   37 16
                       Okha
```

- **1-2** Две строки комментариев, которые являются заголовком к графическому изображению;
- **3** Имя числового файла, где описание пути доступа может быть опущено, если батиметрия находится в той же директории, что и информационный файл, также может быть опущено и само имя файла данных, если это имя совпадает с именем (.inf);
- 4 Тип числовых данных в файле батиметрии: 0 *текстовые*(.dat), 1 *байтовые*(.byt) или 2 *целые*(.int);
- 5 Метод представления числовых данных. В настоящем варианте программы ANI, здесь может быть только число 2;
- 6 Размерность ( nY,nX ) для полной матрицы в файле батиметрии;
- 7 Смещение и размеры вырезаемого из батиметрии прямоугольника. Первые два числа определяют нижний левый угол, с которого начинается считывание данных, он может быть задан либо целыми числами - индексами матрицы, либо с указанием признака градусной меры с помощью символов (°, ', "). Размеры считываемого сегмента данных всегда задаются длинами сторон в количестве ячеек;

- 8 Экстремумы (Max, Min) батиметрии и символ единиц измерения в m, cm или dm. Если Max<Min, то это означает, что глубины заданы отрицательными числами, а береговые высоты положительными. В такой матрице производится автоматическое изменение знака у всего массива данных;
- 9 Шаг сетки dY,dX: в градусах или минутах ( deg uлu ' ) для географической проекции, в метрах или километрах ( m unu km ) для Меркаторской. Если первое число, dY отрицательно, то это означает, что строки исходной матрицы отсчитываются сверху вниз. Третий символ ( m, km, deg, ' ) определяет тип проекции, соответственно. Последнее, 4-е число определяет приведенную широту для Меркаторской карты;
- 10 Направление левой границы батиметрии относительно главного меридиана и географические координаты для левого нижнего угла матрицы батиметрии (как карты). Координаты задаются в слитном формате: ±ddd°mm'ss"zz или ^{*)} ±ddd:mm'ss"zz, где каждое поле может быть плавающим числом с точкой, а обычное число без символа единиц измерения воспринимается как градусная величина;
- **11** Количество контрольных пунктов, координаты которых задаются в соответствующем количестве последующих строк;
- 12+Nc В старом формате строка описания пункта наблюдения состояла из индексных координат ( kY, kX ) относительно полной матрицы батиметрии, за которыми могло следовать только одно слово для определения названия этого пункта. Новый формат описания включается, если в одном из координатных чисел содержится символ градусной меры (°, ', "), тогда координаты считаются географическими, а название собирается из последующих слов пока длина строки не превысит 20 символов. Символ точка с запятой (;) является признаком начала комментария, который может ставиться также и в начале строки.

Обычно выборка координат пунктов наблюдения производится при старте программы ANI или при чтении новой батиметрии из картографического редактора Chart. Обычно все пункты выходящие за пределы считываемого сегмента [Jy+Ly,Jx+Lx], исключаются из списка и не попадают в программу. При повторном считывании координат исключаются также новые точки, которые приближаются на 1/3 размера ячейки к одной из уже имеющихся точек.

Если же считывание батиметрии производится через редактор (Chart) вызванный в режиме вычислительного эксперимента (Simulation), то новые пункты наблюдения не

^{*)} В определении градусной меры символ (°) может заменятся двоеточием (:).

считываются, а уже имеющиеся в оперативной памяти точки сохраняются без изменений их координат, даже если они выходят за границы расчетной области.

Все команды, алгоритмы и задачи, которые доступны в программе ANI, указываются либо в нижней строке экрана. либо описаны в подсказках, которые вызываются по команде **F1** или "**H**".



North West of Pacific Ocean

F1 Help F2 Mario F3 Write F4 Chart F5 Time F6 Simulation F7 Seismic List

Рис.А.1. Пример изображения на экране после успешного запуска программы с батиметрией Охотского моря. Выполнена команда F1, которая выдала на экран краткое описание основных команд. В нижней строке приводится список основных команд управления программой, который, обычно, всегда присутствует на экране ЭВМ. Цифры 68+8008k, в левом нижнем углу, означают количество задействованной и свободной оперативной памяти. Сектор в круге показывает направление на север, слева от него указаны координаты левого нижнего угла карты, справа шаг географической сетки и тип картографической проекции. В правой части подписи оказано название файла, размерность матрицы и тип батиметрических данных.

## 1. Особенности и дополнительные функции графической среды

Если программа остановлена в ожидании запроса с клавиатуры, или в процессе вычислений предусмотрены прерывания, то можно воспользоваться "горячими клавишами" для выполнения дополнительных функций, связанных с обработчиком клавиатуры:

< Spa	<b>ce</b> > "I	робел" снимает лишние надписи и удаляет строку подсказки;
< alt+	С> И че	вертирует изображение на экране, подбирая палитру для изменения оного фона на белый;
< alt+	P> B	зывается программа печати или сохранения графического изображения:
^t ♦ F2	*.pcx C	хранение графического изображения в формате "ZSoft-Paintbrush+"
F3	*.tv 3. 6 21 21 21 11 21 11 21 11 21 11 21 21 21	пись монохромного изображения в файл в формате совместимом с BM-Graphics". Полученный таким образом графический файл может ть прочитан программой TV для редактирования и объединения с дру- ми рисунками (описание ниже), на него можно сделать ссылку из про- иммы ChiWriter, в последующем этот файл может быть распечатан с мощью консольной команды:
	Ľ	DS>COPY /b FileName.TV PRN
F4 F5	Epson/IB PCL-5	1-Graphics Команды непосредственной печати на матричном и растровом принтере, доступны только в случае готовно- сти принтера к работе.
< alt+	С > Ин ног	ертирует изображение на экране, подбирая палитру для изменения чер- фона на белый;
< alt+	D> Вы юто рен и э фи лат alt-	ывает встроенную процедуру рисования, с помощью которои выполня- надписи и делаются простые рисунки. В данной программе предусмот- настройка косоугольного базиса, с помощью которого, прямоугольники липсы могут быть нарисованы в системе координат связанной с геогра- еской проекцией. Точную установку графического маркера можно сде- с помощью курсора в основной программе, до исполнения команды D. В режиме редактирования рисунка доступны следующие команды:
♥ F [·]	1 Help	подсказка в виде перечисления команд в нижней строке
F	2 Text	текстовый режим
Ŕ	Tab	выбор цвета
	Стрелк	перемещение подвижного маркера. Буква пишется в правом нижнем секторе этого крестового курсора.
	Shift +	ускоренное перемещение подвижного маркера
	стрелки	_
	Insert	текстовый курсор устанавливается в позицию подвижного маркера;
	Delete	подвижный маркер возвращается к позиции текстового курсора;
	Enter	происхооит перехоо на новую строку, при этом начало строки уста- навливается в горизонтальной позиции второго - подвижного марке- ра:
F	3 Object	выбор графического режима: Line-Basis-Rectangle-Ellipse, про- изводится путем повторного нажатия клавиши <b>F3</b> .
$\not\in$	Insert	курсор переносится в позицию второго - неподвижного маркера;
	Delete	подвижный маркер возвращается к позиции активного курсора;
	Tab	выбор цвета
	<i>Shift</i> + 7	и выбор типа линии: сплошная - прерывистая - толстая

	Shift +		перемещение <u>объекта</u> или ускорение движения контрольной
	<i>cmpe</i>	лки	точки ни <u>линии</u> албор тошен на лиции для редактирования:
	< +   ·	· >	выоор точки на <u>линии</u> оля реоактирования,
	Inser	t/Delete	оооавление / снятие узловои точки на <u>линии;</u>
	Up / Down		изменение размера вертикальной оси Y <u>для базиса и объекта</u> ;
	Left/I	Right	изменение размера горизонтальной оси X <u>для базиса и объекта</u> ;
	Hom	e/PgUp	наклон оси <u>базиса</u> <b>Y</b> влево/вправо (против/по часовой стрелке);
	End/	PgDn	поворот <u>базиса</u> влево / вправо;
	Hom	e/PgDn	деформация + <b>Y-X</b> / - <b>Y</b> + <b>X</b> для эллипса и прямоугольника;
	PgUp/End		увеличение / уменьшение размеров <u>объекта</u> ;
	Enter	•	закрепление объекта на экране, сброс редактирования;
	Shift-	+Enter	закрепление изображения и продолжение редактирования;
< Escape > Выход и		Выход и	з вычислительной процедуры, закрытие окна или программы;
< ctrl+C > Немедле		Немедле	енная остановка программы;
<alt+s> Bpement DOS&gt; e pawenus</alt+s>		Временн DOS> ех ражения	ный выход в DOS. Возврат в программу производится по команде <b>xit</b> , после чего необходима ручная перерисовка графического изоб-
		ческой с	реды пока не предусмотрено.
<b>F1 Help</b> Краткое или <b>'h'</b> слов:		Краткое слов:	описание системы команд в виде фраз составленных из ключевых

Графическая система программы эмулирует текстовые операции с помощью наложенных на изображение окон. Запрос на ввод текста обычно осуществляется в рамке с внутренним угловым курсором. Для редактирования текста можно использовать по привычному назначению командные клавиши: *стрелочки <Left>*, *<Right> u* <*lns>*, *<Del>*, *<BkSp>*, *<Enter>*. Если текст был редактирован, то по *<Escape>* последние исправления будут отменены.

Таблицы - меню составляются из вышеописанных строчных запросов, и берут на себя дополнительные клавиши, это: стрелочки <Up>, <Down> - которые служат для перехода из одного окна в другое; а также <*PgUp*>, <*PgDn*> - которые переключают запрос на первое или последнее окно запроса в меню соответственно.

Диалог обычно строится по следующим правилам:

- ⇒ Обычные текстовые окошки закрепляют корректировки при переходе к смежному окну. Нажатие клавиши «Enter» всегда приводит к возврату управления из меню в программу с указанием номера затронутого окна-запроса, поэтому такой ответ иногда используется для запуска вычислительных процессов;
- ⇒ Не задействованные в редактировании запросов функциональные клавиши также приводят к выходу из режима текстовых окон или меню, что используется для управления программой, но в этом случае, такие команды обычно указываются в нижней строке-подсказке;
- ⇒ Числовые запросы в окнах могут быть скорректированы. Перечитывание исправленного числа происходит только в случае изменения текстового представления

числа в окне. Последнее сделано для сохранения исходных значений чисел, которые могут не умещаться в рамках текстовых окон - запросов;

⇒ Текстовые запросы могут быть с внутренним курсором - для изменения содержания текстовой информации, или без него - что делается для устройства переключателей режимов, которые выполняются нажатием клавиши *«Enter»*, а после исполнения репетуются программой соответствующими ключевыми словами в окошках запросов;

			2.	Расста	новка постов наблюдения и картографические измерения.		
F2 Mario процедура расстановки постов наблюдения,			асстановки постов наблюдения,				
			измер	ения р	асстояний и редактирования батиметрии		
Ð	F1 Inf Включе мация о ным ку		ение/ве с опис урсорол	иключение текстового окна, в котором собирается инфор- анием данных и результатов измерений в точке под подвиж- и;			
	₿	1234 F: 4	[12x3/ !0°36′	<b>4</b> ] m	Глубина, индексы местоположения и единицы измерения; Широта и		
		L: 1	34°44	′48″	долгота для местоположения активного маркера;		
		Dst -	• <b>12°</b> кі	M	Расстояние между подвижным и контрольным курсорами;		
		55.3	ß>°<−1	09.0	Азимуты дуги большого круга, соединяющего маркеры		
		BkSp		Редак	пирование значения поля в ячейке под курсором.		
		Shift +	-Del	Перен	ос контрольной точки в позицию подвижного маркера.		
		Shift +	F	Измер	ение расстояний и азимутов, а также смещение поста		
		стрел	ка	наблю	дения в новое место.		
		<i>Shift</i> ⊣	-Enter	Закрет курсор	Закрепление смещенного поста в новом месте или смена привязки курсора между подвижным маркером и контрольной точкой.		
	F2 Depth		<b>Проце</b> ний ис части уровня	удура перерисовки батиметрии. Если при построении изоли- пользуется список из нескольких значений уровня, то в левой экрана показываются площади оконтуренные смежными ими, в процентах.			
	₿	F1 He	elp	Крап	<i>икая инструкция по командам.</i>		
		F2 Ax	is	Изоб	ражение географической сетки и надписей.		
	F3 List		Зада	ние списка линий уровня для прорисовки.			
	F4 Auto		Авто	матическое построение списка линий уровня.			
	F9 Clear		Очис	тка рабочей области.			
	F10 Clear Al		<b>I</b> Полн	Полная очистка экрана ЭВМ.			
		± 01	9	При	наборе числа, прорисовывается соответствующая изолиния.		
	F3 Name Cnocc		об обоз	вначения пункта: название - номер - буква - без надписи;			
	In	s / Del	Уста	ановка	/ удаление поста наблюдения за уровнем моря.		
	0,	1 / 29	0 и 1 ляют	сбраси 1ся мно	ывает шаг курсора к размеру одной ячейки, другие цифры яв- жителя для текущего шага.		
Enter Vcmar		ановка	подвижного маркера на ближайший из постов наблюдения.				

## 3. Сохранение обновленных данных

F3	Write	Команда з описателе	записи данных и справочников батиметрии и/или только ее й.
∳	<u>Text, Int,</u>	<u>Byte</u>	Полная запись батиметрических данных в указанном форма- те, а также их описателей;
	Inf only,	<u>Bathymetry</u>	Запись либо только информационного файла, либо только батиметрии.

(W) - необходимо обратить внимание точность числовых величин получаемых при перезаписывании информационных файлов, так как точность автоматически сформированных числовых описателей оказаться существенно хуже чем в оригинальном информационном файле, в котором, как правило, картографические описатели подготавливаются вручную.

Запись данных произойдет только в том случае, если на все запросы будет дано подтверждение с помощью клавиши < *Enter* >.



4. Редактирование и интерполяция батиметрических карт

Рис. А.2. Изображение на экране ЭВМ базы данных по оцифрованным батиметрическим материалам лаборатории цунами ИМГиГ ДВО РАН, полученное с помощью процедуры просмотра и редактирования батиметрических карт.

F4	F4 Chart		Вызов картог данных:	афического редактора для перестройки или интерпо	ляции
Ð	F1 Info <i>Включение или</i>			выключение окна с текущими картографическими .	харак-
			теристиками		1
	₿	Merca	tory	Картографическая проекция: Mercatory / Geography;	
		F	40°36′	Широта Фи	
		L	134°44′48″	долгота λ нижнего левого угла карты.	
		Cs	-12°	Наклон левого края рамки относительно меридиана.	
		dY <b>36</b>	.12 km + 64	Расчетный шаг сетки и	
		dX <b>32</b>	.66 km + 80	размерность матрицы батиметрии.	
	F	2 Mario	Вход в прог Магіо, описан	амму расстановки мариографных постов наблк ую ранее под командой <b>F2.</b>	эдения
	F:	3 Read	Считывание п	овой батиметрической карты, при этом, если ред	актор
		o neud	вызван из про	едуры "Simulation", то корректировка и пополнение	? cnuc-
			ка постов наб	юдения не производится.	
	F4	4 Chart	Вызов меню д	я ручного вписывания числовых характеристик карн	погра-
	L	Ir	фической прое	ции и параметров сеточной области.	
	₿	<u>Merca</u>	<b>tory</b> Project	on <i>Tun проекции:</i> Mercatory / Geography.	
		Latit	ude <u>40°36′</u>	Широта и	
	Longitude 134°44			<u>8″</u> долгота нижнего левого угла карты.	
		Cours	e <u>-12°</u>	Наклон левой рамки относительно меридиана.	
	Scale Step		Lat. <u>52°</u>	Приведенная широта Меркаторской карты.	
			y= <u>36</u> , x= <u>32</u>	km Шаг сетки в км, м или '- минутах, d - градуса.	x.
	Size		Ny= <b>64</b> , Nx=	<u>О</u> Размерность батиметрической матрицы.	
	F5 Nodes		les XOR изоб	ажение узлов расчетной сетки (включение/выключен	iue)
	<b>F10</b> U		ndo Отмена в	гх операций редактирования.	
	< Esca		<b>ре</b> > Выход из л	еню редактирования параметров батиметрии.	
	F:	5 Nodes	XOR изобраз	сение узлов расчетной сетки (включение/выключение,	)
	F′	10 Undo	Отмена всех	операций редактирования;	
		< <b>H</b> >	Краткая инс	прукция по командам;	
	"turn" Команда на метрии отно "shift" Аналогичная описатели п манда може меню (F4 Ch		Команда на метрии отно	ирается на клавиатуре и приводит к перевороту сительно горизонтальной оси;	бати-
			Аналогичная описатели п манда може меню ( <b>F4</b> Ch	скрытая команда, которая произвольные географи ивязывает к текущей матрице батиметрии. Данн в быть использована после набора характеристик ка rt), для описания новой матрицы батиметрии;	ческие ая ко- рты в
	<ul> <li>&lt; d   ' &gt; Символ гра определяет</li> </ul>		Символ град определяет г	ca (degree) или минуты задает размерность шага се ографическую проекцию карты.	етки и
	<	< m   k >	Символ мет шага сетки и	а или километра задает соответствующую размер определяет Меркаторскую проекцию.	ность
	<	< <b>R</b>   <b>r</b> >	Поворот рам	ки карты против или по часовой стрелке.	
< Enter >			> Переключені верхней гран	режимов движения для всей рамки, или для ее про цы.	авой и

Стрелки Shift+む⇔	Движение рамки ограничивающей карту или ее правой и верхней грани- цы.
0,1 / 29	0 и 1 сбрасывают скорость перемещения рамки в 1, другие цифры яв- ляются множителя для текущего шага.
Escape	Объявление о выходе из процедуры редактирования, на которое требу- ется один из вариантов ответа.
<enter> n</enter>	одтверждение выхода с пересчетом (переинтерполяцией) данных на но- ую карту;
< <b>BkSp</b> > в б	ыход из программы без пересчета, или выход с теми же данными что ыли при входе, или же с данными которые были считанными из файла;
< <u>Escape</u> >	возврат в программу редактирования, при этом изображения текущих раниц будет закреплено на экране;



#### 5. Процедура расчетов и построения кинематических полей

Рис. А.З. *На рисунке показана ортогональная сетка, составленная из лучей и фронтов волн для землетрясения и цунами 5 октября 1995 года.* 

При работе с процедурой Time, на экране ЭВМ изображается географическая карта региона, по которой, с помощью "мыши" или стрелок на клавиатуре, перемещается активный маркер. Второй - невидимый маркер проявляется при движении маркера с одновременно нажатой клавишей *«Shift»*. Информация о координатах, глубине моря и другие расчетные величины могут выводиться в правое верхнее текстовое окно.

Процедура Time предназначена для построения карт кинематики волновых фронтов и лучевых картин для источников произвольной формы, для группы из нескольких источников начинающих излучение по заданному временному расписанию, а также построение разностей прихода волн от группы источников излучения в защищаемые пункты и точки наблюдения. Кроме решения большого круга исследовательских задач (*на которые пока ориентирован весь программный комплекс*), процедура Time легко может быть освоена с целью выполнения экспертизы цунами-защищенности побережья в службе предупреждения о цунами, с нижеследующими задачами:

- ⇒ Решение задачи о заблаговременности предупреждения и поиск зоны ответственности для гидрофизических постов наблюдения за уровнем моря.
- ⇒ Оптимизация расстановки гидрофизических постов при проектировании и анализе гидрофизической подсистемы предупреждения о волнах цунами.
- ⇒ Оперативный анализ концентрации волновой энергии на побережье, сразу же после определения формы источника цунами или географических координат для цунамигенного землетрясения.

#### 

Активизация тестового информационного окна, в котором показывается информация о местоположении, глубине моря и результатах вычислений в точке отмечаемой активным курсором.

Здесь же выдаются результаты измерения расстояний и направлений, которые выполняются с использованием дуги большого, соединяющей активный маркер с дополнительной точкой, которая возникает в случае удерживания в нажатом состоянии клавиши *<Shift>*.

F: 40°36′18″	Широта и
L: 134°44′48″	долгота для местоположения активного маркера.
D[ <b>12,34</b> ]= <b>1234</b> m	Индексы местоположения и глубина моря.
Offset = <b>12'</b>	Текущее смещение стартового времени под курсором.
Height = <b>0.16~</b>	Коэффициент усиления на фронте волны (исследуется).
Angle = <b>24.4</b> °	Направление подхода лучевой трубки к маркеру.
Time = <b>123.4'</b>	Время подхода волны в точке измерения под маркером.
Dst- <b>123.45</b> км	Расстояние между подвижным и контрольным маркерами
55.3>°<-109.0	Азимуты дуги большого круга, соединяющего маркеры.

F	2 Show	Вы виз	изов меню настройки параметров расчета, методов оперативной вуализации результатов, а также для получения списка процедур	
	npoj		рисовывающих расчетные поля.	
Ð	Identity <u>No</u> Amplitude <u>No</u> Mario <u>Identify</u>		Yes   <u>No</u> - для расчета границ, оконтуривающих области наискорейшего подхода волны (зон ответственности) <u>Show</u>   Hide   Away - появляются после завершения расчетов	
			и задают условия показа, скрытия или удаления данных. Yes   <u>No</u> - указание на задействование алгоритмов расчета коэффициентов усиления прогрессивной волны. <u>Yes</u>   Off - означают, что поле коэффициентов усиления уже есть в памяти, команда Off удалит его.	
			Identify   by Number   in Letter   Invisible - метод представ- ления постов наблюдения, в виде текстовой отметки как: - Имя   по Номеру   как Буква   Невидимый (без отметки).	
	Ray <u>o</u>	only	Принимает значения: Ray only   Ray & front   Front only   Switch Off, которые позволяют определять режимы быст- рой прорисовки лучей и фронтов.	
	Step <u>0</u>	. <u>6</u> cells	З Шаг для быстрой прорисовки лучей и фронтов	
	Arc <u>300</u>	degre	е Угол раскрытия для изображения фронта.	
	Break <u>12</u> angles		S Количество последовательных сломов линии, после которых прорисовка (интегрирование) прекращается.	
	<b>F1</b> Help B		Вызов окна с кратким описанием команд и режимов.	
	<b>F2</b> Depth		Прорисовка изобат, описана в F2-Mario, F2-Depth.	
	<b>F3</b> Current		Прорисовка текущего расчетного поля времен или разностей.	
	F4 City 1	ïmes	Поле времен посчитанное до сохранения и расчета разностей.	
	F5 Old Times I		Поле для сохранения предпоследнего расчета разностей.	
	<b>F6</b> <i>Identity N c</i>		Матрица индексов постов наблюдения, с помощью которой строятся области или границы зон ответственности.	
	<b>F7</b> Amplitude N		Матрица коэффициентов усиления волн цунами.	
	Escape		Выход из меню настройки и визуализации результатов.	
F:	3 Save	Сохра област	нение текущего поля времен или разностей в дополнительной пи памяти (City Times и Old Times).	
♦	Сохранен	ные д	анные используются при последующих расчетах, для получения	
	полей разностей времен подхода волн от различных источников. Текущий режи			
вычислении отмечается цветом активного маркера:			иечается цветом активного маркера:	
	голуоои - вычисление времен подхода фронта волны;			
	зелены	- L	вычисление разностеи времен подхода волн;	
<b>—</b>	ψиолет	овыи -	оооавление источников к текущему полю разностеи.	
F4	4 Front	Запусн быть послед	к вычислений поля времен добегания, которой затем может подвергнуто автоматическому пересчету в поле разностей, если днее определено режимом F3-Save.	

# **F5 Rays** Запуск алгоритма подготовки промежуточной матрицы для быстрой прорисовки лучей и фронтов.

Когда эта матрица будет подготовлена, то клавиша F5 переключает режимы изображения: Ray, Ray+Front, Front, None (луч, луч+фронт, фронт или ничего). Настройка точности интегрирования лучей, сектора раскрытия фронта и др. параметры выставляются в меню F2-Show. Линии лучей и фронтов изображаются в темпе движения маркера и не дорисовываются на всю длину, если маркер движется слишком быстро. Для закрепления линии на экране необходимо воспользоваться < Tab >.

**F6 Results** Вызов сводной таблицы по результатам вычислений в заданных пунктах наблюдения.

В зависимости от режима вычислений, в таблице приводятся следующие измерения на постах наблюдения:

Depth - глубина моря в точке наблюдения;

Ś

Time - время прохождения волны от источника до поста наблюдения;

Delta - погрешность измерения времени, присущая данному посту наблюдения;

Height - коэффициент усиления относящийся к первому вступлению волны.

**F2** Write Запись текущего протокола измерений распространения фронта волн в перечисленных постах наблюдения.

По запросу необходимо скорректировать имя выходного

текстового файла и подтвердить его командой < Enter >.

F7 Seismic	Обращение к базе данных сейсмических событий и цунами. При выходе из Seismic, курсор остается на указанном событии. Форматы данных и команды управления описывается в команде <b>F7</b> главного уровня.
F8 Restore	Восстановление ранее просчитанного источника для его редактирова- ния или повторения расчетов.
< <b>Tab</b> >	Закрепление на экране текущего изображения луча или фронта.
< T >	Установка одной точки источника с запросом времени старта.
< 0 >	Установка одной точки источника с текущим временем ( 0 или Т. ).
< M >	Включения режима, когда все точки по маршруту перемещения маркера отмечаются как источники излучения длинных волн.
< Enter >	Курсор устанавливается на ближайший пост наблюдения.
< Insert >	Установка нового поста наблюдения или редактирование имеющегося
< <b>Del</b> >	Удаление поста, на котором установлен активный маркер.
<+ ->	Перебор постов наблюдения по списку вперед (+), в начало (-).
<0,1   29>	0 и 1 сбрасывают шаг перемещения курсора в единицу, другие цифры являются множителями для текущего шага.
Shift + <b>Del</b>	Установка второго маркера, относительно которого измеряются азимуты и расстояния.
Shift +	Перемещение активного маркера, когда в информационном окне указы-
стрелки	вается расстояние и азимут относительно второго маркера.
Shift+Bksp	Взаимная смена позиций активного и второго маркера.
< Escape >	Выход из программы кинематических расчетов заблокирован вопросом "?Are You Sure" (Вы уверены?), требующего подтверждения: Yes.



#### 6. Проведение полного вычислительного моделирования

**Рис.** А.4. Пример отображения на экране ЭВМ текущих результатов расчетов в процессе проведения вычислительного эксперимента.

Проведение вычислительного эксперимента при оперативном или исследовательском моделировании длинноволновых процессов в океане от различных источников. Снова повторим здесь список основных задач, решаемых с помощью процедуры 'Simulation'.

- ⇒ Численное моделирование приливного режима с учетом сферичности и вращения Земли, а также сил придонного трения. Данная задача предназначена для непрерывного моделирования приливного режима, с помощью которого информации и приливных режимах уровня моря и течений в любой точке расчетной области. Такое моделирование необходимо также для последующего дублирования расчетов с целью моделирования реального воздействия цунами и штормовых нагонов, которое может делаться в оперативном режиме с целью прогноза гидрофизической обстановки на побережье.
- ⇒ Оперативное моделирование воздействия волн цунами на побережье в режиме, когда вычисления производятся быстрее чем реальное распространение волн цунами. В этом случае, после сообщения о наблюдении экстремума волны цунами на ближайшем из постов наблюдения по отношению к источнику землетрясения, возможно реальное прогнозирование воздействия цунами во всех других береговых

пунктах. В случае принятия решения о тревоге цунами, с помощью указанного вычислительного эксперимента возможно предупреждение населенных пунктов о реальном времени прихода и повторении больших волн цунами, а также получение прогноза о времени затухания волнового процесса до безопасного уровня.

⇒ Численное моделирование штормовых нагонов, вызываемых прохождением атмосферных циклонов и тайфунов. В настоящее время реализовано моделирование циклона (тайфуна) проходящего по заранее заданной сплайновой траектории. В программе же, заложены алгоритмы позволяющие перестроить программу на считывание и интерполяцию реальных полей атмосферного давления и ветровых потоков, в соответствии с форматами представления числовой информации, которые доступны в оперативном режиме на синоптических постах, и которые используются в настоящее время при прогнозе погоды.

<b>F6</b> S	imulation	Вызов і	процедуры полного численного моделирования
উ <b>F</b> 1	1	=	Краткая информация о командах управления программой
Fź	2 Service	Обращені	ие к процедуре и меню настройки режимов работы комплекса 'Simulation'
Ð	Spheric	al Earth	Выбор системы отсчета для динамических уравнений: Simple Equations - прямоугольная меркаторская сетка; Spherical Earth - сетка с учетом сферичности Земли; Coriolis Forces - уравнения включают вращение Земли.
	Friction 0.00250		Friction <u>Absent</u> - означает, что учет придонного трения не ведется, иначе необходимо величину соответствующего ко- эффициента.
	New Draw After <u>6'</u> Cleaning & Draw Like 3d Wave by <u>1</u> <u>&amp; no Sea elevation</u>		Draw thru step_12 означает, что изображение будет обнов- ляться через 12 вычислительных тактов, New Draw After 6', означает что обновление изображения будет сделано через 6 минут во времени моделируемого процесса.
			<u>Continuous Drawing</u>   Cleaning & Draw управляют режи- мом многостраничной графики. В первом случае смена кар- тинки происходит мгновенно, во втором - изображение формируется на видимой странице памяти.
			А также: Wave Profile (by <u>1</u> ) или (avoid - omcymcmвие) ука- зывают на способ представления и частоту волновых про- филей.
			Способ двумерного представления уровня моря: Contour - изолинии уровня; Color - цветовые закраски.
	<u>Coast Co</u>	ontouring	Указание на то, что берег и мелководная зона оконтурива- ются линией, иначе: Shade Color - закрашивание.
	Flow Fie	ld ( <u>3 x 9</u> )	или Drift Field определяют дискретность прорисовки поля потоков или скоростей с помощью стрелок, расстояние между которыми задается в количестве сеточных ячеек.

±Level±Value< <u>Sea</u>		Переключатели режимов оперативной визуализации резуль- татов вычислений на постах наблюдения. +Level - изобра- жение столбиков с экстремальными значениями уровня за весь период вычислений. +Value - задает подписи времени прихода волны и ее экстремальных значений. <u>Sea</u> означает, что отсчеты уровня выполняются в отмеченных, или будут пересчитываться на указанную в этом поле глубину.
< <checkpoint>&gt; <u>30</u>'</checkpoint>		Включение режима записи контрольных точек, с которых возможен повторный запуск вычислительного моделирова- ния. Интервал здесь указывается в реальном времени вычис- лений по компьютерным часам.
Period-Cells-Depth <u>1440</u> <u>6.0</u> <u>0.00</u>		Калькулятор для вычисления текущих критериев простран- ственной аппроксимации. Три поля: <b>минимальный период</b> моделируемой волны в минутах; <b>количество точек</b> аппрок- симирующих полуволну в пространстве; минимальная глуби- на моря, за которой мелководье превращается в побережье. Чтобы получить значение одного из полей, необходимо под- вести к нему курсор и нажать на ввод, предварительно за- полнив требуемыми значениями два других поля.
F2 Redraw	Перери с парам	совка текущего изображения на экране ЭВМ, в соответствии етрами заданными в меню;
< Enter >	Измене ствие в	ние выбираемого параметра (и)или приведение в соответ- сех числовых величин.
< Escape >	Просто	й выход из меню.

F1 Help; F3 Time; F4 Source; F5 Meteo; F6 Source; F7 Seismic; F8 Mario; F9 Start

F3 Time

P

Определение параметров волн, которые генерируются на свободных границах или в районах постов наблюдения.

Меню представляется в двух режимах: 1 - определение простого пакета входящих волн; 2 - в качестве входящей волны задается комплекс приливных гармоник для конкретного поста наблюдения.

Если считывается файл с приливным режимом для имеющихся на карте постов наблюдения, то его данные считаются включенным в использование. Для снятия приливных генераторов необходимо заказать новый файл и отказаться от его считывания.

Пункты в списке приливных гармоник могут отмечаться для использования в расчетах с помощью клавиши "пробел", при этом символы перед названиями пунктов означают следующее:

- '+' с данным пунктом все в порядке;
- '0' пункт наблюдения расположен на берегу;
- *"#" пункт исключен из рассмотрения по команде "пробел";*
- '-' пункт не попадает в регион охватываемый батиметрией.

	Вариант № 1 Tide\ <u>Wave</u> <u>24</u> ′	При включении Tide\Wave делается попытка открыть файл ANI.tim, в котором хранятся экспериментальные измерения приливных гармонических постоянных. При повторном обра- щении и в случае отсутствия файла ANI.tim, делается запрос на открытие другого файла с гармоническими постоянными.
	Amplitude 0.00 m	Амплитуда входящей волны.
	Direction -45.0°	Направление входящей через границы прогрессивной волны.
	Initial CountDown	<ul> <li>отсчет времени начинается с момента запуска вычисли- тельного эксперимента.</li> </ul>
	Installing new way Previous time cou	/e - отсчет времени будет начинаться с текущего момента; int - отсчет времени от предыдущей установки.
	Вариант № 2 Петропавловск	В этом случае указывается пункт, по приливным гармони- кам которого будет формироваться входящая волна.
	Direction -45.0°	Направление для волны входящей через свободные границы.
	Ampl. Multiplier 1.0	Корректирующий амплитудный множитель.
	Prediction 0.01	Поправка ко времени вступления волны.
	< Escape >	□ Простой выход из меню.
	F1 Help; F2 Service;	F4 Source; F5 Meteo; F6 Source; F7 Seismic; F8 Mario; F9 Start
F	<b>4 Source</b> Процедура рическими	построения источника волнообразования, заданного геомет- размерами.
	Реализовано об могут последовате. ник в форме купола косинусов; 2) - паке. следующих за перво	ва спосооа преоставления источников олинных волн, которые льно накладываться друг на друга: 1) - эллиптический источ- из обратной экспоненты, модулированный N-ым количеством т синусоидальных волн, заданный количеством полупериодов, й - фронтовой полуволной.
	Period <u>12'24"00</u>	Период волны измеренный на глубине моря соответствую- щей максимальной амплитуде, по заданному направлению.
	Amplitude <u>0.00</u> m	Экстремальное значение амплитуоы оооавочной волны.
	Direction $-45.0^{\circ}$	паправление оля прогрессивнои волны, по этому же направ- лению измеряется период волны.
	Latitude <u>53°04'9</u>	Географические координаты
	Longitude <u>151°10'4</u>	
	Sizes <u>200</u> , <u>800</u> km	Размеры источника (первой полуволны) в километрах;
	Place <u>24.0</u> 36. Pts	Местоположение источника в номерах сеточных ячеек;
	Slope for <u>1</u> wave	Крутизна волны – количество периодов косинуса, модулиру-
		Number of 1 wave – количество полупериодов, которые
	Elliptic source	составляют пакет синусоидальных волн. - переключатель между эллиптическим очагом и пакетом синусоидальных волн (Sine wave group).
	Static sea level	- переключатель статического подъема уровня моря и определения волны как прогрессивной (Progressive wave).
	Initial CountDown	- начало отсчета времени при задании прогрессивной волны (по аналогии с <b>F3Time</b> ).

<b>F4</b> Locate Периника ника исти цуна		Переключение режи ника с помощью виз источника на геогра <u>ц</u> унами включается	ма заполнения меню на метод установки источ- зуального позиционирования и подбора размеров фической карте. Данный метод установки очага при условии, если амплитуда отлична от нуля.			
¢	♥ < Enter > Переключение реж сируется период в			жимов - когда при перемещении источника фик- волны во времени или пространственная длина.		
	$\langle \mathbf{Y}   \mathbf{y} \rangle$	X x>	Увеличение / умен по протяженност	ньшение размеров источника по длине волны (Y) и пи ее фронта (X).		
	< <b>R</b>	r >	Вращение источн	ика по / против часовой стрелки.		
	<b>F1</b> <i>In</i>	form	Включение / откл раметрами источ	пючение информационного окна с текущими па- нника:		
Ŕ	> Dept	th 2		Глубина моря.		
	Per	iod	<b>54'14</b> " to <b>-94</b> °	Период волны и направление ее перемещения.		
	Geo	<b>52</b> °	46'55", 159 <i>°</i> 17'19"	Координаты центра источника.		
	Size	es (	527.6 x 1060.0 km	Длина волны и протяженность ее фронта.		
	Pla	ce	<b>44.0, 78.0</b> cells	Номер ячейки к которой привязан источник.		
	<b>F1</b> <i>In</i>	form	; F5 Add; F6 New; F	7 Seismic; F8 Mario; F10 Clear		
F	5 Add		Добавление нового	источника к существующему полю;		
F	6 New		Установка нового	источника с очисткой расчетной области;		
F	7 Seism	ic	Запрос магнитуды	землетрясения, для расчета параметров очага им А А Поплавского (см. том 2):		
F	3 Mario	,	Обрашение к проиє	али поставоново (станов 2), радуре расстановки постов наблюдения (= <b>F2</b> ):		
F'	10 <i>Clea</i>	r	Очистка (обнулени	е) всей расчетной области:		
<	Escape	' >	Простой выход из.	меню.		
F	1 Help;	<b>F2</b> Se	ervice; F3 Time; F4 Loco	tte; F5 Add; F6 New; F7 Seismic; F8 Mario; F9 Start		
F5 M	leteo	Зад Это ист	ание параметров и эт же метод будет гочник или волнообра	траектории движения атмосферного циклона. правильно описывать подвижный сейсмический изования от СВП на мелководье.		
^t ♦ <b>F</b>	1 Infor	m E	Зызов информационн	юго окна с параметрами атмосферного циклона:		
$\swarrow$	Geo 4	45 <i>°</i> 1	7'18",140 <i>°</i> 11'30"  ^K	оординаты центра циклона;		
	Dept	h[ <b>1</b>	<b>8, 9</b> ] = <b>850</b> m H	омера ячеек сетки и глубина моря;		
	Diame	eter	: <b>1162.2</b> km Д	иаметр циклона до выравнивания давления;		
	Pres	sure	≥ 120 water 'mm   П	ерепад давления в центре циклона;		
	Wind	Spe	ed <b>30.0</b> m/s M	lаксимальная скорость ветра;		
<	Enter >	> _	Вызов меню для усто	ановки параметров атмосферного циклона.		
Ŕ	^t ♦ Ratio time of start <u>1</u> <i>d</i> <u>2°30′</u>			Время от начала расчетов, в днях и часах, на которое задаются параметры ииклона:		
	Geo <u>53°04′9</u> , <u>151°10′4</u>			Географические координаты центра циклона;		
Cyclone diameter <u>1169</u> km			diameter <u>1169</u> km	Диаметр циклона [км];		
	Cyclone pressure $\underline{12} w' cm$			Перепад давление в см. водного столба (≈мб)		
Maxima wind speed <u>20.0</u> m/s			<i>i</i> nd speed <u>20.0</u> m/s	Максимальная скорость ветра на 1/3 радиуса		
Surface stress factor $.0020 \approx$			ress factor <u>.0020</u> ≈	Коэффициент поверхностного напряжения		

<space></space>	, Пробел - поиск ближайшей из уже установленных контрольных то- чек прохождения циклона. В случае успеха, изображение циклона про- изводится утолщенной линией, это означает, что произошел захват существующей контрольной точки циклона и последующие команды изменяют параметры циклона в этой точке.				
Shift + Ñòðåëêè	Перемещение "захваченного" циклона. Если стрелки используются без Shift, то режим захвата отменяется.				
<ins th=""  de<=""><th><i>l</i>&gt; Создание или удаление контрольной точки, через которую проходит траектория циклона, вдоль которой все параметры циклона плавно изменяются с помощью сплайновой интерполяции.</th></ins>	<i>l</i> > Создание или удаление контрольной точки, через которую проходит траектория циклона, вдоль которой все параметры циклона плавно изменяются с помощью сплайновой интерполяции.				
<+ ->	Переход от одной контрольной точки к другой, в соответствии со списком, который упорядочен во времени.				
< <b>S</b>   <b>s</b> >	> Увеличение уменьшение размеров циклона				
<0,1 29	0 и 1 сбрасывают шаг перемещения курсора в единицу, другие цифры являются множителями для текущего шага.				
< Escape	Окончание операций связанных с подготовкой траектории и пара- метров атмосферного циклона.				
F1 Inform	n; F2 Service; F3 Time; F4 Source; F9 Start				
F6 Edit	Обращение к программе редактирования или считывания новой бати- метрии. Здесь - после выбора новой расчетной сетки, производится ав- томатическая переинтерполяция всех расчетных полей и пересчет ха- рактеристик постов наблюдения. (F4 Chart - описана выше, на главном уровне).				
F7 Seismic	Обращение к процедуре ведения базы данных сейсмических событий и цунами ( <b>F7</b> Seismic - описана ниже, на главном уровне).				
F8 Mario	бращение к процедуре расстановки постов наблюдения ( <b>F2 Mario</b> - исана выше, на главном уровне). К данной процедуре можно также ратится для перерисовки батиметрической карты.				
F9 Start	Запуск вычислительного процесса. Если такой запуск производится в первый раз, то на экране появляется запрос на имя результирующего мариографного файла, дату и время начала события, дискретность записи данных о наблюдении за уровнем моря, а также делаются запросы о времени начала генерации приливных волн.				
^t <u>D:\Path</u>	а\ <b>FileName</b> Имя мореографного файла *)				
Event is	$3 1996 01 04 01°24′30″ \Delta = 6′ Время начала и шаг записи **)e of Tide : 03°10′ < 18°58′ Два вступления прилива ***)$				
<ul> <li>*) Общее имя для двух файлов, в которые будут записываться мореографн данные (FileName.mar) и протоколы вычислительных операц (FileName.mif). Информации записанной в протоколе достаточно для вторения всего вычислительного эксперимента;</li> <li>**) Указание даты и времени начала вычислительного эксперимента, а так определение шага во времени для записи мореографных рядов;</li> <li>***) Указание времени нуля прилива, до и после начала вычислительного проц са. Эти времена предлагается взять за начало расчетов, так как генерац</li> </ul>					

	npi cue	приливной волны может быть начата только в указанные временные от-						
	cm	ве начального для расчетов, а в окошечках появляются два новых отсче-						
	та	для нуля прилива.						
	F9 Allow	Разрешение записи протокола и мореографных данных с указанными параметрами.						
	F10 Puto	ff Разрешение начала вычислений, но безо всяких протоколов и морео- графных данных.						
<i>Escape&gt;</i> Отказ от начала вычислени ки вычислительного экспери		> Отказ от начала вычислений и возврат в главную процедуру настрой- ки вычислительного эксперимента.						
<	Escape>	Выход из вычислительного эксперимента заблокирован от случайностей вопросом "? Are You Sure" (Вы уверены?), на который можно дать подтверждение: Yes.						

## 7. Доступ к исторической информации о землетрясениях и цунами

Процедура прорисовки сейсмологических событий и цунами на батиметрической карте, изображенной на экране ЭВМ. (Аналогичная программа включена в комплекс World, в котором географическая карта строится автоматически, в соответствии с границами местоположения очагов землетрясения)

После считывания каталога (**F2** *Read*), процедура "Seismic" переходит в режим просмотра сейсмических событий, перебор которых осуществляется с помощью стрелок на клавиатуре. Описание события выводится в нижней части экрана, над строкой подсказки, а источник землетрясения изображается специальным знаком на карте.

Ниже описывается формат записи текстовой строки каталога, в каждой из которых определяется одно событие. Каждая строка разбирается как последовательный поток числовых данных, разделенных пробелами.

YYYY	MM	DD	hh	mm	ss.s	$\pm$ <b>FF.ff</b>	$\pm$ LLL.11	DDD	<u>M.s</u>	<u>II.i</u>	HHH.hh
1952	11	4	16	58	21.6	52.75	159.50	30	8.5	4.0	20.00
1953	3	17	13	4	42.0	50.00	156.40	70	6.2	1.0	3.00
1964	3	28	3	36	13.9	61.05	-147.48	23	8.5	4.0	51.80
1964	6	16	4	1	39.9	38.35	139.18	40	7.5	2.0	6.40
1965	2	4	5	1	21.8	51.30	178.60	36	8.2	2.5	10.00
1982	3	21	2	32	5.9	42.15	142.55	43	7.2	0.0	1.30
1983	5	26	2	59	57.5	40.36	139.08	20	7.8	2.0	18.00
1983	6	21	6	25	25.0	41.26	139.00	6	6.9	0.0	1.00
Π	Г					M	1				

Дата и Гринвичское время, 🤄 географические координаты,

७ глубина очага и
 ७ магнитуда землетрясения,
 ७ интенсивность и
 ७ амплитуда
 цунами.



<33> 1983-May-26 02°59' Depth=20, Ms=7.8 I=2.0, Am=18.0
{33} F1 Info F2 Save F3 Open F4 Select F5 Draw F6 Sort F7 List <Ins>Item

Рис. А.5. На рисунке изображены лучи и фронты от гипотетического источника цунами на Средних Курилах, показан сам источник и на суммарное изображение наложены исторические очаги землетрясений и цунами. Курсор остановлен на событии 26 мая 1983 года. Слева от рисунка показана легенда, характеризующая сейсмические события и интенсивность вызванных цунами.

## F6 Seismic

**F1** Inform Включение / выключение легенды, в которой показываются характеристики сейсмических событий и интенсивности цунами:

- **Depth** { 0-33-80-150-300 и более км } глубина очага землетрясения, выделяется штриховкой внутренней области знака источника;
- *Ms* { 8-7.5-7-6.5 и менее } магнитуда землетрясения, различается размером знака источника;
- Its {>3-2-2-1-0.5-0 и менее } интенсивность проявления цунами на побережье, по С.Л.Соловьеву. Определяется цветом и "звездностью" изображения источника, для оценки магнитуды диаметр знака необходимо оценивать, примерно, по серединам лепестков
  - < 0 серый круг
  - 0.5 голубой без ярко выраженных лепестков
  - 0.5-1 зеленый, где лепестки ≈ радиусу внутренней полости
    - **1-2** желтый, с длиной лепестков ≈ внутреннему диаметру
  - 2-3 ярко фиолетовый, с лепестками длиннее радиуса полости
  - > 3- красный цвет с хорошо выраженными длинными лепестками

F2 Save	Сохранение текущей выборки в новом файле (базе данных).
	Запись данных производится после указания имени файла и
	нажатия клавиши < Enter >.

**F3** *Read* Подключение нового каталога исторических данных.

При входе в программу Seismic делается попытка автоматического открытия файла с именем ANI.lts, и считывание каталога с выборкой данных для региона соответствующего изображению на экране. Только при считывании нового файла информационные таблицы заполняются экстремальными значениями, поэтому, если в процессе выборки данных необходимо определить эти границы, то необходимо просто перечитать файл.

При работе с данными в оперативной памяти компьютера не бывает более двух строк из каталога, но при этом в памяти хранится массив адресов, который используется для быстрого поиска записей, определяющих текущую выборку.

F4 Select		Вызов меню для запол	лнения таблички с граничными значениями выборки	
	Curr	ent Boundaries	Текущие границы выборки	
	<u> 1640 07 31</u> <u>1984 12 28</u>		Задание периода выборки во времени;	
	Depth	<u>0</u> <u>357</u> km	Интервал глубин очагов землетрясений;	
	Ms	0.0 8.5	Интервал магнитуд землетрясений;	
	lt <u>–</u>	<u>100</u> <u>4.0</u>	Экстремальные значения интенсивности цунами	
<i>Enter</i> > Подтверждение правильнос. ется формирование новых с вания всего файла историчес.			правильности установок, после которого начина- иние новых оперативных таблиц путем перечиты- па исторических событий.	
	< Escape	e> Отмена всех ист	правлений, сделанных в меню определения выборки.	
F	<b>F5 Draw</b> Прорисовка всех сейсмических событий на текущей географической карте, изображенной на экране ЭВМ. Необходимо учитывать, что события прорисованные по этой команде уже не стираются, поэтому для прорисовки другой выборки, необходимо предварительно стереть, затем обновить изображение географической карты.			
<b>F6</b> Sort Сортировка всех т это просто алфава торая соответств события.		Сортировка всех п это просто алфав торая соответсти события.	пекущих событий. В данной реализации программы, итная сортировка текстовых строк каталога, ко- вует сортировке по возрастанию даты и времени	

## **F7** *List* Просмотр исторических данных в виде текстового списка событий.

Событие выделяемое в списке, одновременно визуализуется на географической карте. Быстрый поиск события можно осуществить, если набирать на клавиатуре его дату, так как в этом случае подвижная метка будет стремиться к строке с такими же цифрами.

Ниже приводится образец оперативного списка, где отсутствующие величины отмечены звездочками.

Year.mm.dd	Time	Depth	Ms	Its	Amp	
1088.06.10	*	33	7.0	*		
1341.10.31	*	33	7.0	*		
1640.07.31	*	33	6.5	*		
1677.04.13	*	33	8.0	2.0	6.0	<= подвижная метка
1694.06.19	*	33	7.0	*		
1737.10.17	15h30m	40	8.3	4.0	50.0	
1737.12.17	*	50	7.5	*		
1741.08.28	*	33	6.9	2.5	90.0	
1763.01.29	*	33	8.0	2.0	5.0	
1						

< Insert >

Закрепление на экране значка для текущего - выбранного события;

< Escape > Выход из программы, по которому не уничтожается среда описания каталога. Это означает, что при входе в программу, даже из какойлибо другой процедуры, сразу же становится доступной прежняя выборка из каталога.

## *Приложение Б.* МАRIO - утилита ведения временных рядов в океанологии

### Блок схема основных команд управления программой



F4 Format F5 Shift



Разработка программы **МАRIO** вызвана необходимостью обработки большого количества мореографных данных, получаемых как результаты проводимых в лаборатории цунами ИМГиГ вычислительных экспериментов. Затем блок задач расширялся, в частности, были реализованы задачи позволяющие систематизировать наблюдения за приливами и работать с каталогами их гармонических постоянных. Надеюсь, что в ближайшем будущем мы планируем разработать сценарий гармонического анализа длинных приливных рядов.



Рис. Б.1. Образец графического представления временных рядов с записями цунами в октябре 1994 года.

В настоящее время программа используется в качестве системы управления базой данных для наблюдений за уровнем моря. В ее форматах накоплено большое количество записей цунами, приливных рядов и гармонических постоянных. Высокая разрешающая способность временной шкалы допускает хранение, визуализацию и обработку также и сейсмических данных.

По мере возникновения необходимости в программу MARIO были включены специализированные методы обработки временных рядов. В настоящее время, кроме простых операций с рядами, как сложение, перемножение и логарифмирование, встроены также несколько фильтров, функции пересчета волны цунами с морских точек на береговой откос и на показания мареографа, и другие.

Специально для Морского отдела Сахалинского УГМС, в программу МАВІО был встроен большой блок для работы с годовыми приливными рядами, который предназначен для обработки данных в том виде, в котором они обычно подготавливаются в этой службе. При этом приливные ряды могут быть конвертированы в формат MARIO как из текстовых форматов, принятых в Сахалинском УГМС, так и из "Обнинских" форматов, в которых в УГМС имеются большие исторические архивы.



ных рядов. В нижней части рисунка показаны списки, которые необходимо заполнять при задании приливных гармонических постоянных

*а)* Географическая карта с отрезками прилив- *б)* Критическая высота цунами в защищаемых пунктах. Специализированный формат представления суточного приливного ряда, который используется оперативными дежурными Сахалинского Центра Цунами.

Рис. Б.2. Визуализация приливного режима в пунктах, по которым Сахалинский Центр Цунами подает тревогу цунами.

Блок процедур для анализа приливного режима был подготовлен для использования в оперативный службе Сахалинского Центра Цунами. На рисунке 2*a* показаны текстовые таблицы, появляющиеся при формировании архивов приливных гармонических постоянных.

С помощью программы МАRIO планировалось автоматизировать обработку мореографных записей, получаемых на действующих постах Сахалинского УГМС. Были созданы дополнительные процедуры для конвертирования данных из стандартных форматов УГМС в формат программы МАRIO, которые включали в себя средства для поиска и исправления ошибок. Разработана также процедура для обработки оцифрованных мореограмм. К сожалению, когда эти работы были доведены до первого этапа опытной эксплуатации, они были временно приостановлены.

Также как и процедуры для выполнения океанологических вычислительных экспериментов (ANI), программа Mario предлагается для свободного использования при выполнении любых исследовательских или оперативных работ. Авторы будут благодарны за любые предложения по включению в программу MARIO новых алгоритмов для обработки мореографных рядов, или о методах совершенствования этой программы.

1. Система команд

```
<<Mariograms Treatment>>
    List of Records
R/W < Mario > special format
I/O for other data files
XYZ <Ani><Grid><Mesosaur>
 F
    Three - function group
   Tidal sea oscillation
 т
   visible configurations
 S
   initial present series
 E
 С
   exact copy this series
   move down, marker off
 Μ
 D
    deleting market series
<Enter> series editor
<Up-Down-Ins> mark series
<Home-End-Del> boundary
<Left-Right>
             bound shift
<PgUp-PgDn> window shift
<0 |1>
        Series | Screen step
<2:9>
           Step multiplier
   Use 6 + 1524k memory
```

Список команд основного режима программы *Mario* 

Список рядов без выборки в их память Ввод/Вывод в собственном формате Импорт/Экспорт других числовых рядов Запись в формате Ani, Grid è Mesosaur

Три комплекса преобразующих функций Приливы и гармонические постоянные Настройка изображения на мониторе Редактирование характеристик ряда Копирование одного, указанного ряда Перенос за курсор со снятием отметок Удаление отмеченных записей

Процедура редактирования по точкам Выбор и отметка рядов на мониторе Выбор подвижной временной отметки Перемещение выбранной отметки Синхронное перемещение отметок Шаг маркера по ряду и пикселю экрана Умножитель шага маркера

Информация об использовании памяти

 F1 Help F2 ReDraw F3 ReView F4 Refer

 \$\$ Настройка экрана на текущий ряд

 \$\$ Вмещение всех рядов в одно изображение

 \$\$ Изображение только внутри отмеченной области

В основном режиме работы на графическом экране монитора изображаются временные ряды, при этом экран разделяется на горизонтальные полосы, где каждая полоса содержит только один ряд. Все ряды имеют одинаковый вертикальный и горизонтальный масштаб.

Подписи на графическом поле ориентированы на описание изменяющихся во времени числовых рядов, измеренных на постах наблюдения с заданными географическими координатами. Ось времени размечается с использованием Юлианского календаря [Numerical Recipes in C, 1972], что фактически снимает ограничения на использование любых исторических дат, минимальный же шаг во времени может измеряться сотыми долями секунды. В нижнем левом углу экрана помещается окно с описанием поста наблюдения. Оно включает в себя название поста, его географические координаты, дату и время начала регистрации, дискретность во времени и количество числовых отсчетов. Слева от основного информационного окна располагается строка с указанием интервала времени между подвижными маркерами или значением функции на одном из подвижных маркеров.

$19^{4}23'32'' = 1.23$	Сангарский пролив 41°15′ 139°52′
	$1983$ -May-26 $13^{4}20' + 1080 \cdot 1'30''$
🏷 Отсчет времени и значение	🧠 Шаг
в точке под подвижным маркерс	ом 🗞 Длина ряда
	🏷 Дата и время начала ряда

Стрелочки *«Up>«Down»* (вверх/вниз) могут быть использованы для выбора конкретного ряда в качестве текущего, к которому будут применятся операции другие команды, связанные с его обработкой или визуализацией. Выбранный ряд помечается за левой рамкой, с помощью длинной подвижной стрелки. Команда *«Insert»* делает отметку рядов, к которым могут применяться групповые операции.

<Left><Right> (влево/вправо) перемещают правый и левый подвижные маркеры, соответственно, при этом, в нижнем информационном окне показывается отсчет времени для левого маркера и дистанция до правого маркера. Если используется команда <*Home>*, то стрелками будет перемещаться только левый маркер, после команды <*End>* будет перемещаться только правый маркер, при этом выбранный маркер подсвечивается более ярким цветом, а в информационном окне показывается значение функции. Команды <*PageUp>*, <*PageDown>* перемещают оба маркера влево и вправо, соответственно. Команда <*Del>*, также как и <*PageUp>*, <*PageDown>* отменяют режим позиционирования выбранной границы, после чего стрелки <*Left>*<*Right>* снова сближают левый и правый маркеры.

F1 *Help* - краткая инструкция по основным командам управления.

**F2** *Redraw* - перерисовывает текущее изображение на экране так, чтобы подвижные маркеры стали границами графического поля.

**F3** *Review* - по этой команде ищется минимальное и максимальное время для всех рядов, находящихся в оперативной памяти программы, эти времена назначаются границами изображения, что означает визуализацию на экране сразу всех данных.

**F4** *Refer* - границы графического поля подстраиваются под изображение ряда, на который указывает курсор.

## 2. Параметры числового ряда: < E > edit

После импорта числового ряда в оперативную память программы, необходимо задать его временные и географические характеристики. Это можно сделать по команде < **E** > из основного режима MARIO, после же импорта числового ряда, команда < **E** > активизируется автоматически.

## Initial series

"Name for s	series"
Date <u>1</u>	<u>983:05:26</u>
Latitude	<u>41°15'0</u>
Longitude	<u>139°51'7</u>
Begin <u>1</u>	4 [¥] 00'00"0
Step	0'30"0
Format:	Integer

Заголовок или наименование данного ряда. Дата начала проведения измерения. Географическая широта. и долгота для поста наблюдения. Время регистрации первого отсчета ряда. Дискретность данного числового ряда. Формат представления данных в файле (в базе данных).

*Minima < S.Len < Extreme* 

Экстремумы и длина числового ряда.

Необходимо скорректировать указанные значения и закрепить изменения нажатием *«Enter»*, новые значения закрепляются также при переходе к смежным окошкам меню. Возврат к основному режиму MARIO осуществляется по команде *«Escape»*, после которой, при необходимости, можно выдать команду для перерисовки графиков на экране монитора.

Строка "Format:" задает метод сохранения числовых рядов в базе данных файла *~Mario.mar*>, и может определяться значениями: *Float, Integer* или *Signed Byte*.

Формат *Float* означает, что в файле будет сохранятся точный образ данных из оперативной памяти. В этом случае каждый отсчет ряда будет занимать 4 байта. Основным недостатком такой записи является двоичное представление мантиссы плавающего числа, которое более походит на случайный шум и имеет следствием очень плохую компрессию, при последующем архивировании таких данных.

Форматы *Integer* и *Signed Byte* имеют длины 2 и 1 байт на один отсчет, а по способу записи представляют собой функцию с дискретным дроблением, при этом экстремумы функции задаются заранее. Соответственно точность записи для *Integer* будет составлять одну *65-ти*-тысячную от области существования функции, и 255 дискретов для формата *Signed Byte*, соответственно.

## 3. Настройка изображения: < S > Screen

Данная процедура позволяет установить требуемые параметры изображения, а также трансформировать характеристики всех рядов в соответствии с текущими настройками изображения.

Visualization Parameters	
Beginning <b>1993:8:01 3⁴44'6"</b>	Начало
Duration <u>31</u> days <u>5[¶]43'21"</u>	и длительность изображения
Interpolation Step <u>1⁴01"</u>	Шаг дискретизации изображения
Interpolation Power <u>1</u>	Применяемая степень интерполяции
Dimensions for Time & Function	Управление форматом изображения
Remove axis? <b>NO NO</b>	Снятие всей разметки
Grid lines? YES YES	Сетка в поле графика
On per-unit? NO NO	Сетка в относительных единицах
Axis Legend? YES YES	Подписи осей
Captions? YES NO	Надписи с названиями

#### F4 Format F5 Shift

Команда <**F4** *Format*> переинтерполирует все ряды находящиеся в оперативной памяти, с целью построения новых рядов с характеристиками соответствующими указанным в меню параметрам изображения. При этом невидимые заграничные участки рядов отсекаются, а недостающие участки в видимой части графика дополняются значениями среднего арифметического.

Команда <**F5** *Shift>* производит сдвиг аргумента всех оперативных рядов таком образом, что в точке пересечения рядов с левой границей изображения будут установлены Время и Дата указанные в данной таблице-меню.

#### 4. Редактирование ряда: <Enter>

Если дается команда *<Enter>*, то программа Mario вызывает процедуру обработки одного ряда, которая предназначена для корректировки значений ряда в отдельных точках, для поиска сбоев и их полуавтоматической корректировки.

В нижней части экрана появляется изображение отрезка ряда, центральная отметка для которого соответствует желтому крестику на основном графическом поле. Если используются стрелки на клавиатуре  $<\!Left><\!Right>$ , происходит движение крестика на основном изображении, при этом в дополнительном окне сдвигается изображение отрезка ряда. Стрелки  $<\!Up\!><\!Down>$  выполняют такое же, но ускоренное перемещение. **F1** *Inform* - вызывает окно с краткой подсказкой, где в двух нижних строках задается пороговая разность между смежными точками, которая используется при поиске сбоев и степень интерполяции, которая будет использована при автоматической корректировке единичных выбросов.

Series Editor	
< <b>PgU/PgD</b> > Select	Переход к другому ряду;
<i>&lt; Enter &gt;</i> Correct value	Корректировка текущей точки ряда;
< BkSp > Interpolation	Замена на интерполированную по смежным точкам;
<i>&lt; Space</i> > Find threshold	Поиск интервала с превышением порогового значения;
< <i>0,1</i> \2 <i>9</i> > Marker step	Множитель ускоряющий движение маркера;
0.200 threshold	Пороговое значение используемое при поиске сбоев;
<u>3</u> image degree	Степень интерполяции при замене сбойных точек.

В режиме редактирования ряда, в нижней части экрана появляются два дополнительных окна, в одном из которых показывается отрезок ряда, который перемещается относительно неподвижного маркера, в другом - номер точки, значение функции и шаг движения маркера.

$ \left  \right  $	$\searrow$	<b>F</b> = <u>0.1234</u>	<i>Курильск</i> 45°06' 147°36'
$\mathbf{V}$	$\mathbb{W}$	$123\pm1$	1983- <i>May</i> -26 13 ⁴ 20' +1440·1'

🕏 Отметка текущего значения 🖉

🗞 Этикетка временного ряда

Масштабирование ряда в маленьком окне производится в соответствии с экстремумами функции, умещающейся в окне, а по длине устанавливается одна точка на "пиксель" экрана. Это позволяет показать характер изменения функции, оценить ее гладкость и сделать соответствующие ручные или интерполяционные корректировки.

В верхней строке среднего текстового окна показывается значение функции, в нижней - номер точки от начала ряда и шаг, с которым ряд перемещается с помощью стрелок.

По команде *«Пробел»* запускается алгоритм поиска превышения порогового значения, которое задано в поле "*threshold*" из меню *«F1 Inform»*, при этом в качестве направления поиска используется последнее перемещение ряда с помощью стрелок. Процесс поиска может быть остановлен нажатием произвольной клавиши на клавиатуре. Для выбора места такой остановки можно ориентироваться на желтый крестик, который движется по обрабатываемому ряду.

По команде *<Enter>* делается предложение на корректировку текущего значения функции, что отмечается угловым курсором в смежном текстовом окне. Подтверждение корректировки также делается командой *<Enter>*. Команда *<BkSpace>* предназначена для автоматической замены текущего значения функции, для чего используются ближайшие смежные точки, к которым применяется интерполяционный полином, степень которого задается в строке "*image degree*" из меню <**F1** *Inform*>.

Команды *<PgUp>*, *<PgDown>* производят циклическое переключение рядов, на верхний и нижний, в соответствии с их изображением на основном графическом поле, при этом делается попытка сохранения текущего времени под курсором.

## 5. Три комплекса математических преобразований: < F >

Команда < Function > вызывает одну из трех процедур, выбор которых осуществляется в зависимости от количества и местоположения отметок, установленных с помощью команды < Insert >.

Данный комплекс арифметических операций применяется к группе отмеченных рядов, и вызывается по команде < Function >, когда подвижная отметка текущего ряда

Операции с группой отмеченных рядов совпадает с отметкой выделения ряда, выполненной по команде </nsert>.

Simple operations F + 0.000 - F F * 1.000 / F F-Mid F-F(o)Log Exp Log10 Exp10

Добавление константы или вычитание ряда из числа Умножение на константу, деление числа на значения ряда Вычитание среднего арифметического или первого числа Логарифмирование ряда и возвращение к исходному виду То же, но для десятичного основания

Для выполнения математических операций необходимо заполнить поля с константами, если это необходимо, затем подвести подвижное окно к полю, содержащему требуемую операцию, и дать команду *«Enter»*. Выполнение операции не сопровождается дополнительными запросами, а после ее завершения производится полная перерисовка всего графического поля.

Если значения ряда имеют разные знаки (функция пересекает нулевую ось), то операции деления и логарифмирования блокируются.

Данный комплекс операций применяется к группе отмеченных рядов, и вызывается по команде < Function >, когда подвижная отметка указывает на неотмеченный ряд, при этом на экране присутствуют один или несколько рядов, отмеченных с помощью

Арифметические действия между одним выбранным, и группой отмеченных рядов команды *<Insert>*. Пока, это только арифметические операции, в которых группа отмеченных рядов преобразуется с помощью одного из неотмеченных рядов.

## Block operations

```
F + Block - F
```

```
F * Block / F
```

Добавление к рядам в отмеченном блоке, вычитание из них Произведение с другими рядами, или их деление

В указанных арифметических операциях, текущий ряд интерполируется под значения аргумента в каждом из отмеченных рядов, соответственно характеристики аргумента преобразуемых рядов *(их начало, дискретность и длина ряда)* не изменяются.

Данный комплекс преобразующих процедур готовился для использования в повседневной практике лаборатории цунами ИМГиГ. Он содержит небольшой список формализованных операций, которые не изменяют характеристики аргумента ряда.

Математические операции с одним числовым рядом Список может быть легко расширен, если для кого либо из пользователей программы это необходимо, и он готов представить соответствующие уравнения и подготовить сценарий запросов для задания параметров преобразования.

# Series transformation

Two point move 0< <u>0.96</u> <1

Kaiser-Bessel <u>24</u> points

Двухточечный сдвиговый фильтр, не сохраняющий фазы гармонических колебаний.

*Треугольный, прямоугольный и Кайзера-Бесселя симметричные фильтры, с окном, заданным по количеству точек.* 

**Kaistrenko** <u>60</u> *m* to <u>12</u> *km* Пересчет амплитуды набегающей на берег волны.

Здесь реализованы также алгоритмы, в которых используются соотношения Грина 2, 3 и 4-ой степени, с возможностью указания глубины в морской и близбереговой точках и расстояния между ними. Интегральный метод Кайстренко ( изложенный в главе 2.4), учитывает частотные свойства временного ряда и пересчитывает амплитуду волны на кромку берега с нулевой глубиной.

Tide Gauge to Ocean Level

Учет гидродинамических свойств мареографа, которые оказывают влияние на высокочастотные составляющие колебаний уровня моря.

Первое поле переключает режимы пересчета: *море* → *мареограф*; *мареограф* → *море*, второе - вызывает меню окончательной подготовки исходных данных по мареографу и выполнения расчетов:

Tide Well Diameter	<u><b>1.00</b></u> m	Диаметр колодца (вертикальной трубы) мареографа
Intake Pipe Diameter	<u><b>0.10</b></u> m	Диаметр трубы, соединяющей колодец с морем
Intake Pipe Length	<u><b>2.00</b></u> m	Длина этой подводящей трубы
Intake Pipe Number	<u>1</u> .	Количество труб

После заполнения меню с характеристиками мореографа, необходимо подтвердить начало вычислений с помощью команды *<Enter>*.

Tie the Record 36 / 256

Восстановление (слияние разрывов) ряда из двоичных целых с пониженной разрядностью

Процедура восстановления ряда, который был записан регистратором с ограниченной разрядной сеткой. При восстановлении ряда необходимо несколько раз применять данную операцию, последовательно увеличивая пороговое значение (здесь, это поле с числом 36). Второе поле, с числом 256, задает ширину полосы цифровой записи.

## **F1** New **F2** Both series

Когда подвижное поле перемещается по окнам меню, то в строке подсказок дается краткое описание применяемого метода или ожидаемые параметры преобразования. Когда же преобразование выполнено, то в подсказке появляется предложение к использованию двух команд: **<F1** *New>* - означает выход из меню только с новым рядом; **<F2** *Both series>* - обеспечивает сохранение старого ряда и добавление нового - преобразованного. Если выход из меню произведен по команде *<Escape>*, то преобразованные ряды теряются, но на экране сохраняется наложенное изображение результатов этих преобразований, что может быть использовано для подготовки соответствующих рисунков.

## 6. Ввод / Вывод инородных данных: <I > input; <O > output

Универсальная процедура ввода/вывода последовательных потоков данных вызывается из основного режима управления программой Mario по команде <I>*input*, или <O>*output*. Эта процедура входит в описание программного объекта *Series*, который также используется в некоторых других программах для считывания и записи числовых данных.

При активизации этой процедуры, в нижней части экрана появляется информационное окно следующей формы:



## <S.Len> F1 Example F2 I/O F9 Clear

В первой строке меню показывается заголовок для числового ряда, который может быть считан из первой строки текстового входного файла или набран в данной строке окна. Во второй строке указывается имя файла или путь для его поиска. При нажатии *Enter>* будет осуществлена проверка наличия данного файла, и при его отсутствии, будет предложен список файлов по указанному пути.

В третьей строке предлагается заполнить пять полей настройки режима ввода/вывода и задания параметров числового ряда:

Режим ввода / вывода

/	Read	режим чтения данных;	
	Write	режим записи в новый файл;	
	Add	добавление данных в конец файла;	
	Update	расстановка чисел ряда в существующем файле.	

Тип данных

	Float	двоичный файл с числами в плавающем формате;		
	Integer	// в формате целых чисел;		
	Byte	// байтовых чисел (+255-256);		
✓	Text	текстовый файл содержащий числовой поток, где в первой стро		
		допускается запись комментария.		

Смешение до первого числа в массиве

Шаг или периодичность считывания (выборки) чисел из файла (из памяти)



Количество чисел участвующих в операции ввода / вывода

plus <u>0</u> Если 0, то операции в/в относятся ко всему ряду.

Если числовой ряд находится в оперативной памяти, то появляется правое графическое окно, в котором воспроизводится начальный участок ряда по правилу - один отсчет числового ряда на один пиксель экрана.

Команда <**F9**> (на функциональной клавиатуре) удаляет ряд из оперативной памяти и стирает правое графическое окно.

Команда <**F2**> начинает процесс ввода/вывода. Если во второй строке меню не будет указано имя файла, то произойдет предварительное обращение к процедуре интерактивного поиска файла.
Команда <F1> вызывает процедуру формирования тестового числового ряда, которая предлагает заполнить таблицу следующей формы:



При вводе новые данные всегда складываются с уже существующими, при необходимости увеличивая длину исходного ряда в соответствии с S. Len.

### 7. Форматы данных: $\langle \mathbf{R} \rangle$ Read; $\langle \mathbf{W} \rangle$ Write Собственные форматы данных программы MARIO

Данные программы MARIO формируются в одном из двух форматов:

- формат единовременных измерений по всем мариографным постам наблюдения. (в этом случае общее количество данных вычисляется исходя из полной длины файла);
- формат последовательной записи рядов, при такой записи каждый ряд может иметь произвольную длину и собственный формат представления данных.

Первый формат записи данных {ⁿ} определяется общим 8-ми байтовым заголовком, содержащим идентификатор файла и количество включенных в него рядов, далее следует соответствующее количество 40-байтовых описателей для конкретных рядов, и лишь затем следуют блоки числовых данных для каждого момента времени.

#### Marioⁿ

```
// идентификатор первого формата файла данных
                               // количество рядов в данном файле
int
      Nm
{
                               <sup>//</sup> собственная текстовая запись о данном ряде
             Ident[20]
  { char
                               // географические координаты пункта наблюдения
     float Lon,Lat
                               // год,
            Year
     int
            Day,Mon
                               // день и месяц для начала наблюдения
     byte
                               // минута-час и сотые-секунда для первой точки
            mn, hr, hn, sc
     bvte
                               // дискретизация записи в минутах.
     float dt
  } { . . . } . . .
}
                               <sup>//</sup> блоки по Nm чисел на данный момент времени,
{ float S[Nm] }
                               // количество же этих блоков определяется длиной
   . . . .
                               <sup>//</sup> всего файла данных.
```

Данный метод записи числовых рядов наиболее удобен при проведении единовременной "регистрации" данных в точках разнесенных по пространству, когда информация поступает блоками, сформированными путем мгновенного опроса нескольких точек наблюдения. Несмотря на то, что форматом предусматривается достаточная полнота описания временных характеристик рядов, обычно же программой МАRIO используется запись данных в этом формате, только для идентичных во времени числовых рядов. Последнее необходимо также и для программы спектрального анализа SPECRM, которая (к тому же) считывает только первую информационную запись и применяет ее ко всем остальным рядам.

{⁰} Второй формат файла данных имеет 26-ти байтовый общий заголовок, в котором определяются параметры изображения данных на мониторе. Далее следуют независимые и полные описания конкретных временных рядов, каждое из которых начинается с собственного 42-байтового заголовка:

Mario ⁰	// идентификатор второго формата файла данных				
long <b>Jd</b>	// Юлианская дата и				
float <b>Tm</b>	^{//} время начала изображения (час)				
float <b>dT</b>	^{//} общий шаг дискретизации (час)				
float <b>Tn</b>	^{//} длительность изображаемого процесса (час)				
byte <b>Pw</b>	// степень интерполяции при сглаживании изображения				
byte	^{//} резерв для задания метода интерполяции				
int <b>Vv</b>	^{//} битовая маска описания метода изображения				
{    int <b>S.N</b>	// длина текущего ряда				
char <b>Ident</b> [20]	// текстовый идентификатор записи				
float Lon,Lat	географические координаты пункта наблюдения				
long <b>Jday</b>	// Юлианская дата и				
float <b>To</b>	^{//} время начала конкретной мареографной записи				
float <b>dt</b>	^{//} интервал дискретизации в часах				
byte Fmt	// формат записи: 1 byte; 2 int; иначе float				
byte <b>Typ</b>	🕖 идентификатор типа записи временного ряда				
}	<pre>// 1 Series; 2 Curve; 3 Tide;</pre>				

# **Vv** – Битовая маска метода визуализации, предназначена для сохранения последней настройки изображения:

ХО – горизонтальная и

```
ОХ – вертикальная шкала
```

```
8 – 1 – полное гашение разметки данной оси;
```

```
4 – 1 – прорисовка сетки на главных отметках оси;
```

- 2 0 абсолютное или 1 относительное масштабирование;
- 1 1 означает снятие соответствующих числовых надписей;
- 100 1 снимает основную подпись времени;
- 200 1 принудительная надпись названия на оси ряда.

**Typ.1** (**S**)

Запись типа *Series* предполагает числовой поток с фиксированной дискретностью. При выборке ряда в оперативную память он всегда преобразуется к 4-х байтовому формату *Float*, что ограничивает максимальную длину ряда (16384-1) числами. Соответственно, если **Fmt** есть *Float*, то в файле сохраняется образ данных в оперативной памяти, иначе, в начале ряда записываются два дополнительных числа в плавающем формате:

float Min - минимальное значение для данного ряда;

float **Apl** - коэффициент перевода числа к формату float,

далее следует поток чисел в формате *int* или *byte* соответственно.

При записи данных коэффициент **Ар1** вычисляется с использованием максимального размаха функции:

Apl = (Max-Min) / 254, если Fmt = 1 (byte);
Apl = (Max-Min) / 65534, если Fmt = 2 (integer).
При восстановлении данных из файла: S[i] = Min + Apl · s[i]

**Typ.3**(**T**)

Специальный формат для хранения приливных рядов, которые могут содержать пропуски и имеют целочисленный формат с сантиметровой размерностью. Числовой ряд предваряется 4-мя целочисленными параметрами:

int	Min	- Минимум ряда;
int	Mid	- Средний многолетний уровень моря;
int	[2]	- резерв из 2-х слов.

Далее следует поток данных в соответствии с форматом **Fmt**, который может принимать только два значения:

Fmt = 1 (byte); Fmt = 2 (integer).

При записи данных, тип формата Fmt определяется автоматически.

При восстановлении данных из файла, они приводятся к размерности 1 метр:

S[i] = (Min + s[i]) / 100.0

Пропуски данных отмечаются в файле как 0xFF (или 0xFFFF), при считывании же в оперативную память MARIO эти данные заменяются на (Min-1)/100 = Min-0.01. При операциях же с приливными рядами, пропуски заменяются на Mid - среднее многолетнее значение уровня моря.

#### 8. Структура базы данных для приливных гармоник

Файл приливных гармонических постоянных представляет собой набор записей для обеспечения информации о приливах в конкретных пунктах наблюдения, и для использования ее в оперативной службе предупреждения о цунами.

Общий заголовок файла данных имеет длину 16 байт и содержит информацию о географическом регионе данного блока приливных гармоник, далее следует 48 байтовая запись с информацией о конкретном пункте наблюдения и следом соответствующее число гармонических постоянных. Количество приливных постов наблюдения определяется полной длиной файла данных:

•Tide° // идентификатор приливной базы данных					
int <b>TZ</b>	nt <b>TZ</b> // восточный часовой пояс ( час*10)				
int <b>Jf,Jl</b>	// левый нижний угол географической карты (град*10)				
int <b>Lf,Ll</b>	// <i>размер этой оперативной карты приливов</i> (град*10)				
<pre>{     int L     char Name     long Day     float Fi,:     float Co     float Ch     float Cs     int W</pre>	<ul> <li>// количество гармонических постоянных</li> <li>20]</li> <li>// название пункта наблюдения</li> <li>// Юлианская дата связанная расчетом прилива</li> <li>географические координаты в градусах</li> <li>средний многолетний уровень поста наблюдения</li> <li>критическая высота подъема уровня моря (ст)</li> <li>обобщенный коэффициент усиления волны цунами</li> <li>слово признаков для использования данной записи</li> </ul>				
++					
float $\mathbf{C}[2]$	т номера гармонических постоянных L+1] // собственно массив приливных гармоник.				
	// где: С[0] – устаревшее место для Со; // С[i*2] – амплитуда в сантиметрах; // С[i*2+1] – смещение фазы в градусах.				

}

Если не задана дата **Day**, то во всех расчетах принимается текущая компьютерная дата и время. Номера гармоник выставлены в соответствии с программой LSM *А.Б. Рабиновича*, в настоящее время таких гармоник 67. Если в номере гармоники установлен старший бит (*0x80*), то данная гармоника не включается в расчеты прилива.

В слове признаков W пока задействован только один бит - *8000h*, который отменяет изображение данного пункта на географической карте и в однодневных графиках приливов.

# *Приложение В.* Справочные материалы о тревогах проведенных Сахалинским Центром Цунами в 1986-1995 годах

#### 1. Список землетрясений с магнитудой 7.0 и более по Курило-Камчатской впадине, Японскому и Охотскому морям за период 1986-1995 гг, информация о которых поступала в Центр Цунами из различных источников

16	п		Время		Время		Могнитило	Коорд эпин	цинаты ентра	
Nº N	Дата	Источник информации	201170	ах) Поотт	тат нитуда		· 1			
JNO	ия (сах.вр)	(российские и зарубежные сейсми-	трясе	пление	М	φ	λ	H		
			ния	в Ц/Ц		(сев.)	(BOCT.)	(km)		
	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	21.05.86	С/ст. "Южно-Сахалинск"	1750	1759	7.1	42.3	150.3			
		С/ст. "Южно-Сахалинск" испр.	1748	1800						
		С/ст. "Курильск"	1747	1824	7.2					
		С/ст. "Северо-Курильск"	1749	1840	7.0	42.3	150.0			
		Гонолулу	1747	1848	6.4	43.6	148.3			
2	14.01.87	С/ст. "Южно-Сахалинск"	2204	2215	7.3	42.0	144.0			
		Токио	2204	2243	6.9	42.6	142.8	80		
		Гонолулу	2204	2249	MS=5.8	42.4	143.1			
		Гонолулу <i>испр</i> .	2204	2259	MS=5.8	42.3	143.7			
		С/ст. "Курильск"	2205	2250	7.6	44.8	143.0			
		С/ст. "Шикотан"	2204	2333	7.0					
		"Петропавловск-Камчатский"	2204	2348	6.3	42.3	144.0			
		Обнинск	2204	2350	6.5	42.7	143.5	120		
		АЦПЦ (Аляска)	2203	0025	MB=6.5			100		
				15.1.87	MS=5.9					
3	07.07.88	С/ст. "Южно-Сахалинск"	0355	0409	7.8	40.2	146.0			
		Токио	0356	0430	MS=6.4	41.6	144.5			
		Гонолулу	0354	0444	MS=6.2	41.2	144.8			
		Токио	0356	0430	6.4	41.6	144.5	60		
		С/ст. "Южно-Сахалинск" испр.	0356	0503	6.7					
		С/ст. "Южно-Сахалинск" испр.	0356	0504		41.3	144.5			
		АЦПЦ (Аляска)	0354	0512	MS=6.0	42.2	141.8			
		Гонолулу	0354	0606	6.1	41.6	144.2	52		
		АЦПЦ (Аляска)	0354	0611	MB=5.7					
		Обнинск	0354	0618	6.6	41.7	145.3			
4	02.11.89	С/ст. "Южно-Сахалинск"	0527		7.2	41.7	144.3			
		Нет входящих, исхо	дящих (	докумен	тов по дан	ному зе	емлетряс	ению		
5	22.12.91	С/ст. "Южно-Сахалинск"	1844	1850	7.0	расст.	720 км			
		С/ст. "Курильск"	1846	1857	7.5	43.0	150.8			
		Токио	1846	1909	6.9	44.6	152.0	10		
		С/ст. "Шикотан"	1843	1929	7.1	45.0	152.0			
		Гонолулу	1843	1942	7.5	45.0	152.0			
		Гонолулу испр.	1843	2010	7.5	44.9	151.6			
		Обнинск	1843	2308	7.3	45.7	151.2			
6	15.01.93	С/ст. "Южно-Сахалинск"	2207	2213	7.5					

	2	3	4	5	6	7	8	9
		С/ст. "Южно-Сахалинск" испр.	2207	2228	7.0	43.5	145.0	
		Токио	2208	2231	6.7	42.8	144.4	120
		С/ст. "Курильск"	2206	2307	7.5			
		Гонолулу	2206	2313	7.2	43.0	144.0	
		С/ст. "Шикотан"	2206	2336	7.5	42.5	145.0	
7	09.06.93	С/ст. "Северо-Курильск"	0103	0124	6.7			
		С/ст. "Южно-Сахалинск"	0106	0125	7.1	53.6	160.0	
		С/ст."Южно-Сахалинск" испр.	0106	0246	7.3	51.5	161.0	
	13.07.93	С/ст. "Южно-Сахалинск"	0119	0137	8.3	38.8	139.5	
		Токио	0118	0152	7.8	42.8	139.4	50
		Гонолулу	0117	0239	7.7	42.8	139.1	
		Обнинск	0117	0511	8.0	41.8	139.5	
9	13.11.93	С/ст. "Южно-Сахалинск"	1220	1230	7.2	49.5	159.3	
		С/ст."Южно-Сахалинск" испр.	1220	1254	6.9	52.2	159.7	
		"Петропавловск-Камчатский"	1220	1253	6.8	51.4	159.3	
		С/ст. "Северо-Курильск"	1218	1316		51.1	158.0	
		Обнинск	1218	1624	7.0	51.6	159.7	
10	08.04.94	С/ст. "Южно-Сахалинск"	1312	1329	7.0	40.0	145.0	
		Токио	1312	1338	6.6	40.6	143.9	0
		С/ст."Южно-Сахалинск" испр.	1312			40.4	144.8	
11	29.08.94	С/ст. "Южно-Сахалинск"	0639	0645	7.1	44.2	150.2	
		С/ст."Южно-Сахалинск" испр.	0639	0730		44.3	150.5	
12	05.10.94	С/ст. "Южно-Сахалинск"	0024	0056	7.7	43.0	148.0	
		Токио	0025	0121	7.9	43.4	147.9	20
		Обнинск	0023	0612	8.0	43.7	147.6	
13	05.10.94	С/ст. "Южно-Сахалинск"	0226	0233	7.2	43.0	148.0	
14	05.10.94	С/ст. "Южно-Сахалинск"	0302	0313	7.0	43.0	148.0	
		С/ст. "Южно-Сахалинск" испр.	0302	0342	6.8	44.9	148.2	
15	09.10.94	С/ст. "Южно-Сахалинск"	1856	1908	7.7	43.5	148.0	
		Токио	1858	1939	7.3	43.6	147.7	
16	28.12.94	С/ст. "Южно-Сахалинск".	2321	2338	7.5	41.5	144.3	
		Токио	2321	2346	7.5	40.4	143.7	0
		С/ст. "Южно-Сахалинск" испр.	2321	0003	7.5	39.7	144.7	
		"Tome and a second the man arrow?"	2210	29.12.94	7.2	415	1446	
		петропавловск-камчатскии	2318	29.12.94	1.5	41.5	144.0	
17	07.01.95	С/ст. "Южно-Сахалинск"	0939	0948	7.0	39.8	143.7	
		Токио	0939	1008	6.9	40.3	142.4	30
		"Петропавловск-Камчатский"	0937	1035	7.0	38.9	143.6	
		Обнинск	0938	1245	7.2	40.3	142.5	
18	18.04.95	С/ст. "Южно-Сахалинск"	1130	1143	7.0	46.4	149.7	
		С/ст. "Южно-Сахалинск" испр.	1130	1158	7.2	46.3	152.2	
19	28.05.95	С/ст. "Южно-Сахалинск"	0105	0123	7.5	38.7	142.8	
		С/ст. "Южно-Сахалинск" испр.	0105	0143		55.0	142.5	
		С/ст."Южно-Сахалинск" испр.	0105	1027	6.8			33

## 2. Хронометраж действий дежурных смен центра цунами при некоторых тревогах цунами за период 1986-1995 г.

- 1148 С/ст. "Южно-Сахалинск": тревога цунами в Северо-Курильском районе. Землетрясение 1052 Сах. М=8.0 53 С 171 3
- 1149- Заполнены бланки тревоги цунами Сев-Кур.р-не
- 1150- Сев-Кур.:8 мая землет-е 1051сах, M=7.6 51С 1703 1126 сах установлены наблюдения за уровнем моря.

08.05.86, C/cm.	1150- С/ст. "Курильск" землет-е 1052 сах, расстояние 3360км 49С 1673 М=7.8
Южно-	1153- Палмер: повтор. тревога цунами. Исправленная М=7.7
Сахалинск	1154- Палмер: дано время подхода цунами

1213- Гонолулу: Бюллетень землетрясения 2247Z 7 мая М=7.7 51.3 С 175.3 3 около о. Адах. Возникла волна цунами, которая может повлечь за собой ущерб на побережье и о-вах Тихого океана.Сведения о высотах волн: о.Адак-70см

- 1220- т.Желтов УВД-дана консультация о цунами
- 1229- Петропавловск-Камчатский:08 1147камч. Землетрясение М=7.7 50 С 171.3 3 ГМС привлечены наблюдениям.
- 1230- Передано сообщение об объявлении тревоги цунами на побережье Курил зарубежным службам
- 1230- Передано сообщение из Гонолулу о повышении уровня у о.Адак.
- 1230- Южно-Курильск: уровень 0427мск без изменений
- 1237- Оперативный деж. в/ч11902 т.Дорохов:текст тревоги по тел.3-54-78
- 1238- ГМС Уруп: 0535мск море без изменений
- 1244- Палмер: повтор тревоги цунами.Высота волн на о.Адак 175см. Есть предварительное сообщение о незначительных разрушениях на о.Адак.
- 1244- Токио: Мацуширо P=225412Z 51.3 С 175 3 Тревога цунами по Охотоморскому и Тихоок. побережью Хоккайдо, сев-вост. и центральным районам о.Хонсю.
- 1245- т.Дорохов по передаче тревоги цунами.
- 1247- т.Шакиров, ГО согласование попытки передачи тревоги в Сев.-Курильск через П/Кам.
- 1305- Деж. Кулаев (Госкомгидромет) о цунами.
- 1305- Обнинск: сводка землетрясения 8 мая 0247мск 50.5 С 174 З Алеутские о-ва М=7.8 I=9-10 б.
- 1310- Переданы данные о цунами на о.Адак в Госкомгидромет.
- 1315- ГМС Шумшу: 1240 море без изменений, ГМС Уруп: 1300 море без изменений.
- 1315- Передано в Госкомгидромет об объявлении тревоги Японией.
- 1320- Выяснилось, что нет связи с Северо-Курильском.
- 1321- Палмер: повтор данных о зем-и 2247Z и тревоги цунами. Высота волн о.Адак 150см.
- 1327- Гонолулу: Максимальная высота волны на о. Адак 175см, на о.Шемья волны не отмечены
- 1353- Петропавловск-Камчатский:1445камч.изменений уровня моря нет.
- 1355- Отправлено сообщение в Петроп-Камчатск. с просьбой передать тревогу в Сев-Курил
- 1403- ГМС Уруп, Симушир, Шумшу, м. Васильева: море без изменений.
- 1406- Палмер, повтор данных и тревоги на о. Адак продолжаются колебания с понижением амплитуды, о. Адак-110см, Санд-Пойнт-10см, Уналашка-25см.
- 1406- Разговор с т. Герашенко о цунами. Непроверенные сведения о колебаниях уровня моря в Северо-Курильске. г. Владивосток (Геращенко нач. ГМЦ КТОФ)
- 1408- Токио: землетрясение 072247Z (Алеутские о-ва),просьба информировать о цунами.
- 1413- Токио для Палмера: просим информировать о наблюдаемых цунами.
- 1413- ГМС Малокурильское: уровень без изменений. ГМС Матуа: 1236 подьем на 15см.
- 1415- Гонолулу: повтор данных по зем-ю 2247Z.Высота волны тах 175см-о.Адак, о.Уналашка до 30см.
- 1421- Разговор с т. Приходько об отбое тревоги на ЮК
- 1423- Южно-Курильск: 1401 уровень без изменений
- 1427- Дано сообщение для Химича и Васильева о подъеме уровня на Матуа. (Росгидромет, ГМЦ СССР)
- 1427- Запрос в Сев-Кур, Шумшу, м. Васильева, Петропавловск-Камчатский. об изменении уровня.

- 1429- в/ч 11902 т. Дорохов запрос об изменении уровня (наш).
- 1441- Холмск: цунами получена 0351мск.
- Южно-Курильск: цунами получена 0351мск, передана штаб цунами 0352мск-Крабозаводское 0352мск-Малокурильское. 1441
- 1450- ГМС Шумшу, м. Васильева, Уруп, Симушир: уровень без изменения.
- 1451- Курильск с/ст: землетрясение 1316сах расстояние 2980км 51С 1733 M=5.9
- 1459- Палмер: повтор данных, текст тревоги. Данные о высотах волн о.Адак-70см(уменьш.), Уналаска-20см,Санд-Поинт<10см,Кадьяк,Севард-нет.
- 1459- Петр.-Камчат.: данным ГМС 1520камч изменений уровня нет.
- 1500- Сев-Кур.: колебаний уровня не отмечено.
- 1500- Отмена тревоги цунами.
- 1515- Сообщение для Химича, Васильева об изменениях уровня моря.
- 1519- Петр.-Камчат.: изменения уровня 1605 камч нет, наблюдения прекращены.
- 1521- Токио для Хабаровска: наблюдались ли изменения уровня около Петропавловск-Камчатского.
- 1524- ГМС Матуа, М-Кур, Уруп, Симушир, Шумшу: изменен. уровня нет. ГМС м. Васильева: колебания уровня определить трудно приход отдельных больших волн наблюдался.
- 1524- Холмск: цунами получена 0709мск.
- 1536- Ответ для Токио: измен. уровня у Петроп-Камчат. не было.
- 1543- Гонолулу: данные о зем-и 2247Z Высота волн:Макс. О.Адак-175см,Уналашка-30см, Санд-Пойнт-10см,о.Мидуэй макс.-67см.
- 1603- Петроп-Камч.: о.Беринга колебаний уровня не было.
- 1610- Отмена тревоги для зарубежных служб.
- 1620- Палмер: отмена тревоги для побережья Аляски.
- 0120- с/ст. "Южно-Сахалинск": Р 131930 Записывается сильное землетрясение.
- 0126- Передана в МО Р волна бл.18
- 0137- С/ст. "Южно-Сахалинск.": Схема 2 цунами ожидается только в Приморье и на побережье Татарского пролива. Землетрясение 0119сах М=8,3 коорд.38.8сев 139.5вост

13.07.93. C/cm. "Южно-Сахалинск"

0145- Гонконг: P 132315 z

0148- Передана тревога с расчетами времени добегания бл.2 0152 Токио: Мацуширо Р 131747г Предварительный эпицентр 42.8сев 139.4вост западнее о.Хоккайдо. Предварительная магн.7.8 Большое цунами ожидается в Японском море на побережье Японии. Далее будет сообщаться.

- 0200- Передана тревога в МО. (Бланк 19)
- 0208-0255-Распространение тревоги по телефонам(прил.бл. 6б).
- 0212- Токио: Волна цунами началась на Фукаура подъем уровня 25см в 1340 СГВ
- 0222- С/ст. "Южно-Сахалинск": исправленная Р 131828
- 0239- Гонолулу: Бюллетень цунами N1 выпущен 12 июля 1421СГВ.Цунами предупреждение и оповещение задействованы. Предупреждение по северо-западу Тихого океана для СССР Японии, Алеутских и Марианских о-в и о.Маркус. Для других районов это сообщение только для информации: землетрясение М=7.7 1317 сгв, коорд. 42.8сев 139.1вост Японское море. Далее идет перечень первого вступления для 21 пункта этого региона.
- 0335- Гонолулу: Бюллетень N2 12 июля 1503СГВ Цунами предупреждение и оповещ. отменяется
- 0338- Токио: Перечень наблюденных уровней по 7 приливн. станциям max Сайго 58см в 1527z min Тояма 14см в 1440z
- 0357- Гонолулу: Бюллетень №3 1531СГВ Отмена для всех районов за исключением побережья Японского моря.
- 0359- Рудная Приморского: 121417СГВ бухте Рудная наблюдалось прохождение волн цунами высотой 2.5м
- 0404-0433-Передано по телефонам прил.66 сообщение о Рудной Пристане.
- 0511- Обнинск: сводка о землетрясении. 12 июля О=17-17-07.1 мск координ. 41.78сев 139.45 вост район о-ва Хоккайдо М=8.0 І=9-10б объявлена тревога цунами в Приморье и западному побережью Сахалина.
- 0511- Запрос на ГМС Крильон и Монерон о колебаниях моря.
- 0518- Запрос на ГМС Холмск и Невельск о колебаниях уровня моря.
- 0533- Отбой тревоги цунами для ГО в Приморье и на побережье Татарского пролива.
- 0533- Невельск: Сведения о колебаниях моря сообщить не можем, отсутствует телеф. связь с наблюдателем морпоста.
- 0536- Отбой тревоги на ЦТ. (Бланк 4ЦТ)

- 0536- Отбой тревоги для ГМС. (Бланк 4)
- 0540- Отбой тревоги для зарубежных центров.
- 0530-0616-Отбой тревоги по телефонам. (Бланк 20)
- 0601- Владивосток: колебания уровня в бухте Саморова вода отходила от берега на 8м, б. Преображения подъем 132см.
- 0607- Углегорск: необычных колебаний уровня нет.
- 0636- Отмена наблюдений за уровнем моря. (Бланк 8)
- 0647- ГМС Монерон, Пильво: необычных колебаний уровня не отмечалось.
- 0701- Бланк N40.
- 0027- С/ст. "Южно-Сахалинск": Р 132427г.
- 0031- Бланк 18 в МО.
- 0032- С/ст. "Южно-Сахалинск": объявлена тревога цунами по Южно-Курильскому и Курильскому районам, без координат и магнитуды.
- 0037- ГМС Курильск: 050027сах зем-е 4б продолжительность 2мин.

0039- ГМС Сев-Кур.: 4 октября 0025сах землетрясение прод. 40сек ощущалось районе станции 3 балла.

"Южно-Сахалинск"

05.10.94, C/cm.

0040- ГМС Корсаков: 041325z землетрясение.

0054- Отправлен бл.1 без координат и магнитуды.

0056- С/ст. "Южно-Сахалинск": 5 октября в 0024сах землетрясение М=7.7 координаты 43.0сев 148.0вост ожидается цунами по Южно-Курильскому и Курильскому р-м.

- 0059- ГМС Корсаков:041350 зем-е окончилось.
- 0103- Отправлен бл.1 со всеми данными.
- 0110- Отправлен бл.19 в МО.
- 0121- ЯМА Токио: Мацуширо Р 132523z приблизительный эпицентр 43.4сев 147.9вост к востоку о. Хоккайдо. Глубина 20км М=7.9 Цунами ожидается на тихоокеанское побережье о.Хоккайдо.
- 0128- Гонконг: Р 132948z.
- 0106-0139-Передана тревога по телефонам.
- 0146- Проинформирован о зем-и штаб ВВС "Запал".
- 0149- Отключили гор. сеть на С/ст. "Южно-Сахалинск".
- 0150- По телеф. звонку из Хабаровска из "Метеосталь" проинформирован Бурлаков.
- 0151- Отключили гор.сеть в Центре Цунами.
- 0152- Включился дизель.
- 0212- По сообщению деж. оператора СРП в Крабозаводской и Малокурильской бухтах подъем уровня до 1м, подтоплений нет, но сильные разрушения от подземных толчков.
- 0214- Из ЦТ по телефону: в Курильске колебания почвы успокаиваются. С Южно-Курильском связи нет.
- 0228- Майор Горин из в/ч 2067:на Горячем Пляже о.Кунашир сильные разрушения, есть жертвы.
- 0233- С/ст. "Южно-Сахалинск": Р 152540z В 0226сах регистрируется сильное зем-е М=7.2 коорд.43.0с.ш 148.0в.д.
- 0235- Отправлен бл.18 в МО.
- 0242- ЯМА́ Токио: дается тах высота волн цунами по 7 приливным станциям. Из них тах Ханасаки 346см в 1404z, min Уракава 30см в 1433z.
- 0256- С/ст. "Южно-Сахалинск": исправление Р 153428z, район тот же.
- 0300- ЯМА Токио: первое вступление волн цунами: Ханасаки в 1358z рост 173см Кусиро в 1402z рост 60см Уракава в 1420z рост 15см Хашинохе в 1432z рост 65см Мияко в 1415z рост 72см.
- 0301- Росгимет, ААМУ, Рыжкову: данные сообщены по междугороднему телефону.
- 0313- С/ст. "Южно-Сахалинск":5 октября в 0302сах регистрируется зем-е M=7.0 координаты те же.
- 0315- По нашему запросу по телефону на СРП получена информация: бухты Малокурильская и Крабозаводская подъем воды около 1м,разрушения есть, в Ю-Курильске высота волны 2-3м,выбросы на берег, связи с берегом нет.
- 0320- По нашему запросу связист в/ч2067 никакой информации не может получать.
- 0321- По нашему запросу деж. УВД сообщил о больших разрушениях и новых толчках в Ю-Курильске, население ушло в сопки.
- 0342- С/ст. "Южно-Сахалинск": поправка М=6.8 коорд.44.9сев 148.2вост.
- 0343- По нашему запросу деж. телефонистка Ю-Курильска сообщила, что тревога не объявлена т.к. нет связи в районе, обстановка ужасная, падают трубы, разрушились дома.
- 0351- ЯМА Токио: тах высота волны цунами наблюдалась: Ханасаки 346см в 1404г.

- 0400- Доложена обстановка по Южным Курилам губернатору области Красноярову.
- 0437- Информация по нашему запросу от деж. в/ч2067:в Ю-Курильске с 0035 по 0040сах землетрясение силой 7.5-9 баллов, значительные разрушения, толчки до 3 баллов постоянно.
- 0438- Дежурная телефонистка Южно-Курильска не смогла связаться с аэрологической станцией в Южно-Курильске.
- 0441- Запрос на ГМС Южно-Курильск и Малокурильское о данных по землетрясению.
- 0500- Звонок на ЦТ: связи с Южно-Курильском по прежнему нет.
- 0515- Получены 4 сообщения из Симушира, Малокур, и Матуа о последствиях зем-я.
- 0541- С/ст. "Южно-Сахалинск":0530сах регистрируется зем-е М=5.7, район тот же.
- 0544- Дана информация для МЕТЕО ПВО.
- 0551- Включилась городская сеть энергоснабжения.
- 0612- Обнинск: донесение N186 по зем-ю. О-16-22-65.7мск коорд.43.68сев 147.63вост. районе Курильских о-в М=8.0 I=9-10 баллов
- 0631- С/ст. "Южно-Сахалинск": 5 окт. 0617сах зем-е, М 5.9 корд. 43.4 сев. 146.2 вост.
- 0646- По нашему звонку от мера Ю-Кур.: разрушены пирсы, выброшены кунгасы и суда на берег, улица 3 сентября затоплена водой, консервный завод затоплен на 0.5м, механический цех на 0.7м.
- 0704- С/ст. "Южно-Сахалинск": регистрируется сильное зем-е Р 200218z.
- 0708- Отправлен бл.18 в МО.
- 0712- С/ст. "Южно-Сахалинск": 5 октября 0702сах зем-е M=5.7 коор.43.3сев.147.1вост.
- 0712- Петропавловск-Камч: тревога цунами по побережью Камчатки не объявлена.
- 0725- Информация от начальника УГМС Петрика: в пос.Горячие Ключи о.Итуруп большие разрушения, есть жертвы, в пос. Буревестник выведена из строя взлетная полоса.В Ю-Кур.и Кур.р-х выведены из строя системы жизнеобеспечения: связь, эл. энергия, тепло, водоснабжение.
- 0812- ЯМА Токио: отбой тревоги цунами в 2055г.
- 0816- Гонконг: подтверждение отбоя для Токио.
- 0822- Отправлен бланк.№40 с полной информацией.
- 0845- Отбой тревоги на с/ст и ГО.
- 0846- Отбой тревоги на ЦТ.
- 0848- Отбой тревоги бланк.№4
- 0854- Бланк №20 в МО.
- 1858- с/ст. "Южно-Сахалинск": Р 075652z
- 1900- Бланк №18 в МО.
- 1908- с/ст. "Южно-Сахалинск": объявляется тревога по Ю-Курильскому и Курильскому р-м зем-е 1856сах М=7.7 коорд. 43.5сев 148.0вост.
- 1907- Южно-Курильск: 1858сах зем-е ббаллов продолжит.20сек сдвигается мебель, 09.10.94. С/ст. Падает посуда.

	•,	$\mathbf{C}$	
"Ю.	ж	но	)_
Caxa)	าน	нс	:к"

- 1911- ГО: сообщил, что нет связи с Ю-Курильском.
- 1912- Вызван в ЦЦ "Дублер".
- " 1914- Бланк №1. 1919- Бланк №19.

1919-1935-Оповещение по телефонам.

- 1931- Тел. звонок на ЦТ начальнику смены. Ю-Курильск не подтвердил получение цунами.
- 1934- Тел. звонок от деж. капитана СРП Чирляева. Нами дана просьба передать тревогу цунами черезих суда, находящ.в р-не южных Курил.
- 1939- ЯМА Токио: объявлена тревога цунами на Тихоок. побережье сев.-вост. Хонсю, зем-е 43.6сев. 147.7вост. М=7.3
- 1940- Заказ через 07 междугородн. тел. на Ю-Курильск.
- 1950- Тел. разговор с деж. телефонисткой Ю-Курильска. Сообщила, что тревога цунами передана в Ю-Курильск.
- 1951- Тел.звонок на ЦТ.Старшая смены подтвердила прием тревоги цунам всеми адресатами
- 1953- Сев-Кур.: Цунами получили 1925сах.
- 2000- ГО:тревога передана по всем адресам ЦТ и ТЛФ.
- 2002- Звонок деж. капитана СРП Чирляева:тревогу по флоту пока никому не передал (никого не может вызвать).
- 2013- ЯМА Токио: Ханасаки цунами 0845г падение 23см.
- 2013- Разговор с зам. мера Ю-Ќурил. р-на Овчинниковым: зем-е 5-ббаллов, через 12 минут объявили тревогу сами. Темно, неизвестно, есть ли цунами.
- 2014- С/ст. "Южно-Сахалинск": зем-е 1950сах М=5.9 расстояние 590км.

- 2023- Малокурильск:(принято с АСПД по переговорному устройству)зем-е 5б 20сек, толчки 1-46 постоянно. Наблюдение цунами невозможно ввиду отсутствия эл.питания.
- 2028- С/ст. "Южно-Сахалинск": зем-е 1908сах М=5.9 расстояние 570км, район тот же.
- 2048- ЯМА Токио: Максимальная высота волны :Ханасаки 18см в 0902z,Куширо 6см в 0934z.
- 2100- ЯМА Токио: отбой тревоги цунами 0955г.
- 2109- Дан отбой тревоги в ГО.
- 2109-2131-Отбой тревоги по телефонам.
- 2115- Бланк №4ЦТ.
- 2117- Бланк №.4.
- 2125- Бланк №20 в МО.
- 2153- Бланк №40.
- 0111- С/ст. "Южно-Сахалинск": Р 130517г "Южно-Сахалинск" 0113-Бланк №18 в МО
- 0113- ГМС Ныврово:27 мая 1304z зем-е силой 5б продолжалось 12 сек, разрушений нет.
- 0122- ГМС Тымовское: 271308z, землетрясение 5 баллов.
- 0123- С/ст. "Южно-Сахалинск": объявлена тревога цунами в Южно-Курильском райопосле в страние и оне, землетрясение 0105сах М=7.5, координаты. 38.7 сев 142.8

28.05.95, С/ст. "Южно-

0127- Отправлен бланк №1

*Сахалинск*" 0129- Гонконг: Р 131108z

— 0129- ГМС Тымовское: зем-е 4

0131- Отправлен бланк №19 в МО.

BOCT.

- 0135-0138-Распространение тревоги цунами по телефонам.
- 0136- Телеграмма с ЦТ цунами, цунами землетрясение 1310 сах. (???) М=7.5, коорд.38.7 сев 142.8 вост.
- 0142- ГМС Ноглики: 271306г, землетрясение 4 балла, продолжалось 10 сек.
- 0142- ГМС Вал: 271306z, землетрясение продолжалось 6 сек, ощущалось районе станции 4 балла.
- 0143- ГМС Ныш: 271305z, землетрясение продолжалось 30сек 4 балла.
- 0143- С/ст. "Южно-Сахалинск": отбой тревоги цунами в Южно-Курильском районе. Уточнения по землетрясению, координаты 55.0 сев. 142.5 вост.
- 0143- Отбой тревоги в ГО.
- 0147- Бланк №4ЦТ
- 0148- Бланк №4
- 0150- 0215-Отбой тревоги цунами в Южно-Курильском районе по телефонам.
- 0159- Бланк №19 в MO.
- 1357- ЯМА Токио:Мацуширо Р1549332 эпицентр координ.18.9сев 104.1зап.Центральная Америка, фок. глубина 30км, М=7,6 ожидается цунами на побережье Японии.
- 1404-1412-Консультации с с/ст и с ГО.
- 1429- Бл.9 в ГО: объявляется тревога цунами по всем Курилам.
  - 0 10 95 *Пант*р || 1442- Бл.33 объявление тревоги

## **10.10.95, Центр** 1444- Бл.1 цунами на ЦТ

*Цунами* 1550- Бл.19 в МО.

1452-1525-Распространение тревоги по телефонам.

- 1459- с/ст подтвердила координ. эпицентра зем-я через Москву:18.89сев 104.03зап, побережье Мексики-Халиско. М=7.5 9б в эпицентре.
- 1516- Хабаровск запросил подтверждение тревоги по всем Курилам.
- 1527- Подтверждение Хабаровску по телеф.о их запросе.
- 1544- Сев-Кур.: наблюдения за уровнем моря установлены в 1455сах.В 1535сах изменений моря нет.
- 1602- Сев-Кур: в 1600сах измен.уровня моря нет.
- 1630- Петропавловск-Камчатский: землетрясение 091548z, координаты16.00 сев 107.00 зап. М=7.5 Расположение эпицентра не представляет опасности в отношении появления цунами.
- 1632- Северо-Курильск: в 1630сах изменений уровня моря нет.
- 1639- Телефонограмма от пограничников в/ч2067:по визуальным наблюдениям пограничников островов Симушир, Итуруп, Кунашир изменений уровня моря не наблюдалось.
- 1707- Бл.10 в ГО: отбой тревоги цунами.
- 1709- Северо-Курильск: в 1700 сах, изменений моря нет.

- 1712- Бланк №.4ЦТ.
- 1715- Бланк №4.
- 1724- Сев-Кур: объявлением отбоя тревоги цунами наблюдения за уровнем моря прекращены.
- 1725- Бланк №20 в МО.
- 1738- Бланк №8,1 отмена наблюдения за уровнем моря.
- 1738-1743-Оповещение по телефонам об отбое тревоги цунами.
- 1805- ЯМА Токио: все отбои о зем-и в 1549z 09 окт.были выпущены для Японии в 1735сах.

#### 3. Анализ отдельных тревог цунами

Землетрясение произошло в 0105 сахалинского на крайней северной оконечности Сахалина (широта 54,5 севера долгота 142,5 востока магнитуда 7,5) ощущалось: в Охе и Москальво силой 6 баллов, в Ныврово и Тымовском - 5 баллов, в Ногликах, Вал и Ныш

Анализ действий дежурного океанолога при тревоге цунами 28.05.95

- 4 балла.

В 0123 сахалинского сейсмостанция ошибочно объявила тревогу цунами по Южно-Курильскому району, которая была отменена ими в 1043 после уточнения координат землетрясения.

Служебный магнитофон в ходе тревоги практически не работал (записана лишь отрывочная информация).

Информация об ощущаемости землетрясения из Ныврово и Тымовского поступила океанологу соответственно в 0113 и в 0122 сахалинского, т.е. до объявления сейсмологом тревоги цунами, по остальным ГМС несколько позднее. Однако время передачи этих двух телеграмм на Южно-Сахалинскую сейсмостанцию САСПД пока не установлено.

Океанолог оперативно отреагировал на тревогу: бланк 1 и 19 были отработаны им в течение 8 минут с момента получения сообщения от сейсмолога. Однако имели место и недоработки, основные из которых следующие:

- Необходимо было попытаться убедить сейсмолога не объявлять тревогу цунами по южным Курилам, руководствуясь информацией об ощущаемости землетрясения в Ныврово и Тымовском: при сильных землетрясениях на южных Курилах может "трясти" либо весь Сахалин, либо только южную часть, фактически землетрясение ощущалось только на северной половине острова, т.е. явно в виде отдельного очага. Кроме этого, вероятность того, что два сильных землетрясения произойдут в разных районах одновременно близка к нулю. т.е. в 01.05 было одно землетрясение на Сахалине, а не на Курилах.
- 2. Отмену ошибочно выпущенной тревоги должны были дать на ЦТ и ГО сами сейсмологи, но если по каким-то причинам за эту работу взялся дежурный океанолог, то необходимо было проделать ее безошибочно, в частности:
- 2.1. Для передачи отмены тревоги на ЦТ воспользоваться бланком 5ЦТ, а не 4ЦТ, сделав примерно такую приписку: "в связи с ошибочным определением положения эпицентра землетрясения".

- 2.2. Для передачи отмены по адресам Сахалинского УГМС воспользоваться бланком 5, а не 4.
- 2.3. Для передачи отмены зарубежным службам воспользоваться бланком 21, вместо 20.

Несмотря на в целом удовлетворительную оценку действий океанолога при тревоге 05.10.94 (особенно заслуживает одобрения инициативный выход на связь с ГО в 0045 сах), в его работе имели место и серьезные недостатки. Так, в течение первых 22

Более детальный анализ действий дежурного океанолога при тревоге цунами 05.10.94 минут (с момента получения вторичного сообщения с параметрами - в 0056), не считая упомянутого выше инициативного выхода на связь с ГО, действия океанолога не принесли полезных результатов, а в ряде случаев были и ошибочными. В том числе:

1. В бланке 33 не проставлено время землетрясения, бланк передан САСПД без указания времени передачи (проставлено от руки 0036), без подтверждения о времени приема (есть только фамилия принявшего). Телеграфистами САСПД передан бланк 33 на ЦТ лишь в 0049 (через 13 минут). Учитывая изложенное, не ясно, где произошла задержка в передаче сообщения: на САСПД или у океанолога. В конечно счете для ЦТ это предупреждение уже не имело никакого значения, так как ЦТ уже дважды (в 0034 и в 0040) от реагировал на сообщения сейсмолога и передал тревогу по схеме 1.

Фактически бланк 33 не должен был задействоваться вообще (необходимо было начинать с бланка 1 и без координат, далее бланк 19 без координат), а вопрос к сейсмологу в момент приема тревоги "передана нет тревога на ЦТ?" - был преждевременным: адрес ЦТ стоит по приоритетности у сейсмологов вторым после ГО. Однако анализ магнитофонной записи свидетельствует о том, что океанолог вынужден был его задействовать, так как при передаче тревоги сейсмолог сообщил об отсутствии телетайпной связи с ЦТ.

2. Бланк 1 (без параметров) был передан САСПД с большим опозданием (в 0054), а затем и отменен вообще, ввиду поступления второго сообщения с набором всех параметров землетрясения (в 0056).

Тревога цунами объявлялась Южно-Сахалинской сейсмостанцией в результате землетрясения в ближней зоне с параметрами: время - 0024 сахалинского, магнитуда - 7,7 координаты 43,0 севера 148,0 востока. Землетрясение ощущалось практически на

Краткие результаты анализа действий основных звеньев службы цунами при тревоге 5 октября 1994 года

всей территории области, максимальная интенсивность отмечалась в Южно-Курильском районе и составила 9-10 баллов, имели место многочисленные разрушения жилых и хозяйственных объектов, человеческие жертвы. Значительный материальный ущерб нанесло также и цунами: в Южно-Курильском районе разрушены причалы, выброшены на берег плавсредства, подтоплялись улицы города. Действия дежурной смены Южно-Сахалинской сейсмостанции

С учетом уточнения параметров случившегося землетрясения тревога передавалась дважды ГО и ОПЦ и трижды на ЦТ, в том числе:

- 1. В 0032 сах (через 6 минут после землетрясения) по прямому телефону оперативному дежурному штаба ГО и дежурному океанологу ОПЦ. Прослушиванием магнитофонной ленты установлено следующее: тревога в виде текста "Земля, Море объявляется тревога цунами по Южно-Курильскому и Курильскому районам" передана без подтверждения о ее приеме оперативным дежурным ГО (не затребована фамилия принявшего и время приема), не указывалась магнитуда землетрясения.
- в 0034 по прямому телефону дежурному телеграфисту Центрального телеграфа г. Южно-Сахалинска (ЦТ), указывалась магнитуда 7,5.
- 3. В 0040 по телетайпу дежурному телеграфисту ЦТ, информация та же, что и в п.2.
- 4. В 0056 по прямому телефону оперативному дежурному штаба ГО и дежурному океанологу ОПЦ, указывались все характеристики землетрясения (М - 7,7 координаты 43,0 севера 148,0 востока, время - 0024 сах). Передача осуществлена в соответствии с действующими правилами: затребованы фамилия и время принявших.
- 5. 0100 по телетайпу дежурному телеграфисту ЦТ, информация та же, что и в п.4.

В результате недоработки сейсмолога по пункту 1 не ясно получил или нет оперативный дежурный штаба ГО первое сообщение о тревоге в 0032 сахалинского (его голос на пленке не прослушивался).

Второй недостаток - скоротечность передачи тревоги (длилось всего 22 секунды, после чего сейсмолог прекратил связь), в ходе которой сейсмолог не отвечал на вопросы дежурного океанолога. Не было также предварительного сообщения о том, что регистрируется сильное землетрясение.

#### Действия дежурного штаба ГО

Оперативным дежурным тревога была объявлена по Курильскому району (с Южно-Курильском отсутствовала телеграфная связь) в 0050 сахалинского после того, как в 0045 дежурный океанолог ОПЦ вызвал его на связь и поинтересовался передана нет тревога на Курилы.

#### Действия дежурной смены центрального телеграфа

Тревога цунами передавалась по схеме 1 (кроме Южно-Курильского района) трижды: в 0038, 0042 и 0100 сахалинского, т.е. дежурная смена отреагировала на все три сообщения из Южно-Сахалинской сейсмостанции. В г. Южно-Курильск тревога была передана телеграфистами по телефону лишь в 0746 сахалинского. Это можно было сделать раньше, т.к. телефонный канал с областным центром существовал и дежурная телефонистка Южно-Курильского РУС была на рабочем месте. В Южно-Курильском районе тревога цунами объявлялась главой администрации района Покидиным Н.А. по фактическим событиям непосредственно после землетрясения.

#### Действия дежурного океанолога Центра Цунами

- В 0036 сахалинского не получив ответа от сейсмолога передана нет тревога на ЦТ, заполнил и передал САСПД бланк 33 (тревога для ЦТ по схеме 1). По действующим инструкциям он мог бы этого не делать, так как адрес ЦТ у сейсмологов по приоритетности стоит вторым после ГО.
- 2. В 0045 засомневавшись передана нет оперативным дежурным штаба ГО тревога на Курилы, позвонил туда и дал указания объявить тревогу по Южно-Курильскому Курильскому районам. Решение в сложившейся ситуации безусловно правильное.
- 3. В 0054 (через 22 минуты с момента получения первого сообщения от сейсмолога)
   передан САСПД бланк 1 без координат и магнитуды землетрясения.
- 4. В 0103 (через 7 минут после получения от сейсмолога параметров землетрясения)
  передан САСПД бланк 1 с параметрами: М-7.7, координаты 43,9 севера 148,0 востока и временем подхода цунами к населенным пунктам.
- 5. В 0110 передан САСПД бланк 19 (тревога для зарубежных центров).
- 6. В период 0106 0139 передана тревога по телефонам.

С момента получения от сейсмолога параметров землетрясения океанологом выполнены все действия в соответствии с регламентирующими документами за 14 минут, что соответствует оценке "Удовлетворительно", принятой при тренировочных занятиях с личным составом ОПЦ.

Из-за отсутствия связи с собственными гидрометстанциями из района бедствия ситуация на Курилах контролировать океанологом по информации стоявших на рейде судов Минрыбхоза (через радиостанцию Сахалинрыбпрома), пограничных застав на Шикотане, Кунашире и Итурупе (через штаб погранвойск в Южно-Сахалинске), непосредственно глав администраций Южно-Курильского и Курильского районов (телефонная междугородняя связь).

#### Действия наблюдательной сети

Первой из района бедствия сумела выйти на радиосвязь с САСПД Сахалинского УГМС гидрометстанция "Малокурильск" лишь в 0445, затем в 0508. Сообщалось об ощущаемости основного толчка (9-10 баллов) больших разрушениях в поселке и на самой станции, о невозможности поддерживать связь с управлением из-за поломки радиостанции и другого оборудования. Поступали также сообщения об ощущаемости землетрясения со станций Северо-Курильск - 3 балла, Курильск - 4 балла, матка - 3 балла, Симушир - 2 балла, Корсаков - факт землетрясения. Информации о цунами не было.

#### Об объявлении тревоги непосредственно в районах бедствия

сения составили:

В Южно-Курильском районе тревога цунами была объявлена главой администрации района Покидиным Н.А. непосредственно после землетрясения, в Курильском - в 0500 сработала система оповещения областного штаба ГО. По сообщениям глав администраций обоих районов жители населенных пунктов, не дожидаясь сигнала тревоги, сразу же после землетрясения покидали свои дома и уходили на возвышенные места.

8 августа в 2041 сах по данным Южно-Сахалинской сейсмостанции произошло землетрясение в районе Марианских островов с магнитудой 7,6 координаты 20.00 севера 143.00 востока. По определению других сейсмических станций параметры землетря-

Справка о землетрясении 8 августа 1993 года

Наименование станции	М	Широта севера	Долгота востока	Глубина очага
Курильск Петропавловск- Камчатский	7,3 7,7	5,0 8,7	143,0 147,2	-
Гонолулу Токио	8,0 8,0	13,8 13	144,8	-

В 2128 сах Гонолулу было выпущено предупреждение (а по нашим районам оповещение) о возможном цунами, которому в 0014 сах 9 августа был дан отбой (разрушительного цунами не зародилось, возможны лишь незначительные колебания уровня).

В 0049 сах поступила тревога цунами из Токио (ожидается цунами на тихоокеанском побережье Японии), а в 0052-0053 сах - сообщение о регистрации цунами высотой 58 см на станции Чичияма (по-видимому, о.Хонсю).

В 0211 и 0227 сах из Токио поступили соответственно первые вступления и максимальные высоты цунами по 21 приливной станции. Последние в подавляющем большинстве не превышали 50 см, а на станции Муротомисаки волна отмечалась высотой 98 см.

Из-за незначительной высоты цунами оповещение диспетчерских рыбокомбинатов на Южных Курилах не проводилось, наблюдения за уровнем моря также не устанавливались из-за невозможности обнаружить визуально в ночное время такие колебания. В 0328 сах за подписью Петрика Н.С. на АЭ Южно-Курильск направлен срочный запрос снять показания с мареографа. До настоящего времени ответа не поступало.

О факте землетрясения оповещены в 2156 сах Росгимет, ГМЦ и Обнинск (бланк 40), донесение об окончании явления надо направить с поступлением к нам мореографных данных по южным Курилам.

#### Список литературы

- Андерсен Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен, М., Мир, 1990 том 1 и 2, 726с.
- *Астарита Дж., Маруччи Дж.* -Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей, М., Мир, 1978. 309с.
- *Бабич В.М.* Принцип взаимности для динамических уравнений теории упругости. //Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн.- Л.: Изд.ЛГУ, 1962, т.VI. С.60.
- Баррон Д. Введение в языки программирования. М.: Мир, 1980. 190с.
- *Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М.* Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982. 370с.
- *Бернар Ле Меоте*, Введение в гидродинамику и теорию волн на воде, Л, Гидрометеоиздат, 1974, -368 с.
- *Бернштейн В.А.* Задача о заблаговременности тревог цунами от одной гидрофизической станции в полубесконечном бассейне с полосовым дном. Препринт, Южно-Сахалинск, 1992. 50 с.
- Бреховских Л.Н, Годин О.А. Акустика слоистых сред.- М.: Наука, 1989.- 416 с.
- Волны в пограничных областях океана. / *Ефимов В.В., Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Файн И.В.* - Л., Гидрометеоиздат, 1985. - 280 с.
- Вычислительный эксперимент в проблеме цунами / Шокин Ю.И., Чубаров Л.Б., Марчук Ан.Г., Симонов К.В. - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние. 1989. - 168 с.
- *В.К. Гусяков, Е.Ю. Венценосцева, Т.Е. Глускина* Развитие и современное состояние систем предупреждения о цунами на Тихом океане. Обнинск, 1988. -41с.
- *Дуванин А.И*, Волновые движения в море, Л., Гидрометеорологическое издательство, 1969. 223 с.
- Егоров Н.И, Физическая океанография, Л, Гидрометеоиздат, 1974, -456 с.
- Единая автоматизированная система наблюдения за возникновением и распространением цунами и предупреждения о них. Технико-экономическое обоснование (ТЭО-2). Госкомитет по гидрометеорологии и контролю окружающей среды. - М., 1987. - 106 с.
- Заякин Е.А., Набоких Л.С. Служба предупреждения о цунами на Камчатке. ВДНХ СССР, павильон гидрометеорологии. Серия: Передовой опыт работы сетевых организаций. М.: Гидрометеоиздат, 1988. 7 с.

Землетрясения в СССР в 1987 году. - М.: Наука, 1990. - 324 с.

- Кайстренко В.М, и др. (Отчет № 12/91) Создание обзорной схемы цунамирайонирования побережья Сахалинской области, Южно-Сахалинск, ИМГиГ ДВО РАН, 1992г. - 82с.
- Количественная оценка цунамиопасности и схемы цунамирайонирования Тихоокеанского побережья СССР./ **Ч.Н.** *Го, В.М. Кайстренко, Е.Н. Пелиновский, К.В. Симонов.* //Тихоокеанский ежегодник. - Владивосток, 1988. С. 9 - 16.
- *Лаврентьев М.А, Шабат Б.В.* Проблемы гидродинамики и их математические модели.- М.: Наука, 1973. 416 с.

- *Ландау Л.Д, Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. В 10 томах. Т. VI. Гидродинамика.-М.: Наука, 1986. - 736 с.
- *Марчук Ан.Г., Чубаров Л.Г., Шокин Ю.И.* Численное моделирование волн цунами. -Новосибирск, Наука, 1983. - 175с.
- *Никифоров И.В., Тихонов И.Н., Михайлова Т.Г*, Оперативная обработка Данных автоматизированной сейсмической станции, Теория и практика // Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. 175 с.

Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР.- М.: Наука, 1977-535 с.

- *Петрашень Г.И.* Основы математической теории распространения сейсмических волн.// Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн.- Л.: Изд.ЛГУ, 1978. т. XVIII, 298 с.
- Поплавская Л.Н. Параметры макросейсмического источника и интенсивность цунами на примере Курило-Камчатской эпицентральной зоны. // Параметры очагов цунамигенных землетрясений и особенности цунами. Владивосток, 1980. С. 53-56.
- Поплавский А.А., Куликов Е.А., Поплавская Л.Н. Методы и алгоритмы автоматизированного прогноза цунами. М.: Наука, 1988. 128 с.
- *Соловьев С.Л.* Повторяемость землетрясений и цунами в Тихом океана. // Волны цунами. Южно-Сахалинск, 1972. С.7-47. /Труды СахКНИИ; Вып 29/
- *Соловьев С.Л.* Проблема цунами и ее значение для Камчатки и Курильских островов.//Проблема цунами. М.: Наука, 1968. с. 7-50.
- Таблицы приливов 1960 год. Азиатское побережье СССР и прилегающие иностранные акватории, Л., Гидрометеоиздат, 1960 г.
- *Тихонов И.Н.* Алгоритм выделения S-волны и идентификации поверхностных волн на записи регионального землетрясения. // Препринт ИМГиГ ДВО РАН, Южно-Сахалинск, 1994, 49 с.
- Тюрин А.М. Теоретическая акустика. Л.: Военно-морская академия, 1971.-444 с.
- Урик Р.Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 446 с.
- Фелсен Л, Маркувиц Н. Излучение и рассеяние волн. В 2 томах. Т.1. М.: Мир,1978. 486 с.
- *Храмушин В.Н.* Использование особенностей цифровой ЭВМ при для постановки вычислительного эксперимента в гидромеханике // Актуальные вопросы геологии геофизики и биологии (материалы XVI конференции молодых ученых ИМГиГ), Южно-Сахалинск, ДВО АН СССР, 1990. с. 119-133.
- *Храмушин В.Н.* О постановке вычислительного эксперимента в гидромеханике. Реализация задачи о распространении длинных волн: Препринт. - Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО АН СССР, 1988. - 41с.
- *Храмушин В.Н., Симонов К.В.,* Численные расчеты распространения цунами в районе Усть-Камчатска. // Природные катастрофы и стихийные бедствия в дальневосточном регионе. Т 1, Владивосток, ДВО АН СССР, 1990. С. 179-189.
- Шендеров Е.Н. Волновые задачи гидроакустики. Л.: Судостроение, 1972.- 348 с.
- Шикотанское цунами 5 октября 1994 г. /А.И.Иващенко, В.К.Гусяков, В.А.Джумагалиев, Г.Йех, Л.Д.Жукова, Н.Д.Золотухина, В.М.Кайстренко, Л.Н.Като, А.А.Клочков, Ю.П.Королев, А.А.Кругляков, Е.А.Куликов, В.Н.Куракин, Б.В.Левин, Е.Н.Пелиновский, А.А.Поплавский, В.В.Титов, А.А.Харламов, В.Н.Храмушин, Е.В.Шельтинг. ДАН, 1996, том 348, №4. -С. 532 538.

- *Bernard E.N.* Assessment of project THRUST. Past, Present, Future. //Tsunamis: their science and hazard mitigation. Proceedings of the International Tsunami Symposium. July 31 August 3, 1989: Novosibirsk, 1990. -P. 237- 239.
- On Mitigating Rapid Onset Natural Disasters: Project THRUST (Tsunami Hasards Reduction Utilizing Systems Technology). /E.N.Bernard, R.R.Behn, G.T.Hebenstreit, F.I.Gonzales, P.Krumpe, J.F.Lander, E.Lorca, P.M.mcMananon, H.B.Milburn. Transactions, American Geophisical Union, June 14, 1988, Vol. 69, No. 24, P. 649 661.
- *Byung Ho Choi,* A tidal model of the Yellow sea end the Eastern Chinasae, KORDI report 80-02, Korea ocean research and development institute, 1980, -71 p.
- *Kim Kye Young*, Numerical Experiments jn M2 Tide in the Okhotck Sea, Seuol National University, 1992, 68 p.
- Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, 1988. 740 p.