



# ОЧЕРК ИСТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБЛЕМЫ ЦУНАМИ В СИБИРСКОМ ОТДЕЛЕНИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Ю. И. ШОКИН, Л. Б. ЧУБАРОВ

*Институт вычислительных технологий СО РАН*

*Новосибирск, Россия*

e-mail: shokin@ict.nsc.ru, chubarov@adm.ict.nsc.ru

The authors present their view on the historical background of the tsunami studies in the Siberian Branch of the Russian Academy of sciences. This history of these studies is no less variable and exciting than their subject. Researchers of many Institutes engaged in natural science investigations have participated in exploring this problem, and among the authors of publications devoted to various aspects of the problem we can find the names of eminent members of the Academy and mere sophomores, professors of Siberian colleges and universities and postgraduate students. The article gives rather detailed references.

## Введение

Среди разнообразных стихийных бедствий, которым подвержено побережье Мирового океана, таких как тайфуны, землетрясения, вулканические извержения, одним из наиболее загадочных по своей природе и опасных по своим последствиям считаются гигантские морские волны-наводнения *цунами*. Этим японским термином, означающим большую волну в бухте, принято называть океаническую волну, вызванную подводным землетрясением, извержением подводного вулкана или подводным оползнем.

Цунами возникают наиболее часто в Тихом океане, что связано с высокой активностью Тихоокеанского сейсмического пояса. Происходят они также в Атлантическом и Индийском океанах, есть данные о цунами в Средиземном море и даже в Черном и Каспийском морях. Ущерб, причиняемый сильными цунами, иногда значительно превосходит последствия, вызываемые цунамигенными землетрясениями. Так, во время цунами, происшедшего в 1703 г. в Японии, погибло около 100 тыс. человек. Волны, порожденные взрывом вулкана Кракатау в 1883 г., привели к гибели 40 тыс. человек и более 300 тыс. оставили без крова. Несмотря на наличие во многих странах специальных служб предупреждения, подобные катастрофы происходят и в наши дни. Например, цунами 16 августа 1976 г. унесло жизнь 8000 жителей Филиппин.

Уже в нынешнем десятилетии было отмечено более 10 событий, в ходе которых отмечались высоты волн, превышающие пятиметровый рубеж: Никарагуа (1992, 9.90 м, 170 жертв), Индонезия (1992, 26.18 м, 1000 жертв), о. Окушири, Япония (1993, 30.60 м, 200 жертв), о. Ява, Индонезия (1994, 13.90 м, 220 жертв), о. Шикотан, Россия (1994, 10.40 м), Аляска, США (1994, 11.00 м), Филиппины (1994, 7.30 м, 70 жертв), Мексика (1995, 5.00 м), Индонезия (1996, 7.68 м, 75 жертв), Перу (1996, 5.04 м, 12 жертв), Камчатка (1997, 8.00 м), Папуа, Новая Гвинея (1998, 15.03 м).

Обычно причиной возникновения цунами являются вертикальные смещения дна океана на больших площадях во время сильных подводных землетрясений. В некоторых случаях цунами вызываются резким сдвигом в горизонтальном направлении крупных и протяженных подводных склонов (Чилийское цунами 22 мая 1960 г.), крупными подводными оползнями (цунами в заливе Сагами, Япония, в 1923 г.), падением больших масс грунта с крутых склонов берега (гигантские волны в заливе Литуйя (США) в 1958 г.). Несколько иную природу имеют так называемые метеорологические цунами, причиной которых считается подъем уровня моря вследствие падения атмосферного давления в центре сильных циклонов.

Возникнув в каком-либо месте океана, волны цунами способны распространяться на большие расстояния, сохраняя разрушительную силу. При Чилийском цунами волны за 22 часа пересекли весь Тихий океан и обрушились на побережье Японии, причинив значительный ущерб. Самым разрушительным в истории Гавайских островов было цунами, происшедшее 1 апреля 1946 г., очаг которого располагался от них за 3500 км, в районе Алеутской островной дуги. Скорость распространения цунами в открытом океане достаточно точно определяется формулой  $c = \sqrt{gH}$ , где  $H$  — глубина воды,  $g$  — ускорение силы тяжести. В Тихом океане, средняя глубина которого порядка 4 км, скорость цунами составляет около 700 км/ч. Заметить цунами в открытом океане практически невозможно, так как при высоте 1 – 2 м волны имеют длину от нескольких десятков до сотен километров. Большинство исследователей считают, что начальное возвышение свободной поверхности в зоне очага цунами не превышает нескольких метров, а периоды волн лежат в диапазоне от 2 до 200 мин. По мере удаления от источника амплитуда их убывает в линейном приближении обратно пропорционально квадратному корню из расстояния, т. е. по минимально возможному, с точки зрения сохранения энергии, закону, обусловленному только цилиндрическим расхождением волны. Это обстоятельство, а также эффект фокусировки энергии волн, возникающий вследствие сферичности Земли, делают опасными цунами, порожденные даже весьма удаленными источниками. Существенное влияние на распространение цунами оказывает подводный рельеф дна океана, причем не только на скорость волн, но и на распределение амплитуд вдоль фронта. В частности, подводные хребты служат волноводами, над которыми происходит концентрация энергии.

Когда волны цунами доходят до мелководья, их скорость резко уменьшается. Одновременно возрастают амплитуды, достигая своих максимальных значений вблизи уреза воды. Ограничение свободного пространства по бокам, например при входе цунами в узкие заливы или устья рек, приводит к еще большему возрастанию высот волн. Вследствие рефракции опасными являются также участки около выступающих в море мысов. Все эти причины вызывают крайне неравномерное распределение высот волн вдоль побережья.

Постоянная опасность в районах Тихоокеанского побережья стимулирует исследования проблем, связанных с цунами. Камчатское цунами 1952 г. инициировало начало планомерного изучения в СССР этого грозного природного феномена.

Сведения о происшедших цунами разбросаны по различным источникам. Постепенно

но они собираются в каталоги, среди которых наиболее полными следует назвать работы [38–41]. Литература, посвященная проблеме цунами, весьма обширна, число публикаций составляет около трех тысяч наименований. Прежде всего должны быть упомянуты библиографические указатели [42–44, 54, 77, 102] и обзорные работы [7, 9–12, 17, 76, 101].

Многообразие причин, порождающих это явление, обилие факторов, определяющих характер трансформации волн цунами при их распространении от области зарождения к берегу и комплексность проявления в береговой зоне, выделяют феномен цунами и обуславливают необходимость комплексного подхода к его изучению как в плане интеграции накопленного исторического опыта, лабораторного и вычислительного моделирования, объединенных средствами современных систем обработки информации, так и в плане многообразия вычислительных моделей и алгоритмов, применяемых для воспроизведения основных характеристик процесса.

По своему содержанию конкретные прикладные задачи проблемы цунами могут быть разделены на два класса. Один из них связан с проведением априорных исследований, направленных на предварительное изучение особенностей воздействия волн на отдельные участки побережья, выделение наиболее и наименее опасных зон, определение “критических” для конкретного берегового объекта сейсмических событий, их положения и параметров, направлений подхода фронта волны, построение статистически обусловленных схем районирования побережья, а также карт времен распространения волн цунами.

Другой класс задач связан с обеспечением нужд оперативного прогноза в ситуации, когда сейсмическое событие произошло и необходимо достоверное определение кинематических и динамических характеристик вероятного проявления волны.

Обращаясь к истории исследований по проблеме цунами в Сибирском отделении Российской академии наук, вне всякого сомнения, следует указать на давний интерес к этой задаче создателя Сибирского отделения академика М. А. Лаврентьева. В своих воспоминаниях, опубликованных в журнале ЭКО на рубеже 70–80-х годов, он трижды упоминает проблему цунами в перечне приоритетных для себя исследовательских задач:

*“...Теория кумулятивных зарядов и теория пробивания при больших скоростях, которыми я занимался, породили много новых задач. Для их решения нужны были не только математические модели, но и постановка новых экспериментов. Того же требовали проблемы взрыва, цунами и другие...”*

Далее, более подробно:

*“...Значительная часть моих учеников из Физтеха занималась проблемой цунами — океанских волн, порожденных землетрясениями. Нас интересовал вопрос, где и по каким причинам эти волны принимают катастрофические размеры. Предположим, в районе экватора происходит землетрясение, после которого образуется волна, распространяющаяся в разные стороны. При этом оказывается, что в сравнительной близости от очага землетрясения волна невелика и опасности не представляет. А на большом расстоянии от места землетрясения, например на Камчатке, волна может разрушить целый поселок...”*

И, наконец, рассказывая о первых результатах только что созданного Института гидродинамики:

*“...Жили в маленьком поселке из шести щитовых домов. ...Рабочие помещения — бараки и палатки — размещались пониже, у самой речки, там же в металлических сборных гаражах были временные склады. Скоро появились и первые экспериментальные установки — кольцевой лоток Б. В. Войцеховского и мелкий, по колено, бассейн, где с помощью доски создавались волны — модель цунами...”*

Таким образом, можно сказать, что исследования проблемы цунами в Сибирском отделе, а точнее в Новосибирском научном центре, были начаты по инициативе одного из его создателей практически одновременно с созданием СО АН и даже несколько ранее. В настоящем контексте конечно следует упомянуть и давнюю работу М. А. Лаврентьева [29], посвященную исследованию математических моделей для описания длинных волн, к классу которых принадлежат и волны цунами.

В то же время была определена специфика этих исследований, обусловившая разработку математических моделей различных стадий явления: генерация волн подвижками дна, распространение по океану, выход на берег и взаимодействие с ним. Особый интерес представляли возможности интеграции экспериментального, аналитического и численного моделирования, воплощенные впоследствии в совместных работах различных Институт Отделения по исследованию гидродинамики поверхностных волн, в том числе и волн цунами (в частности, в рамках Интеграционного проекта<sup>1</sup>). Наряду с получением фундаментальных результатов, усилия сибирских ученых были направлены и на решение прикладных задач проблемы цунами, также сформулированных и описанных в работах М. А. Лаврентьева и его коллег.

В замечательной книге М. А. Лаврентьева и Б. В. Шабата [30] значительное внимание уделено проблеме цунами (см. § 34, “Распространение волн и проблема цунами”, с. 309–333). В частности, в ней сформулированы основные задачи, стоящие перед исследователями в этой проблемной области и даны комментарии некоторых результатов.

Указывая на катастрофическое цунами 4–5 ноября 1952 г. как на событие, инициировавшее интерес ученых, М. А. Лаврентьев и Б. В. Шабат отмечают, что по данным наблюдений цунами можно заметить, как высота волны на побережье (при одинаковых условиях выхода на берег) не уменьшается монотонно с удалением от эпицентра землетрясения. Это явление можно объяснить определенной направленностью волны, обусловленной начальными условиями, и влиянием рельефа дна в процессе распространения цунами.

Обращаясь к исследованию влияния рельефа дна, в 1957 г. М. А. Лаврентьев высказал гипотезу, что неровности типа подводных гребней также должны служить волноводами поверхностных волн, и поставил задачу об изучении этого явления в рамках более точных теорий. Вскоре, в 1959 г., аспирант Института гидродинамики Сунь Цао [47] экспериментально обнаружил почти стационарное распространение уединенной волны над подводным гребнем, где амплитуда волны больше, чем в других местах. Работу аспиранта из КНР можно считать одним из первых в Сибири исследований, непосредственно связанных с изучением гидродинамики волн цунами, чем и обусловлено достаточно подробное ее обсуждение в настоящем обзоре.

Интерпретируя полученные результаты, Сунь Цао ссылается на акустическую аналогию и указывает на известные типы волноводов звуковых волн. Волновод представляет собой такой район среды, где имеется минимальная скорость распространения волн. Поэтому, когда волны распространяются по волноводу, лучи волн периодически пересекают его и не уходят от него. Вследствие этого энергия волн концентрируется на волноводе, и волны могут распространяться с медленным затуханием. Однако в проведенном им эксперименте выяснилось, что фронт волны уже не периодически сходится и расходится, а имеет довольно устойчивую форму и движется с почти постоянной скоростью.

---

<sup>1</sup>Научно-исследовательский проект Интеграционных программ фундаментальных исследований СО РАН №43 “Исследование поверхностных и внутренних гравитационных волн в жидкости. Нелинейные волны, взаимодействие волн с жесткими и упругими телами, устойчивость волн”. Руководитель академик Ю. И. Шокин.

Автор подробно описывает свою экспериментальную установку:

*“...Мы загородили четверть бассейна и создали канал длиной 20 и шириной 5 м. По центральной линии канала сделали подводный цементный гребень шириной 1 м и высотой 7 см ... Метод измерения волн был предложен Б. В. Войцеховским и А. А. Ковалем.*

*На правом конце канала создаем волну, бросая доску в воду. Вследствие малой глубины воды полученная волна имеет форму и скорость распространения уединенной волны, когда отсутствует подводный гребень. Такая уединенная волна бежит после создания ее по каналу справа налево. Ее фронт над гребнем постепенно повышается и отстаёт от других частей фронта, т. е. фронт изгибается. Проходя некоторое расстояние, фронт почти прекращает изгибаться и в дальнейшем остается установившимся. В это время распределение высоты волны по фронту также становится довольно постоянным...”*

Впоследствии Р. М. Гарипов [13] в рамках линейной теории доказал, что неровность дна типа подводного хребта

$$h = h(x), \quad h(-\infty) = h_\infty > \min h(x) > 0, \quad (1)$$

где  $h = h(x)$  — глубина бассейна, достаточно быстро стремящаяся к своему пределу при  $\rightarrow \pm\infty$ , действительно является волноводом поверхностных волн. Он показал, что качественная картина волновода при наличии подводного хребта правильно описывается уже в рамках акустического приближения.

Отвечая на вопрос, является ли эффект волновода существенным при распространении цунами, М. А. Лаврентьев замечает, что данные о рельефе дна океана в цунамиактивных районах не говорят о наличии подводных хребтов, тянущихся от эпицентров землетрясений к побережью. Но роль волноводов, по-видимому, играют материковые отмели (шельфы) и уступы вдоль берега. На это указывают характерные особенности некоторых цунами.

Волноводный характер распространения в неоднородных средах без диссипации энергии имеет общую математическую природу, которую, следуя Р. М. Гарипову [14], можно описать так.

Предполагается, что процесс распространения волн описывается уравнением

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + gK\varphi = 0, \quad (2)$$

в котором оператор действует на функции только пространственных переменных. Этот оператор в подходящим образом выбранном гильбертовом пространстве является симметричным и положительным, что влечет за собой закон сохранения энергии. В ряде задач допустима приближенная постановка, в которой этот оператор можно считать дифференциальным.

При дополнительном условии однородности волновода уравнение (2) инвариантно относительно сдвигов по координате, а дно бассейна имеет уравнение вида  $h = h(x)$  (так что речь идет об инвариантности относительно сдвигов вдоль неровностей дна).

При этом условии можно искать частные решения уравнения (2) в виде

$$e^{i(\omega t - \nu y)} \psi(x), \quad (3)$$

где  $\omega, \nu$  — действительные числа, а  $\psi \rightarrow 0$  при  $\rightarrow \pm\infty$ .

Р. М. Гарипов показал, что условие (2) при дополнительном предположении об однородности достаточно для существования решений вида (3), дающих волновод. В частности,

оно выполняется, если дно бассейна плоское всюду, кроме полоски шириной  $\varepsilon$ , над которой имеется возвышение высотой порядка  $\varepsilon$ . Следовательно, при любом  $\varepsilon > 0$  над этим возвышением распространяются медленно затухающие волны. Можно доказать, что при  $\varepsilon \rightarrow 0$  значения  $\psi(x)$  равномерно стремятся к нулю, т. е. что при  $\varepsilon \rightarrow 0$  волновод постепенно пропадает.

Заметим, что условие однородности не является ограничением по существу, а введено лишь для упрощения рассуждений. Естественно ожидать, что решения типа (3), дающие волновод, существуют и в более общем случае, когда возвышение дна бассейна локализовано в полосе ограниченной ширины, уходящей на бесконечность.

Продолжая исследование, Е. И. Биченков и Р. М. Гарипов [8] рассмотрели специальный случай, когда подводный хребет представляет собой широкую ступеньку небольшой высоты, т. е. функция  $h(x)$  имеет вид

$$h(x) = \begin{cases} 1 - Sq & \text{для } |x| < \frac{1}{2q}, \\ 1 & \text{для } |x| > \frac{1}{2q}, \end{cases}$$

где  $q$  — малый параметр. Оказалось, что существует такое критическое значение площади ступеньки  $S_k^*$ , что при  $S < S_k^*$  соответствующая группа волн затухает со скоростью порядка  $t^{-1/2}$ , при  $S > S_k^*$  — со скоростью  $t^{-1/3}$ , а при  $S = S_k^*$  — медленнее всего, со скоростью порядка  $t^{-1/4}$ .

Таким образом, влияние подводного хребта на распространение волн сводится не только к простому увеличению амплитуды, но существенным образом определяет сам процесс распространения волны, изменяя характер затухания ее вдоль хребта.

Задачу о генерации волн цунами при подводном землетрясении М. А. Лаврентьев и Б. В. Шабат предложили рассматривать в терминах основных понятий теории упругости, считая земную кору упругим, однородным и изотропным полупространством  $\{z < 0\}$ , над которым находится слой жидкости постоянной глубины  $h$ .

После ряда упрощений авторы приходят к простейшей математической модели относительно вертикальной компоненты вектора смещения  $u_3$  и амплитуды волн на поверхности жидкости  $\xi$ :

$$\frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} - \left( \frac{\partial^2 u_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_3}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_3}{\partial z^2} \right) = f_3, \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - c^2 \left( \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} \Big|_{z=0}, \quad (5)$$

где функция  $f_3$  отлична от нуля только при  $t > t_0$  ( $t_0$  — момент начала землетрясения),  $c = \frac{\sqrt{gh}}{c_0}$ , граничные условия имеют вид

$$\frac{\partial u_3}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (6)$$

а начальные условия

$$u_3|_{t=0} = \frac{\partial u_3}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad \xi|_{t=0} = \frac{\partial \xi}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0. \quad (7)$$

Анализ постановки задачи (4)–(7) приводит к выводу о возможности ее использования для совершенствования прогноза цунами. Вводя далее многообразие  $S$  ( $S = \sigma \times R_+$ ,  $R_+ = \{t : t \geq 0\}$ ) и множество функций  $\omega = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ , определяющих правую часть уравнения (5), авторы показывают, что если наложить некоторые начальные условия на функции  $\omega \in W$  (множество всех возможных сейсмических полей, определенных и дважды гладких в произведении пространства  $R^3$  на положительную полуось  $R_+(t \geq 0)$ ), некоторые условия на носители правых частей уравнения

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} - \Delta \omega = \frac{\partial^2 f_3}{\partial t^2}, \quad (8)$$

и предположить, что эти функции четны по переменной  $z$  всюду в (это заменяет граничное условие (6)), то задание однозначно определяет функцию  $\omega$  для всего . А именно, оказывается возможным предсказание высоты волны  $\xi_0$  в точке наблюдения по измеренному полю смещений на некотором малом участке  $\sigma$  поверхности Земли вблизи этой точки.

В этом случае по измеренному сейсмическому сигналу  $\omega|_s$  можно будет восстановить значения  $\omega|_{z=0}$ , т. е. правую часть уравнения, решив которое при нулевых начальных условиях (7), однозначно “предсказать высоту волны цунами”.

Классы  $W$ , обладающие этим свойством, можно называть классами единственности.

В некоторых случаях для обеспечения корректности решения задачи предлагается при помощи некоторых дополнительных условий выделить в классе единственности  $W$  подкласс корректности. В частности, ранние результаты М. М. Лаврентьева [31] делают естественной гипотезу о том, что корректность можно обеспечить условием ограниченности сверху энергии упругих волн заданной наперед постоянной  $E_0$ , которая оценивается из физических соображений как энергия землетрясения.

М. А. Лаврентьев и Б. В. Шабат обращаются также к задаче распознавания цунами, рассматривая возможность применения для ее решения метода распознавания образов, то есть определения ряда числовых признаков  $(p_1, p_2, \dots, p_m)$ , таких, чтобы при отображении

$$: \omega|_s \rightarrow (p_1, p_2, \dots, p_m) \quad (9)$$

точки пространства признаков, соответствующие цунамигенным землетрясениям, отделились от точек, соответствующих землетрясениям нецунамигенным, некоторой поверхностью.

Представляется целесообразным такой способ выбора признаков. Исходя из того, что, если размеры эпицентра землетрясения малы по сравнению с расстоянием до точки наблюдения, то высота волны цунами с большой точностью определяется положением эпицентра и моментами начальных возмущений относительно этого эпицентра, авторы предлагают рассматривать в качестве вероятного набора признаков координаты очага землетрясения и моменты начальных условий до некоторого порядка.

Подводя итог, авторы констатируют, что “задача исследования и предсказания цунами еще очень далека от сколько-нибудь удовлетворительного решения.”

Дальнейшие исследования по проблеме цунами в Сибирском отделении характеризовались мультидисциплинарным подходом, в целом присущим работам этого научного центра страны. Так, в Вычислительном центре под руководством академика А. С. Алексева группа молодых ученых, выпускников Новосибирского университета (В. К. Гусяков и др.) приступили к изучению сейсмических аспектов генерации волн цунами при подводных землетрясениях. Несколько позже, в 1974 году, по инициативе академика Н. Н. Яненко в

лаборатории, возглавлявшейся Ю. И. Шокиным (ныне академиком), были начаты работы по численному моделированию волн цунами. В этих исследованиях принимали участие Ан. Г. Марчук и Л. Б. Чубаров. Забегая вперед, скажем, что в 1981 г. полученные молодыми сотрудниками ВЦ СО АН СССР (В. К. Гусяков, Ан. Г. Марчук и Л. Б. Чубаров) результаты были удостоены Премии Ленинского комсомола в области науки и техники. Аналитические исследования задач, связанных с возникновением и последующей трансформацией волн цунами в модельных постановках выполнялись в Институте математики СО АН А. И. Янушаускасом и его учениками. Непосредственно связанными с цунами следует считать работы в области вычислительной гидравлики, проводившиеся в Институте гидродинамики СО АН академиком О. Ф. Васильевым, М. Т. Гладышевым, В. Г. Судобичером, С. М. Шугриным и др. (см., например, [44, 65]). Постоянный интерес к задачам цунами проявлял академик Г. И. Марчук, возглавлявший ВЦ СО АН СССР.

Следует заметить, что в каждом из упомянутых коллективов проблема цунами занимала место одного из самых привлекательных объектов исследований в безграничном мире волновой гидродинамики. Привлекательность этой задачи обуславливалась многообразием ее проявлений, возможностью использования разнообразного математического инструментария, вовлеченностью в необходимость решения вопросов, непосредственно связанных с жизнью конкретных людей, их безопасностью. И, наконец, глобальностью проблемы, выводящей на непосредственные контакты с учеными и специалистами различных научных центров нашей страны и других стран, обеспокоенных цунамибезопасностью своего побережья. Так, в 1975 г. именно в Новосибирске под эгидой СО АН СССР проходила встреча экспертов СССР и США по цунами, участниками которой были и авторы настоящего очерка.

В те годы, как и в наши дни, национальную координацию работ по цунами выполняла Комиссия по цунами (ее ведомственная принадлежность претерпевала изменения), одним из создателей и руководителем которой был академик С. Л. Соловьев, возглавлявший долгие годы академическую науку в самом цунамиопасном регионе страны — в Сахалинской области, включающей и Курильский архипелаг. Международное, главным образом Тихоокеанское, сотрудничество осуществлялось в рамках Международной комиссии по цунами, функционировавшей под эгидой Международного геофизического союза. Следует упомянуть Международный информационный центр по цунами в Гонолулу (Гавайи, США), руководителем которого долгие годы был Дж. Парарас-Кароянис, неоднократно посещавший Новосибирский научный центр. Свидетельством высокой оценки вклада сибирских ученых в исследования проблемы цунами является постоянное и активное их участие в работе упомянутых национальных и международных организаций, проведение симпозиумов по цунами различного уровня в Новосибирске, Красноярске, Абакане и Шушенском, издание сборников трудов по цунами и коллективных монографий, привлечение сотрудников Сибирского отделения к выполнению фундаментальных исследований и прикладных работ как на национальном, так и на международном уровне.

Следуя интересам и пристрастиям авторов настоящего обзора, остановимся далее в основном на результатах, полученных коллективом, созданным и возглавленным Ю. И. Шокиным, и коллективом А. С. Алексеева и В. К. Гусякова, к которым в 1983 г. присоединился Ан. Г. Марчук.

После перехода в 1976 г. Отделения механики сплошных сред ВЦ СО АН СССР, научным и организационным лидером которого был академик Н. Н. Яненко, в Институт теоретической механики СО АН СССР, работы по численному моделированию волн цунами были сосредоточены в лаборатории Ю. И. Шокина и выполнялись силами уже упомя-



нутых Ан. Г. Марчука, Л. Б. Чубарова, З. И. Федотовой, которая занималась теоретическим исследованием конечно-разностных схем для решения задач динамики поверхностных длинных волн. Первые попытки применения алгоритмов метода конечных элементов для решения этого же круга задач предпринимались В. В. Кобковым, к работе были привлечены также студенты НГУ В. Ю. Карев, В. Г. Исаев, В. В. Пехотский, Е. Б. Грошев, впоследствии ставшие аспирантами и (или) сотрудниками Отделения.

В 1983 г. ядро этого коллектива обосновалось в Красноярском ВЦ СО АН СССР, где продолжились исследования волн цунами в рамках более широкой программы работ в области волновой гидродинамики, включающей решение задач воспроизведения характеристик волн цунами при их распространении от области генерации к берегу, задач расчета времен добегания волн цунами, создание проблемно-ориентированных программных систем, в частности предназначенных для автоматизации действий соответствующих служб предупреждения, создание программ-тренажеров, детальное исследование отдельных этапов развития волн цунами (распространение по шельфу, взаимодействие волн с островами, воздействие волн на погруженные тела), разработку технологии вычислительного эксперимента, предназначенной для расчета параметров локальных систем предупреждения о цунами, проведение районирования побережья Камчатки по степени опасности от цунами и т. п.

Принимая во внимание естественную классификацию исследований по цунами, предложенную и реализованную академиком С. Л. Соловьевым в уже упоминавшихся обзорных работах [42–44], подготовленных им для представления Генеральным ассамблеям Международного геодезического и геофизического союза, остановимся на некоторых наиболее важных достижениях сибирских ученых в изучении цунами.

## **1. Натурные наблюдения над цунами и цунамигенными землетрясениями**

Источником наиболее достоверных сведений о проявлении волн цунами на побережье безусловно являются натурные данные, собираемые во время полевых экспедиций и впоследствии включаемые в специальные каталоги, в том числе и в специализированные электронные базы данных в составе проблемно-ориентированных информационно-вычислительных систем. Речь о таких системах пойдет ниже. Что же касается участия в полевых работах, то следует отметить работу В. К. Гусякова в составе международных экспедиций, в ходе которых собиралась информация как о недавно происшедших событиях, например о Шикотанском цунами 5 октября 1994 г. [21], так и о палеоцунами на Камчатке (экспедиция в устье реки Жупанова, 26 июня – 2 июля 1996 г.) и на Южном побережье Австралии (экспедиция на побережье Нового Южного Уэльса, 11–12 июля 1997 г.).

## **2. Изучение процессов возбуждения цунами**

Усилиями А. С. Алексева и В. К. Гусякова в работах [1, 20, 23, 25], выполненных в Вычислительном центре СО АН СССР, получил дальнейшее развитие подход к задаче о возбуждении цунами, предложенный ранее Г. С. Подъяпольским [37]. Главным здесь является использование упругой модели среды и уравнения Ляме с учетом гравитационных членов в качестве уравнения движения частиц среды. Это позволяет рассмотреть в од-

ной модели как гравитационные волны в жидкости, так и упругие сейсмические волны в твердой среде, которые являются в этой постановке основными носителями связи между очагом землетрясения и волнами цунами. Обнаружено существование двух гравитационных корней, один из которых соответствует длинным гравитационным волнам в жидкости (цунами), а второй — гравитационной волне, возникающей на контакте слоя жидкости и подстилающего упругого полупространства. Анализ рассчитанных теоретических мареограмм цунами и сейсмограмм релеевских и гидроакустических волн при различных параметрах источника и среды показал, что наиболее опасным по отношению к возбуждению цунами является вертикальный разлом ( $\alpha = 90^\circ$ ) и взбросовый тип подвижки на нем ( $\gamma = 90^\circ$ ). При прочих равных условиях амплитуда волн цунами при взбросе примерно в 8 раз больше, чем при сдвиговой подвижке ( $\alpha = 90^\circ, \gamma = 0^\circ$ ) и более чем в 10 раз — при подвижке по горизонтальной плоскости разлома ( $\alpha = 0^\circ, \gamma = 0^\circ$ ).

В рамках упругой модели дна и гравитирующего слоя сжимаемой жидкости выполнены расчеты энергии цунами при различных параметрах и типах точечных источников, определена доля сейсмической энергии, излучаемой такими источниками, идущая на образование цунами [18, 73].

Решена задача о нахождении остаточных смещений упругого полупространства для случая пространственной модели очага землетрясения дислокационного типа. Исследован характер смещений при различных параметрах модели, сделана оценка энергии волн цунами, возбуждаемых такими источниками [19].

В работах сотрудника Института математики СО АН СССР А. И. Янушаускаса [66, 67] с помощью исследования неоднородного интегродифференциального уравнения Адамара получены аналитические выражения в виде степенного ряда по времени и упрощенные формулы для колебаний свободной поверхности жидкости, вызванных кратковременными подвижками дна, для случая как сжимаемой, так и несжимаемой жидкости. Этот метод был впоследствии обобщен на случай подвижек любой конечной длительности. Удалось также рассмотреть особенности возбуждения цунами при наличии течений [68–71].

С использованием близкого математического инструментария, а именно на основе сведения задачи Коши — Пуассона к задаче для уравнения Адамара, В. В. Лобовым и В. М. Чернышевым решалась задача о начальной стадии возникновения волн на поверхности идеальной несжимаемой жидкости, заполняющей неограниченный бассейн конечной глубины, в том числе для случая перемещающейся подвижки дна, моделирующей подводный оползень [32].

Значительный вклад в изучение процессов генерации волн цунами был сделан представителями известной школы исследований задач оптимального управления, созданной профессором О. В. Васильевым в Иркутском университете. В частности, А. В. Аргучинцев и В. А. Терлецкий [3] получили ряд интересных результатов при решении обратной задачи цунами, т. е. в восстановлении подвижек дна по имеющимся мареограммам цунами.

Возбуждение плоских поверхностных волн при движении тяжелых наносов через устье реки и по свалу глубин в море численно моделировалось М. Т. Гладышевым на основе теории мелкой воды с учетом трения наносов о дно и внутреннего трения либо пропорционального давлению, либо ограниченного сверху характерным для осадков порогом [15, 16].

Вычислительные алгоритмы, воспроизводящие гипотетическую возможность возникновения цунами в результате падения в океан, например, астероида, были созданы В. Е. Петренко. Соответствующие численные модели использовались для проведения вычислительных экспериментов по генерации космогенных цунами в западной части Средиземного моря.

### 3. Улучшение сейсмических методов оперативного прогноза цунами

В работах В. К. Гусякова были изучены прогностические возможности амплитудно-спектральных характеристик поверхностных волн [24] и продолжены исследования сейсмических признаков цунамигенности землетрясений [22]. Показано, что цунамигенные землетрясения выделяются большими периодом и шириной главного максимума амплитудного спектра рэлеевских волн, его нормированными на этот максимум площадью, энергией и некоторыми другими интегральными характеристиками.

### 4. Распространение цунами

Во второй половине 70-х г. серьезные успехи в разработке вычислительных алгоритмов для моделирования различных этапов трансформации волн цунами были достигнуты под руководством Ю. И. Шокина. Научные исследования были сосредоточены на создании средств компьютерного моделирования трансформации поверхностных гравитационных волн на воде и первоначально были инициированы необходимостью решения прикладных гидродинамических задач, связанных с катастрофическими волнами в океане (цунами) [35, 86, 72, 96 – 98].

Успехи в изучении отдельных этапов существования цунами позволили перейти к созданию комплексов алгоритмов и программ для расчета цунами от момента землетрясения до выхода волн на берег. Таким инструментом стали комплекс программ MKUR, предназначенный для расчета распространения длинных волн в рамках линейной и нелинейной модели мелкой воды в декартовой системе координат, а также комплекс программ “Волна”, предназначенный для расчета цунами в сферической системе координат с учетом вращения Земли [2, 48, 55, 59, 63, 62, 108].

С использованием согласованной модели генерации и распространения волн цунами В. К. Гусяковым и Л. Б. Чубаровым было выполнено одно из первых в отечественной практике численное моделирование реального цунами [26, 93]. Оригинальная математическая технология была применена к исследованию Шикотанского (Немуро-оки) цунами 17 июня 1973 г., вызванного подводным землетрясением с магнитудой 7.8. В ходе этой работы исследовалось влияние формы области очага подводного землетрясения на форму фронта возникающей волны. Расчетные данные сравнивались с результатами натуральных наблюдений.

По результатам расчетов выполнено районирование побережья о-вов Кунашир и Хоккайдо по степени цунамиопасности (рис. 1), определена возможность применения линейной модели мелкой воды для описания особенностей формирования волны цунами в очаговой области и характеристик распространения волны вплоть до зоны шельфа.

Из анализа мареограмм, вычисленных для разных источников, сделан вывод о том, что резонансные свойства рельефа даже в открытых и полуоткрытых областях, подобных рассмотренной в этом численном эксперименте, оказывают существенное влияние на формирование волнового поля и характер колебаний вблизи побережья.

Близкий по характеру вычислительный эксперимент был проведен и для исторического цунами 10 июня 1975 г. в Курило-Хоккайдской зоне, что позволило оценить адекватность различных моделей очагов землетрясений, исходя из наилучшего согласования рассчитанных мареограмм с данными наблюдений.

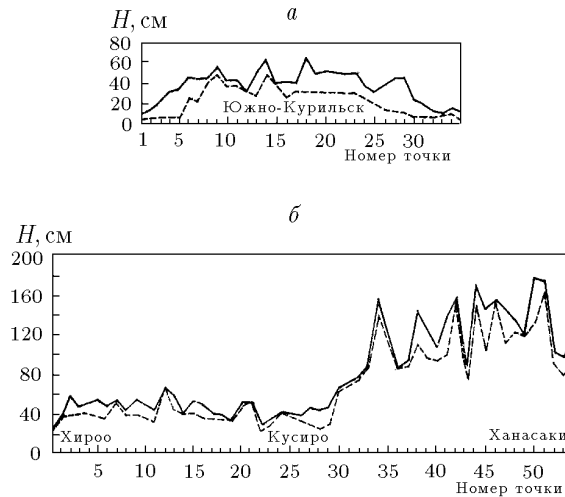


Рис. 1.

Используя созданный вычислительный инструментарий, В. К. Гусяков и Л. Б. Чубаров выполнили чрезвычайно важное исследование сравнительной цунамиэффективности некоторых характерных для зон островных дуг типов очагов землетрясений [27, 91, 92].

Удалось обнаружить, что два наиболее характерных для зон островных дуг сейсмических источника — крутой взброс и пологий надвиг — обладают практически одинаковой цунамиэффективностью.

Распределение высот цунами вдоль побережья типичной островной дуги имеет отчетливо выраженную колоколообразную форму. Формирование такой относительно узкой зоны является результатом совместного действия следующих факторов: диаграммы направленности излучения сейсмического источника, эллиптичности очага цунами и фокусирующего действия наклонного рельефа дна. Из этих трех факторов наибольшее значение имеет последний.

Два наиболее типичных для островных дуг источника (крутой взброс и пологий надвиг) дают волны цунами, практически одинаковые по амплитудам, периодам и знакам первых вступлений. Следовательно, пологие надвиги нужно считать столь же цунамиопасными, как и крутые взбросы. При использовании механизма как признака цунамигенности речь может идти только о выделении землетрясений со сдвиговым типом подвижки, относительно редких в зонах островных дуг.

Модели источников с двойным разрывом создают цунами с несколько большими максимальными высотами, чем модели с одним разрывом. При фиксированном сейсмическом моменте очага волны цунами наибольшей высоты дает модель пологого надвига с ответвляющимся в его верхней части крутым взбросом, однако обеспечиваемое ею увеличение высот цунами сравнительно с моделями простого разрыва (в 1.3 раза) все же недостаточно для объяснения всех особенностей цунами. Можно предполагать, что пониженная скорость вспарывания разрыва, характерная для таких землетрясений, расположение его верхнего крыла в мягких осадочных породах островодужного клина континентальной литосферы приводят к уменьшению доли излучаемой сейсмической энергии сравнительно с обычными землетрясениями. Тогда при фиксированной величине сейсмического момента получается заниженное значение магнитуды события и в то же время повышенные высоты цунами на ближайших к очагу участках побережья.

Исследование особенностей распространения волн цунами от источников, расположен-

ных близко к берегу, было выполнено Е. Б. Грошевым, Ан. Г. Марчуком и Л. Б. Чубаровым [34]. При этом исследовались процессы, обусловленные захватом части волновой энергии шельфовой зоной и образованием системы краевых волн, распространяющихся вдоль берега. Подобные процессы, как правило, связываются с разрывным, ступенчатым строением прибрежного рельефа дна, включающего протяженную площадку почти постоянной глубины. Эти явления определяют поведение волн цунами в прибрежной зоне, в частности, приводят к немонотонному изменению амплитуды волны цунами вдоль берега (рис. 2).

Анализ результатов вычислительных экспериментов позволил определить механизм образования интерференционных волн, распространяющихся в шельфовой зоне вдоль берега, и прояснить причины, по которым при некоторых реально происшедших цунами максимальная амплитуда достигалась не первой, а второй, третьей и т. д. волнами. Обнаружено также, что упомянутая выше немонотонность распределения амплитуд волн цунами вдоль берега, число экстремумов, расстояния между ними и времена их вступления, а также появление денивеляции уровня океана, предшествующей приходу основной волны, не зависят от ориентации источника возмущения.

Процессы формирования и трансформации длинных волн, порожденных импульсными подвижками дна различных конфигураций были рассмотрены В. Ю. Каревым и Л. Б. Чубаровым. В ходе вычислительных экспериментов, выполнявшихся в рамках линейных, линейно-дисперсионных, нелинейных и нелинейно-дисперсионных моделей, было обнаружено, что независимо от формы начального возвышения, при условии сохранения его потенциальной энергии, пропорциональной квадрату амплитуды  $\eta_0$ , монотонное увеличение длины  $\lambda_0$  приводит к немонотонной зависимости максимальной высоты волны, отмечаемой в точках наблюдения, т. е. существует экстремальная длина исходного возмущения поверхности такая, что пришедшая от него волна имеет максимальную высоту (рис. 3).

Отказ от учета дисперсионных эффектов приводит к монотонному уменьшению максимальных высот волн на любом удалении от источника, в то время как дисперсионные модели приводят к появлению заметного максимума при определенных длинах волн начального возвышения. Отбрасывание нелинейных членов заметно снижает высоты волн, ухудшая согласие с экспериментом, но сохраняя качественную картину. Анализ показал

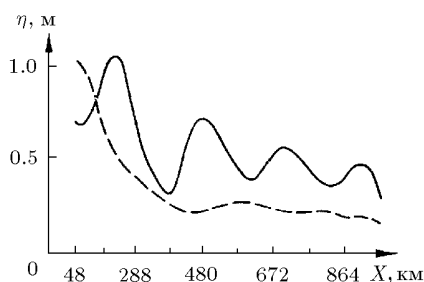


Рис. 2.

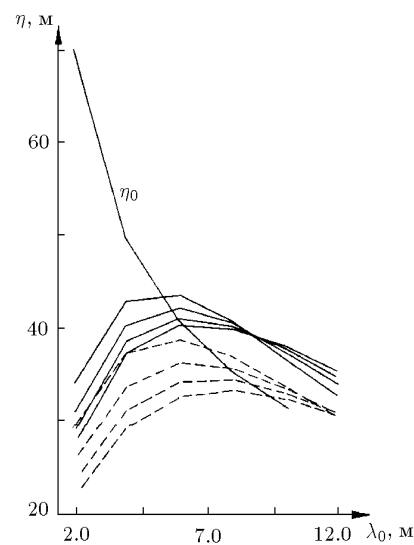


Рис. 3.

также, что существует такая длина волны  $\lambda^*$ , при которой волна распространяется в бассейне без изменения амплитуды, т. е. ведет себя как солитон. Результаты расчетов хорошо согласуются с данными лабораторного моделирования, выполненного А. А. Поплавским, и Б. В. Левиным в ИМГиГ ДВО РАН.

Ан. Г. Марчуком [33] для решения модельных задач выхода цунами на берег был предложен метод, в котором постоянство расчетной области достигается переходом в такую систему координат, в которой возвышение воды отсчитывается вдоль линии, наклоненной к горизонту под тем же углом, что и берег, так что все частицы жидкости на этой линии имеют одну и ту же пространственную координату. В то же время З. И. Федотовой [60] были начаты исследования по созданию алгоритмов для сквозного счета в области, включающей фронт волны.

Для исследований указанного класса задач в работах В. Б. Барахнина, Т. В. Кузьмичевой, В. А. Новикова, А. И. Урусова, З. И. Федотовой, Г. С. Хакимзянова, Д. А. Шкуропацкого, Ю. И. Шокина, Л. Б. Чубарова применялись оригинальные методы и подходы математического моделирования, в том числе новые постановки задач волновой гидродинамики в терминах полных и приближенных моделей [34, 61, 78–81, 83, 89, 90, 49, 50, 87, 94, 99, 104, 105, 106].

Повышение эффективности вычислительных моделей, основанных на линейных, нелинейных и нелинейно-дисперсионных уравнениях теории мелкой воды, достигалось использованием новых экономичных конечно-разностных алгоритмов, реализуемых на сетках, адаптирующихся к геометрии акватории и к особенностям решения [4, 74, 75].

Аналогичные подходы были распространены на конечно-разностные модели для расчета волн в прибрежной зоне на основе линейной и нелинейной, двумерной и трехмерной моделей потенциальных и вихревых течений идеальной однородной жидкости со свободной границей [57, 58]. С использованием разработанного алгоритма расчета плоских вихревых течений идеальной несжимаемой жидкости проведено численное исследование влияния неравномерного подвода жидкости через входной участок границы на характер течения в области с частично свободной границей.

Разработка новых способов описания граничных ситуаций значительно расширила возможности воспроизведения характеристик волн на всех стадиях развития явления [5, 95, 103].

В рамках модели плоских потенциальных течений идеальной жидкости разработан конечно-разностный метод расчета на адаптивных сетках процесса трансформации и начальной стадии опрокидывания волн при их движении в бассейне с неровным дном (рис. 4). Проведено исследование наката волны цунами на полупогруженное тело, находящееся вблизи вертикальной стенки. Выявлено влияние ширины тела, его осадки, амплитуды набегающей волны на величины заплесков на тело и силового воздействия волны [107].

Детально исследовано явление косога наката волны цунами на вертикальную или наклонную стенку (рис. 5), к которой волна подходит под некоторым углом [53].

В двумерной и трехмерной постановках исследован процесс истечения воды в ограниченное пространство, возникающего вследствие разрушения ограждающих сооружений [6].

Исследованы волновые процессы и поля скорости при различных режимах входа волны в огражденные акватории и выхода из них (рис. 6).

Показана целесообразность склеивания моделей разного порядка при расчетах распространения длинных волн в протяженных акваториях. Предложен способ склеивания линейной и нелинейной моделей, допускающий безотражательный проход волны через

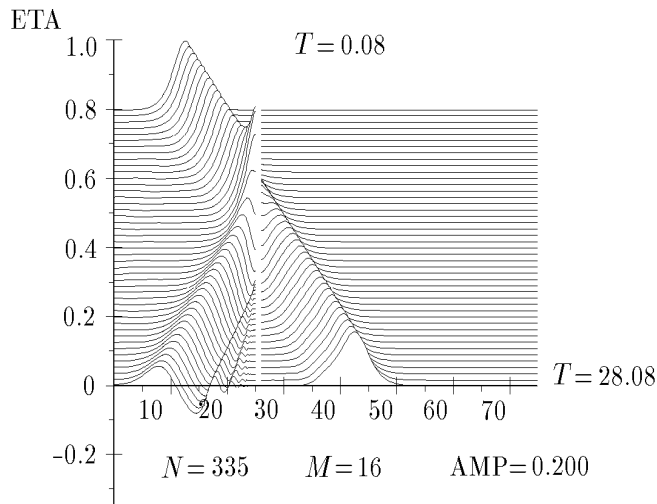


Рис. 4.

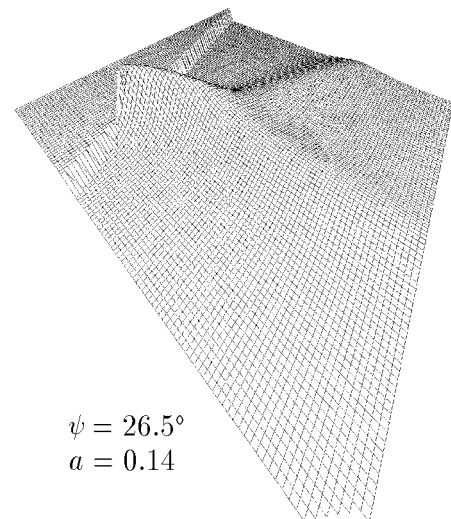


Рис. 5.

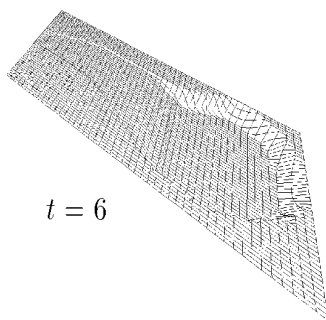
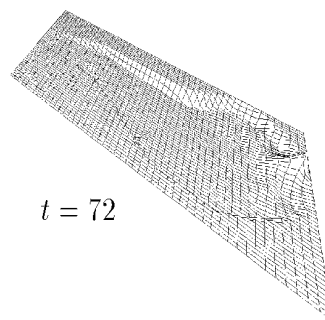
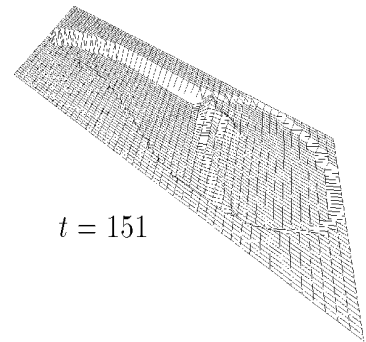
 $t = 6$  $t = 72$  $t = 151$ 

Рис. 6.

границу склейки моделей.

Разработаны и обоснованы логически простые и обеспечивающие удовлетворительную точность при решении ряда практических задач алгоритмы расчета наката волн на берега достаточно сложных конфигураций.

Технология вычислительного эксперимента, включающего методы прямого численного моделирования и статистического анализа натуральных данных, была применена для построения адекватной модели “критического” события для побережья в районе г. Северо-Курильска на всех стадиях от генерации волны вплоть до наката на берег (рис. 7).

Местоположение фрагмента “критического” очага было определено с помощью анализа рефракционных диаграмм, из которого вытекает, что для исследуемого участка побережья наиболее опасны волны, возникающие в районе материкового склона южной оконечности Камчатки. Именно здесь располагался очаг цунами 4.11.1952 г.

Анализ результатов моделирования цунами на глубоководье показал, что решающими факторами усиления волны при распространении в Северо-Курильском районе являются особенности рельефа дна, в частности, наличие подводных хребтов, ведущих к протяженному шельфу о. Парамушир и Второму Курильскому проливу. Энергия волн концентрируется здесь в областях наибольшего изменения глубин, причем основным фактором усиления амплитуды является не столько высота подходящей волны, сколько ее

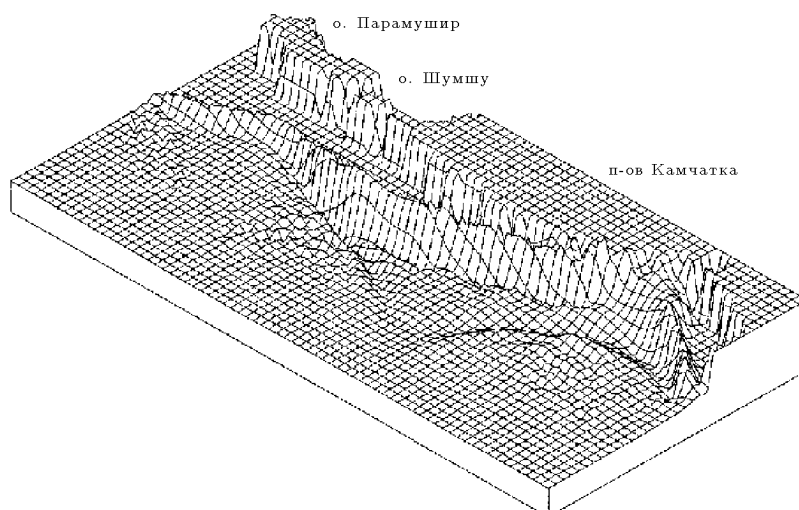


Рис. 7.

направленность. В целом закономерности, обнаруженные при численном моделировании, подтверждаются экспериментальными лабораторными данными.

Комплексное использование методов морфологического анализа побережья (выделение аномалий по структуре годовых колец на срезах деревьев, растущих в предполагаемой зоне затопления, а также изучение остаточных явлений деформации берегового рельефа волнами), физического моделирования и математического моделирования позволило получить достаточно полную картину рассматриваемого явления.

Расчет наката волны цунами проводился по нелинейным уравнениям мелкой воды, записанным в дивергентной форме. Рассматривались два варианта подхода волны цунами (амплитуды 4 и 10 м) к побережью в районе г. Северо-Курильска. В первом случае входящая волна задавалась на двадцатиметровой изобате, а во втором — на юго-восточной части морской границы заданной области.

По результатам расчетов изучена зависимость динамики границ зоны затопления (рис. 8) от направления подхода волны цунами и ее амплитуды, определены локальные максимальные заплески, тип вероятного наката волны цунами на берег. Сопоставление с данными, полученными другими методами, показало, что оценки границы зоны затопления от сильного цунами 1960 г. и катастрофического — 1952 г. не противоречивы и хорошо согласуются по всему побережью. Таким образом, математическое моделирование наката цунами в предложенной технологии оказалось пригодным в качестве инструмента для определения возможных зон затопления от цунами исследуемых участков побережья.

В работах А. М. Франка (см. например, [51, 52]) предложена общая схема построения дискретных моделей несжимаемых жидкостей и разработан единый метод их численной реализации. Построены дискретные нелинейно-дисперсионные модели мелкой воды, в рамках которых удалось выполнить моделирование наката уединенных волн в широком диапазоне углов наклона берегового откоса и амплитуд волн. Кроме того, построены две дискретные модели для описания трехмерных волн, на основе которых также изучалось маховское отражение уединенных волн от берега. Были найдены количественные зависимости для параметров тройной конфигурации, для волн конечной амплитуды получено резонансное усиление на стенке, предсказанное для волн малой амплитуды. Эти результаты могут быть использованы для изучения поведения волн цунами на завершающей



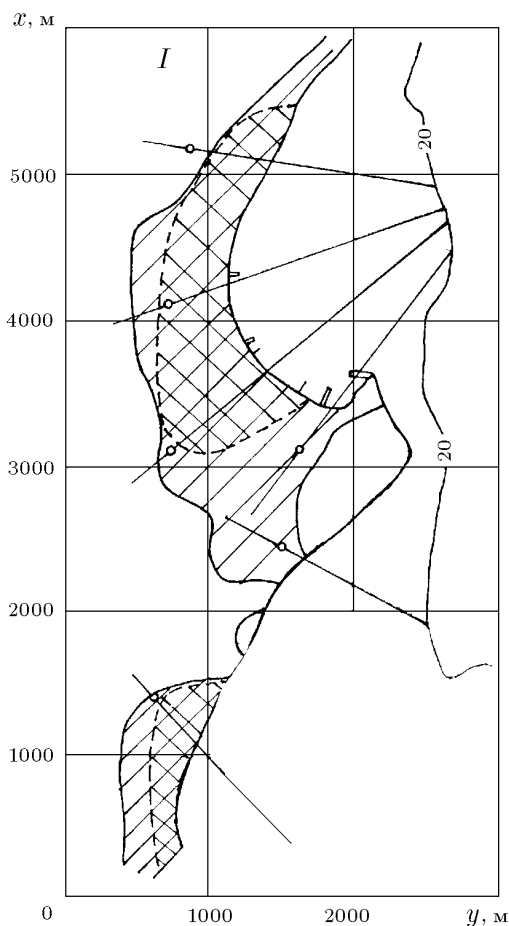


Рис. 8.

стадии.

## 5. Сквозное численное моделирование цунами и работы по цунамирайонированию побережий

В цикле работ группы академика Ю. И. Шокина, объединенных единой вычислительной технологией [56, 82, 84], формулируется проблемная область вычислительного эксперимента в исследованиях цунами, вводится классификация очагов цунами по степени удаленности от изучаемого пункта побережья и обсуждаются особенности формулировки задач вычислительного эксперимента для случаев удаленных, промежуточных и близких цунами. Впоследствии основные результаты этого цикла были опубликованы в коллективной монографии Ю. И. Шокина, Л. Б. Чубарова, Ан. Г. Марчука и К. В. Симонова [64].

Конкретным примером реализации этой методики является моделирование цунами на шельфе средней группы Курильских островов (рис. 9) с целью определения основных особенностей поведения волн цунами в шельфовой зоне о. Симушир, где практически отсутствовали натурные данные о цунами [85, 111]. В этом случае основу долгосрочного прогноза и цунамирайонирования могут составить только результаты численного моделирования.

По степени цунамиэффективности происходящих здесь подводных землетрясений мож-

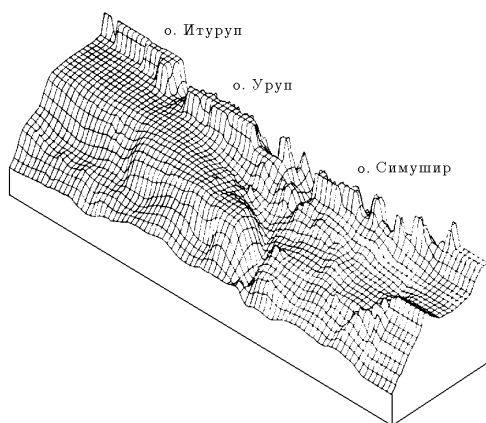


Рис. 9.

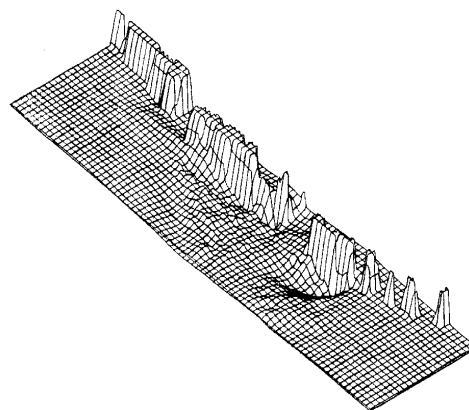


Рис. 10.

но условно выделить две зоны — северную и южную, на границе между которыми находится о. Симушир.

На первом этапе численного моделирования изучалось распространение плоской волны (модель обобщенного очага), подходящей по направлению нормали к шельфу. Полученные результаты позволили выделить характерные особенности трансформации первоначального возвышения при его взаимодействии со структурами подводного рельефа, оценки влияния местоположения и размеров очага. Построенная рефракционная схема для исследуемого района показала, что для о. Симушир наибольшую опасность могут представить очаги, расположенные фронтально в пределах материкового склона на изобатах 1 – 3 км. Для северной оконечности острова опасны также источники цунами, расположенные ближе к о. Уруп.

В ходе численных экспериментов с выявленными модельными источниками были определены основные характеристики поведения волны цунами в исследуемом районе и сформулированы условия “критичности” для вероятного очага. Таким очагом для о. Симушир может быть источник, расположенный севернее пролива Буссоль. Именно здесь находился очаг сильнейшего цунами 13.10.1963 г. Эволюция начального возмущения приводит к образованию интенсивной краевой волны, распространяющейся вдоль о. Симушир к северу, и возникновению собственных колебаний в проливе Дианы (рис. 10).

Основным результатом численного моделирования реального цунами стали распределения коэффициентов усиления волны вдоль восточного и западного побережья о. Симушир и ряда малых островов, расположенных к северу от него. По результатам анализа мареограмм и построенного распределения коэффициентов усиления волны, наиболее цунамиопасными являются вершины бухт, причем максимум усиления достигается в вершине бухты Мельника.

Были обнаружены несколько стадий трансформации волны при проникновении плоской волны в бухту, расположенную в северной оконечности о. Симушир: образование сильных всплесков на внешнем берегу бухты; торможение волны и ее частичное ослабление при прохождении входного канала; резкое ослабление при движении ее от входа по глубоководью бухты. При подходе к берегу высота волны вновь возрастает так, что максимальное усиление наблюдается в восточной и южной вершинах бухты.

Результаты вычислительных экспериментов по моделированию распространения цу-

нами в шельфовой зоне Камчатки и Командорских островов [28] послужили основой для составления комментированного Атласа расчетных мареограмм для мареографных точек, расположенных вдоль исследуемого побережья с шагом 10 км. В результате интерпретации полученных данных (расчетные мареограммы) выделены основные типы волн и объяснена их природа. Анализ натуральных и картографических данных о проявлении цунами на побережье Камчатки позволил оценить характерные частотные, энергетические и геометрические параметры реальных очагов, а также вероятные места их расположения, определить ближайшую к берегу границу очагов цунамигенных землетрясений, оценить преобладающий период и вычислить характерную ширину обобщенного очага. Ориентация очага вдоль береговой линии обеспечивает при этом максимальную направленность излучения волновой энергии в сторону берега. Общая картина очаговой области цунами в целом хорошо согласуется с новейшими представлениями о строении земной коры и особенностями сейсмического режима в морской части региона.

Сравнительный анализ материалов натуральных наблюдений и расчетных мареограмм позволил определить общие тенденции изменения максимальных амплитуд волн и, следовательно, относительную цунамиопасность вдоль изучаемого побережья. Удалось также оценить некоторый масштабный коэффициент, который дал возможность расширить трактовку расчетных мареограмм для получения конкретных практических рекомендаций.

Условия проведения обсуждаемых вычислительных экспериментов обеспечили необходимую детальность и полноту исследования за счет адекватного выбора области исследования, включающей зоны очагов основных камчатских землетрясений и соответствующих параметров вычислительных алгоритмов.

Расчетные распределения (рис. 11, где линия 1 — период волны, 2 — время прихода волны, 3 — время прихода максимальной амплитуды) периодов волн цунами  $\tau(x)$ , времен прихода головной волны  $t_0(x)$ , а также времен наступления максимальной амплитуды  $t_{\max}(x)$  позволяют оценить дополнительные факторы цунамиопасности для изучаемых участков побережья.

Происшедшие в 1989–1991 гг. сильные землетрясения в северной части Корякского автономного округа потребовали детального изучения вероятных катастроф сейсмического характера в этом регионе (рис. 12). В работе приняли участие В. К. Гусяков и сотрудники его лаборатории, которые использовали уже упомянутый выше детерминистский подход, основанный на выделении потенциальных цунамигенных зон, конструировании “проектного” цунами и последующем применении соответствующих вычислительных алгоритмов для воспроизведения генерации и распространения цунами. Полученные при этом рас-



Рис. 11.

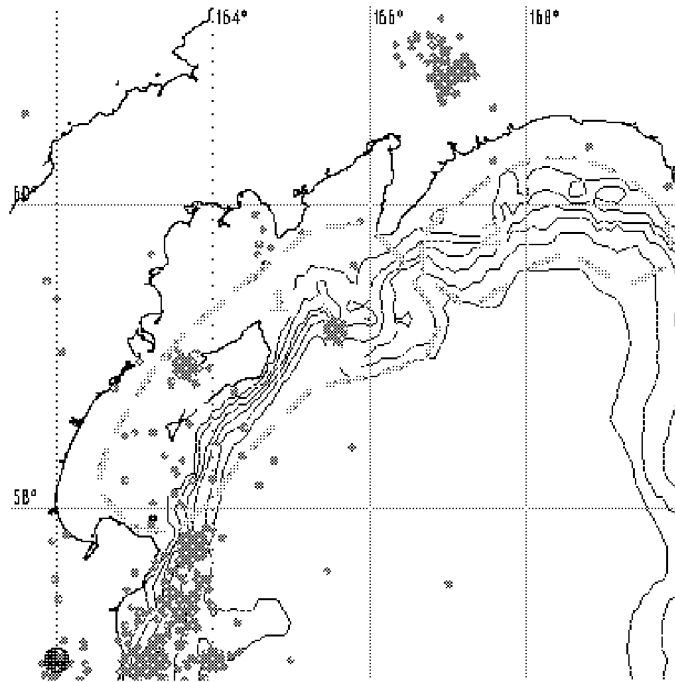


Рис. 12.

четные мареограммы восполнили недостаток натуральных данных в защищаемых пунктах побережья и позволили построить вероятные распределения высот волн цунами вдоль берега.

Основным результатом исследования стало подтверждение гипотезы о том, что большое подводное землетрясение с магнитудой порядка 7.6 и с эпицентром на континентальном склоне бассейна Командорских островов может представить реальную угрозу цунами для многочисленных рыбацких деревень, расположенных на северной части залива Карагинский. Ожидаемая волна цунами в самых близких частях побережья может достигать 4 м. Возможные вторичные эффекты (прибрежные и подводные оползни), вероятность которых в этом регионе весьма высока, может в 2–3 раза увеличить предсказанные высоты волн.

## 6. Совершенствование службы предупреждения о цунами

Одним из первых прикладных исследований, непосредственно направленных на совершенствование службы предупреждения о цунами, стали выполненные под руководством Ю. И. Шокина в 1988–1989 гг. контракты Межправительственной океанографической комиссии ЮНЕСКО на расчет и издание Атласов карт изохрон волн цунами в Тихом океане. Эти работы, в которых принимали участие В. Ю. Карев, А. Н. Судаков, Л. Б. Чубаров и др., оказались и первым опытом участия в международном сотрудничестве по снижению ущерба от волн цунами [100, 110].

При выборе алгоритмов для оперативного определения времен добегания волн цунами естественным является предположение о равенстве этих времен при распространении волн от источника к пункту на побережье и обратно. Такое предположение позволяет

использовать карты (таблицы) обратных изохрон, рассчитываемые заранее для каждого из защищаемых пунктов по соответствующим акваториям. В дальнейшем при получении координат гипоцентра цунамигенного землетрясения предварительное время добегания волны цунами к пункту на побережье определяется по такой карте с помощью простых алгоритмов интерполяции. Наряду с сейсмическими датчиками, мареографными приборами, средствами телекоммуникации, обработки и передачи информации созданный Атлас карт изохрон призван обеспечить эффективность принимаемых решений при объявлении тревоги цунами и при проведении защитных мероприятий.

В работе использовались два класса алгоритмов, один из которых связан с решением систем дифференциальных уравнений для определения траекторий и фронтов волн, а второй — с расчетом времени распространения элементарного сигнала от узла к узлу внутри некоторого шаблона, перемещаемого по заранее определенной дискретной сетке, покрывающей исследуемую акваторию. При этом определяющее влияние на точность расчета времен добегания во всех методах оказывают точность и детальность батиметрической информации, используемой при расчетах.

При исследовании влияния метода интерполяции и аппроксимации глубин (билинейная интерполяция и сплайн-аппроксимация) на точность вычисляемых временных характеристик (на материалах цунами 1983 г. в Японском море) оказалось, что разброс времен добегания в среднем составляет 1–2 мин. Некоторое превышение времени пробега, вычисленное при использовании сплайн-аппроксимации для задания глубины моря, вызвано сглаживанием сильных неоднородностей батиметрии вблизи береговой линии и соответствующим запаздыванием волны.

Для оценки степени соответствия расчетных времен использовались результаты решения прямых задач, когда источник начального возмущения располагался в зоне очага цунамигенного землетрясения и определялись времена прихода волн к точкам наблюдения на побережье и результаты решения обратных задач, в которых применение принципа обратимости времен позволяет построить карту изохрон для конкретного пункта на берегу, а затем определить время пробега волны от него до любой очаговой зоны.

Реальные события для анализа выбирались так, чтобы очаги землетрясений генерировали волны цунами заметной интенсивности и располагались в основных сейсмоактивных зонах, охватывающих акваторию Тихого океана.

Времена добегания, рассчитанные по уравнениям эйконала, оказались в среднем меньше наблюдаемых на 2 мин на 1 ч распространения фронта волны, по Атласу 1971 г. — на 15 мин, результаты, полученные по дискретному алгоритму, — на 7 мин.

Характер разброса результатов представлен на рис. 13, где вдоль горизонтальной оси отложены “реальные” времена добегания, а по вертикальной — расчетные данные. В целом отмечается хорошее согласие результатов, особенно для близких цунами и цунами средней удаленности. Оказалось возможным также оценить влияние погрешностей аппроксимации рельефа дна океана при сравнении прямых и обратных расчетных изохрон. Анализ показал, что отклонения оказались достаточно малыми для различных расстояний и не превышают 3% или 2 мин/ч.

Интеграция опыта и результатов решения упомянутых выше прикладных задач проблемы цунами позволила В. А. Новикову, К. В. Симонову, Л. Б. Чубарову и Ю. И. Шокину предложить оригинальный подход к созданию локальных систем (ЛС) раннего обнаружения цунами, основанный на результатах специально организованных серий вычислительных экспериментов. Конкретная реализация предлагаемой методики была выполнена для одной из бухт побережья Камчатки [109].

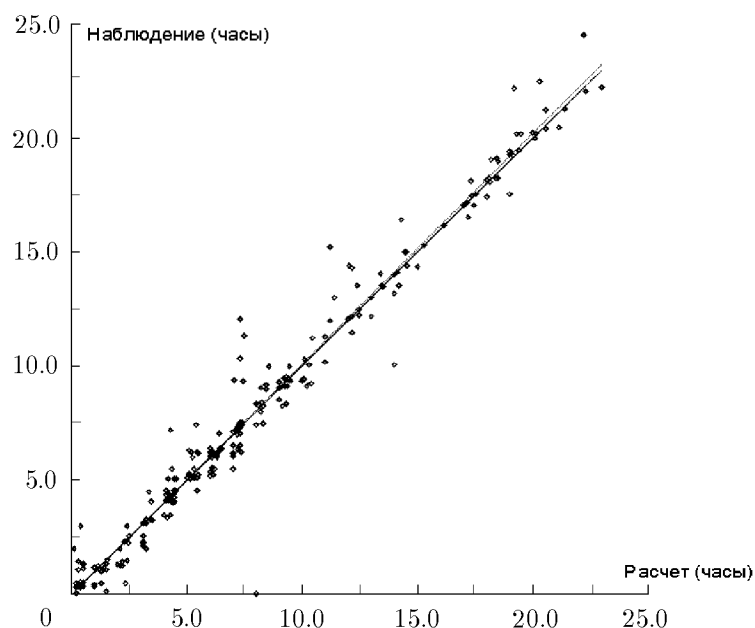


Рис. 13.

Необходимость создания подобных систем мотивируется неспособностью глобальных и региональных систем обеспечить достоверность прогноза цунамиопасности от местных (локальных) подводных землетрясений, когда участок побережья и прилегающей акватории охватывается очаговой областью. «Критическими» по параметру заблаговременности для службы предупреждения о цунами являются значительная часть Тихоокеанского побережья Камчатки и отдельные районы на Курильских островах.

Структура разрабатываемой ЛС предусматривает наличие гидрофизических датчиков для оценки параметров волн цунами и диспетчерского центра для сбора и анализа данных, передачи информации и выполнения процедур принятия решений. Такая система может работать в двух режимах.

В режиме ожидания ведется контроль за уровнем моря с помощью гидрофизических станций в ближней и дальней зонах акватории. При обнаружении на одном из датчиков аномального изменения стационарного состояния уровня моря система переходит в оперативный режим, после этого выполняется оценка параметров ожидаемой волны в районе объекта. На основе анализа полученных данных принимается решение о вероятных максимальных границах зон затопления защищаемого участка побережья и осушения дна прилегающей акватории с помощью рассчитанных таблиц и номограмм, выдаются сообщение о тревоге цунами и прогноз вероятной силы и длительности воздействия волн цунами на сооружения и берега.

Расчет параметров конкретной ЛС включает несколько этапов, осуществляемых в расчетных областях, телескопически вложенных друг в друга; степень их детализации повышается по глубине вложенности.

На первом этапе рассчитываются карты времен добегания от удаленных источников. На основе анализа этих карт определяются основные направления подхода волны цунами к области следующего уровня вложенности.

Работа по второму этапу заключается в уточнении времен добегания до защищаемого пункта с использованием более подробной батиметрии; в определении оптимальной схемы

расстановки гидрофизических датчиков предупреждения о цунами; в сборе, систематизации и анализе исторических натуральных данных о подводных землетрясениях и цунами в рассматриваемой области для оценки параметров “проектных” волн цунами; в моделировании волновых режимов, порожденных выявленными источниками.

По результатам выполненных на этом этапе расчетов оказывается возможным оценить максимальные амплитуды и преобладающие периоды, сравнить расчетные и натурные данные и, наконец, определить наиболее опасные очаги вероятных подводных землетрясений (их расположение и структуру).

Целью третьего этапа является расчет коэффициентов усиления волн при их распространении от датчиков наблюдения до защищаемого пункта. Исходным материалом для выполнения этой работы являются результаты расчетов гидрофизических характеристик (амплитуда, частота, форма), определенные на предыдущем этапе и непосредственно связанные с исследуемой акваторией и с ее вероятными цунамигенными зонами.

Четвертый заключительный этап выполняется для конкретного участка береговой зоны и включает расчет границ зон затопления от “проектных” волн цунами; оценку инженерного риска для объектов, расположенных в береговой зоне; составление результирующих номограмм для принятия решений.

Естественным предупреждением о возможном близком цунами, после которого необходимо усилить наблюдение за уровнем моря, является сообщение о сильном подводном землетрясении в других региональных областях, получаемое от соответствующих служб предупреждения о цунами.

В принятии решения о тревоге цунами, как правило, участвуют два датчика — основной и азимутальный. В соответствии с очередностью регистрации волны на этих датчиках оценивается параметр заблаговременности. По величине регистрируемых величин амплитуды головной волны и ее периода с помощью соответствующей расчетной номограммы вырабатывается оперативный прогноз цунамиопасности для защищаемой акватории. Выбор номограммы определяется в зависимости от направления подхода волны с помощью этой же схемы.

## **7. Создание автоматизированной системы наблюдения и оповещения о цунами, современные информационно-вычислительные системы, ориентированные на использование при решении задач проблемы цунами**

В начале 1980-х гг. правительством страны было принято решение о создании Единой автоматизированной системы (ЕАС) предупреждения о цунами для тихоокеанского побережья страны. Предпосылками к началу этой работы можно считать существенный рост числа хозяйственных объектов, располагающихся в силу технологической необходимости у побережья морей и океанов и, следовательно, подверженных возможному катастрофическому воздействию волн цунами. Значительная часть упомянутых объектов характеризуется высокой степенью риска как в период их возведения, так и главным образом в период эксплуатации. Сюда можно отнести водозаборные устройства прибрежных атомных электростанций, платформы шельфовой нефте- и газодобычи, порты и гавани, используемые для стоянки гражданского и военного флота, в том числе флота с ядерными энергетиче-

скими установками; расположенные в прибрежной зоне предприятия химической и биологической промышленности.

Еще одной предпосылкой является наметившаяся тенденция к заметному росту природных катастроф, в том числе и катастрофических волн цунами. Весьма существенным фактором, усугубляющим ситуацию, является достаточно жесткая связь между природными и антропогенными катастрофами, когда события одного происхождения становятся как бы спусковым крючком и (или) отягощающим фактором для событий иного рода.

Эффективно противостоять подобным тенденциям, основываясь только на традиционных подходах к решению проблемы снижения ущерба, нанесенного катастрофическими волнами, не представлялось возможным.

Достойным ответом должно было стать создание интегрированных систем, обладающих возможностями моделирования различных сценариев развития явлений, использующих большие массивы фактической (натурной) и экспериментальной информации, способных в оперативном режиме оценивать информацию, поступающую по телекоммуникационным каналам связи, настроенных на специфические региональные особенности защищаемых территорий и предназначенных для информационной поддержки процедуры принятия решений в чрезвычайных обстоятельствах надвигающейся катастрофы или (и) в обстоятельствах планирования хозяйственного освоения прибрежной зоны, проектирования, возведения и эксплуатации прибрежных объектов.

Возможность использования высокоэффективных вычислительных систем, устойчивых и высокоскоростных каналов связи, а также новых информационных технологий являются третьим фактором, определившим актуальность работ.

Сотрудники СО РАН приняли активное участие как на уровне обсуждения концепции этой программы, так и в реализации ее конкретных элементов.

Принципы организации сейсмической подсистемы обсуждались работах В. К. Гусякова и А. С. Алексеева, а вопросы оптимального выбора сети сейсмических станций для этой подсистемы рассматривались В. Н. Белобородовым, Ан. Г. Марчуком и О. Н. Омельченко. Структура математического обеспечения центра обработки данных системы и возможные требования к необходимому математическому обеспечению и техническому уровню ЕАС обрабатывались В. К. Гусяковым и О. Н. Омельченко.

Работы выполнялись в тесном сотрудничестве с Комитетом по гидрометеорологии и охране окружающей среды. На первых порах в создании Системы приходилось ориентироваться на использование несколько устаревших образцов вычислительной техники и коммуникационного оборудования, что, естественно, сдерживало привлечение современных вычислительных моделей и ограничивало возможности разработки эффективных информационных систем с быстрым доступом к данным.

Однако с начала 90-х гг. ситуация изменилась, в результате чего был выполнен цикл работ (А. Н. Судаков, В. Ю. Карев, В. Ю. Костюк, Л. Б. Чубаров и др.) по созданию программных систем EVENT, START и START1, предназначенных для оперативного определения времен добегания волн цунами и поддержки функционирования программно-аппаратных комплексов для автоматизации действий службы предупреждения о цунами [45, 88].

Методологически структура системы EVENT состоит из оперативной подсистемы для расчета времен прихода волн цунами от прошедшего землетрясения в защищаемые пункты с помощью интерполяции (экстраполяции) по кинематическим характеристикам проявлений цунами, хранящимся в информационной базе; подсистемы пополнения информацион-



	Date	Time	Warning Procedure 4			Travel Times	
Greenwich	20-01-93	14:49	Severo-Kurilsk			7h 54m	
			Matua			6h 43m	
Sakhalin	21-01-93	01:49	Burevestnik			6h 32m	
			Yuzhno-Kurilsk			6h 39m	
			Malokurilskoe			6h 32m	
			Urup			6h 37m	
			Shumshu			7h 05m	
			Simushir			6h 35m	
Preliminary results							
<b>Duty oceanologist</b>							
Ivanov I. I.							
N	Sakhalin	Date	Time	Magnitude	Latitude	Longitude	Hypocentre Depth
12		19.03.1993	18:51	7.5	2.9N	170.3E	999
F4 Verification		F9 Tide Calculations		F2 Save		Esc Exit	

Рис. 14.

ной базы сведениями о защищаемых пунктах, цунамигенных землетрясениях и временах добегания, подсистемы формирования сообщений службам оперативного прогноза, подсистемы детального анализа механизма распространения волн цунами в заданной (расчетной) акватории.

Собственно программная часть обеспечивает: оперативный расчет времен добегания волн цунами до защищаемых пунктов от происходящего цунамигенного землетрясения при вводе информации о событии оператором центра цунами (рис. 14); создание информационных файлов (сообщений) для последующей обработки оператором; ведение базы данных о защищаемых пунктах, происшедших цунамигенных землетрясениях и временах добегания цунами; детальный расчет времен добегания до защищаемых пунктов; защиту информации от ошибочных действий персонала с выводом предупреждающих сообщений; демонстрационный режим работы для помощи операторам при работе с программным обеспечением.

Оперативная подсистема работает таким образом, что если заданы перечень защищаемых пунктов и времена прихода волн цунами в заданный пункт от ранее происшедших цунамигенных землетрясений либо от модельных источников цунами (заранее рассчитанные значения либо значения, полученные при анализе карты обратных изохрон волн для этого пункта), то при получении сообщения о происшедшем землетрясении оператор центра цунами производит расчет времен добегания волн цунами до защищаемых пунктов, используя интерполяцию (экстраполяцию) по имеющимся в информационной базе данным, и пополняет базу данных новым событием. Для проведения детальных исследований предусмотрено построение времен добегания волн (изохрон) от конкретного очага (рис. 15).

Система содержит данные по защищаемым пунктам (рис. 16) и землетрясениям, а также таблицы времен добегания волн цунами, являющиеся связующим звеном этих двух баз данных. В них содержится информация о проявлениях землетрясений в защищаемых пунктах.

Программно-аппаратный комплекс START (Сахалинский центр цунами) был создан в результате развития изложенных выше концепций, его модификация START1 адаптирована к регламенту соответствующих служб в Камчатском центре цунами.

Программная часть этих комплексов структурно состоит из подсистем обслуживания

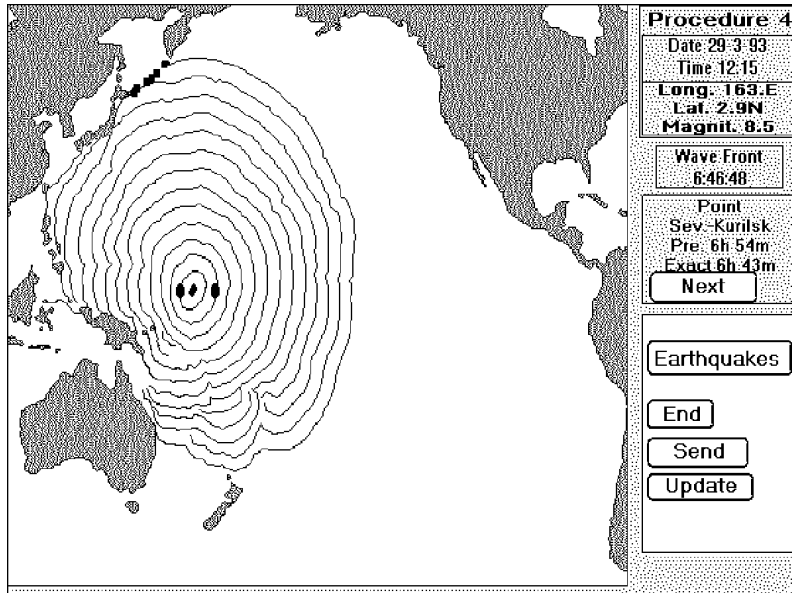


Рис. 15.

Protected Points		Warning Procedure 1		
Protected Point	Longitude	Latitude	Files of Isochrones	Activity
Severo-Kurilsk	156.12E	50.60N	N_Kuril	↓
Matua	153.25E	48.07N	Matua	↓
Burevestnik	147.62E	44.90N	Burev	↓
Yuzhno-Kurilsk	145.88E	44.02N	S_Kuril	↓
Malokurilskoe	146.88E	43.85N	E_Kuril	↓
Urup	150.50E	46.20N	Urup	↓
Shumshu	156.20E	50.72N	Shumshu	↓
c.Vasiliev	155.42E	50.03N	Vasiliev	↓
Simushir	151.07E	46.85N	Simushir	↓

F2) Save F3/Alt-F3) View F9) Times Calc. Tab) Act Esc) Exit

Рис. 16.

рабочих мест инженера Службы предупреждения о цунами (СПЦ) и дежурного океанолога. В задачи программного обеспечения рабочего места дежурного океанолога входит прием и контроль данных о цунамигенном землетрясении, определение схемы оповещения, соответствующей этим данным, оперативное определение времен прихода волны к защищаемым пунктам побережья, проведение при необходимости уточненного прямого моделирования распространения волны с учетом характеристик очага происшедшего землетрясения, передача результатов расчета на рабочее место инженера СПЦ, обеспечение доступа к информационному полю, обеспечение пользовательского интерфейса и визуализация результатов. Структура информационного поля комплекса определяется разделением (в соответствии с Регламентом конкретной службы) акватории на зоны, с каждой из которых связаны специальные наборы данных.

Тестирование системы было проведено по ряду пунктов побережья Охотского моря, и результаты сравнивались с известными временами добегания реальных волн цунами, использовавшимися ранее в работе соответствующих служб. Статистический анализ времен добегания волн подтвердил адекватность предлагаемой методики. Средняя ошибка расчета времен добегания составляет для района Охотского моря 4 мин на один час времени распространения волны.

В рамках этого же цикла работ был создан и программный тренажер ЦУНАМИ, обеспечивающий с помощью простых и надежных численных алгоритмов воспроизведение основных характеристик трансформации волн цунами в акваториях Японского моря и Курило-Камчатской зоны. Использование гибкого дружественного графического интерфейса и элементов экспертной системы для оценки возникающих в ходе моделирования ситуаций позволяет эффективно применять тренажер ЦУНАМИ для обучения персонала Служб предупреждения о цунами, анализа особенностей моделируемого физического процесса. Набор включенных в программный тренажер математических моделей и вычислительных алгоритмов достаточно полон и позволяет наряду с обучением использовать его в качестве инструмента для решения ряда прикладных задач проблемы цунами, обеспечивая при этом достаточную точность. Тренажер устроен так, что при выполнении шаг за шагом действий, предусмотренных его режимами, подготавливаются исходные данные для численного моделирования, проводятся необходимые расчеты и анализируются результаты вычислений, представляемые в удобной графической форме.

В режиме диалога с программным тренажером пользователь может моделировать генерацию волны, задавая параметры модельного или реального землетрясения, рассчитывать карты изохрон, поля высот волн и скоростей в зависимости от батиметрии и геометрии границ области исследования (рис. 17). При этом система позволяет модифицировать характеристики береговой линии, создавая гипотетические заградительные сооружения.

Подсистема расчета динамических характеристик обеспечивает моделирование распространения длинных гравитационных волн, обусловленных начальным возмущением, параметры которого определяются характеристиками модельного, исторического или реального подводного землетрясения, при этом учитывается распределение глубин в исследуемой акватории, наличие островных систем, заградительных сооружений и т. п. Специфика программного тренажера, предусматривающая высокую скорость моделирования, потребовала некоторого упрощения вычислительной модели, в частности, использования достаточно грубой разностной сетки, схематизации внутренних границ расчетной области.

Гипертекстовая система “подсказки” и комментирования результатов оказывается доступной на каждом этапе работы и обеспечивает доступ к текстовой и визуальной информации справочного характера о структуре исследуемой акватории и особенностях ее

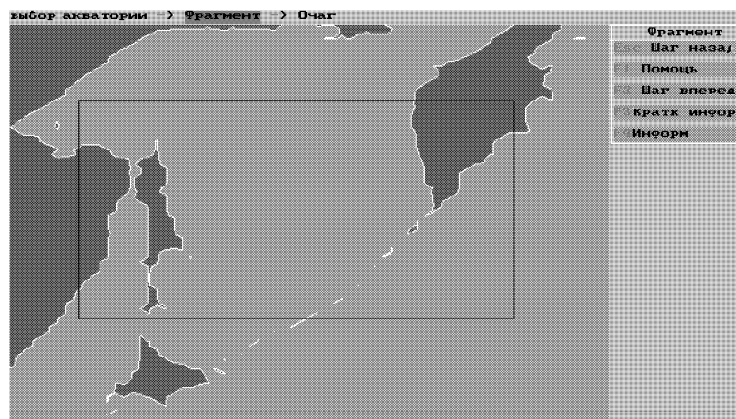


Рис. 17.

рельефа, к историческим сведениям о происшедших катаклизмах и их проявлениях в защищаемых пунктах. Здесь же открывается доступ к экспертным оценкам конкретных ситуаций, основанным на опыте предыдущих исследований.

В рамках проекта, поддержанного грантом INTAS-RFBR (95–1000) В. К. Гусяковым, Ан. Г. Марчуком и др. была выполнена работа по созданию специализированной геоинформационной системы, обеспечивающей работу с автоматизированной базой данных о цунами в Средиземноморье, средства управления которой опирались на разносторонний графический пользовательский интерфейс и оригинальную систему обработки и отображения картографической информации. В базу данных включено 406 событий за период с 1380 г. до н. э. вплоть до 1996 г.

Специальный инструментарий для оценки цунамириска основан на статистическом анализе исторических данных и последующем применении стохастических методов для расчета «катастрофической кривой», позволяющей для конкретного пункта побережья оценить вероятность превышения заданной высоты волны за определенный временной промежуток (обычно это 100 лет).

В последующем опыт разработки позволил коллективу успешно выполнить контракты Межправительственной океанографической комиссии ЮНЕСКО по созданию интерактивной системы для хранения, обработки и визуализации исторических данных о землетрясениях и цунами вблизи Тихоокеанского побережья США. При этом наборы данных о заплесках цунами были пополнены более чем 2500 новыми записями, большинство которых снабжены уточненными географическими координатами точек наблюдения.

Итогом деятельности группы, возглавляемой В. К. Гусяковым, станет База данных по историческим цунами для Тихого океана, представляющая наиболее полный набор данных об исторических цунами и сопутствующих явлениях. Эта информационная система состоит из двух частей. Первая содержит базовые параметры источников почти 1490 исторических цунамигенных землетрясений в Тихом океане (от 65° ю. ш. до 65° с. ш. и от 80° в. д. до 50° з. д.) от 47 г. до н. э. и до настоящего времени. Вторая часть содержит почти 8000 данных о заплесках высотах волн и результатов приборных измерений. Интерфейс базы данных обеспечивает комфортные условия для формирования запросов по ряду естественных критериев и адекватное графическое представление информации (частотные гистограммы, карты распределения интенсивности). Авторами предусмотрено издание CD-ROM, содержащего наборы структурированной информации в специальном формате и сопутствующее программное обеспечение.

Пользователям сети Интернет будет доступна также специальная версия системы.

Такова, на наш взгляд, увлекательная и далекая от завершения история исследований по проблеме цунами в Сибирском отделении Академии наук нашей страны.

Авторы отдают себе отчет в вынужденной неполноте и фрагментарности настоящего обзора и предлагают заинтересованным читателям обращаться за более подробной информацией к непосредственным участникам работ и (или) к соответствующим оригинальным публикациям. Необходимо заметить также, что, как правило, описание результатов сопровождается библиографическими ссылками, но в некоторых случаях использовались авторские аннотации исследований, опубликованных в форме внутренних материалов. Сталкиваясь с альтернативой: упоминание результата при невозможности корректной ссылки или отказ от такого упоминания, авторы выбирали первое.

В заключение авторы выражают благодарность и признательность всем коллегам по исследованию проблемы цунами.

## Список литературы

- [1] АЛЕКСЕЕВ А. С., ГУСЯКОВ В. К. Численное моделирование процесса возбуждения волн цунами и сейсмоакустических волн при землетрясении в океане. В *“Теория дифракции и распространения волн”*, т. 2, М. — Ереван, 1973, 194–197.
- [2] АЛЕКСЕЕВ А. С., ГУСЯКОВ В. К., ЧУБАРОВ Л. Б., ШОКИН Ю. И. Численное исследование генерации и распространения волн цунами при реальной топографии дна. Линейная модель. В *“Изучение цунами в открытом океане”*, Наука, М., 1978, 5–20.
- [3] АРГУЧИНЦЕВ А. В., ТЕРЛЕЦКИЙ В. А. К решению обратной проблемы цунами в рамках двумерной модели методами оптимального управления. В *“Исследования цунами”*, М., №4, 1990, 52–57.
- [4] БАРАХНИН В. Б., ХАКИМЗЯНОВ Г. С. Применение динамически адаптивных сеток для численного решения задач теории мелкой воды. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов*. М., Вып. 4, 1994, 39–44.
- [5] БАРАХНИН В. Б., ХАКИМЗЯНОВ Г. С. Численная реализация краевых условий в одномерных задачах теории мелкой воды. В: *“Актуальные проблемы современной математики”*, т. 1, НИИ МИОО НГУ, Новосибирск, 1995, 18–30.
- [6] БАРАХНИН В. Б., ХАКИМЗЯНОВ Г. С., ЧУБАРОВ Л. Б., ШКУРОПАЦКИЙ Д. А. Некоторые задачи численного моделирования волновых режимов в замкнутых бассейнах. *Вычисл. технологии, ИВТ СО РАН*, Новосибирск, 1, №2, 1996, 3–25.
- [7] БЕРНШТЕЙН В. А. О механизме и математическом описании процесса возбуждения цунами. В *“Методы расчета возникновения и распространения цунами”*, Наука, М., 1978, 5–17.
- [8] БИЧЕНКОВ Е. И., ГАРИПОВ Р. М. Распространение волн на поверхности тяжелой жидкости в бассейне с неровным дном. *ПМТФ*, 2, 1969, 21–26.

- [9] Войт С. С. Длинные волны и приливы. *Итоги науки и техники. Океанология*. Т. 2, ВИНТИ, М., 1973, 46–49.
- [10] Войт С. С. Длинные волны и приливы. *Там же*, 1975, 70–90.
- [11] Войт С. С. Обзор работ по теории волн цунами, выполненных в СССР. *Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана*, **3**, №11, 1967, 1158–1165.
- [12] Войт С. С. Цунами. В *“Океанология. Физика океана”*. Т. 2, Наука, М., 1978, 229–254.
- [13] ГАРИПОВ Р. М. Неустановившиеся волны над подводным хребтом. *Докл. АН СССР*, **161**, №3, 1965, 547–550.
- [14] ГАРИПОВ Р. М. Волновод в упругой среде. *Материалы междунар. конф. по механике сплошных сред*, София, 1968, 83–96.
- [15] ГЛАДЫШЕВ М. Т. Возбуждение волн цунами подвижками дна. В *“Состояние исследований и разработок по созданию Единой автоматизированной системы “Цунами”*: Тез. докл. совещания. Изд. ЦКБ гидрометеорол. приборостроения, Обнинск, 1985, 61–64.
- [16] ГЛАДЫШЕВ М. Т. О математическом моделировании подводных лавин. *Тез. докл. Научного совета по проблеме “Изучение океанов и морей и использование их ресурсов”*. ВЦ, ИТПМ СО АН СССР, Новосибирск, 1982, 36–38.
- [17] ГУСЯКОВ В. К. Обзор работ по проблеме возбуждения волн цунами. В *“Методы расчета возникновения и распространения цунами”*. Наука, М., 1978, 18–29.
- [18] ГУСЯКОВ В. К. Остаточные смещения на поверхности упругого полупространства. В *“Условно-корректные задачи математической физики в интерпретации геофизических наблюдений”*. Изд. Вычисл. центра СО АН СССР, Новосибирск, 1978, 23–51.
- [19] ГУСЯКОВ В. К. Расчет энергии волн цунами. В *“Некорректные задачи математической физики и проблемы интерпретации геофизических наблюдений”*. Изд. Вычисл. центра СО АН СССР, Новосибирск, 1976, 46–64.
- [20] ГУСЯКОВ В. К. Возбуждение волн цунами и океанических волн Релея при подводном землетрясении. В *“Матем. проблемы геофизики*, вып. 3, ВЦ СО АН СССР, Новосибирск, 1972, 250–272.
- [21] ГУСЯКОВ В. К. и др. Шикотанское цунами 5 октября 1994 г. *Докл. РАН*, **348**, №4, 1996, 532–538.
- [22] ГУСЯКОВ В. К. Исследование спектральных характеристик релеевских волн для серии сильных тихоокеанских землетрясений. *Препринт №283 ВЦ СО АН СССР*, Новосибирск, 1981.
- [23] ГУСЯКОВ В. К. О связи волны цунами с параметрами очага подводного землетрясения. В *“Матем. проблемы геофизики*, вып. 5, ч. 1, ВЦ СО АН СССР, Новосибирск, 1974, 118–140.

- [24] ГУСЯКОВ В. К. Об оценке цунамиопасности подводных землетрясений по спектральным характеристикам рэлеевских волн. В *“Генерация цунами и выход волн на берег”*. Радио и связь, М., 1984, 84–95.
- [25] ГУСЯКОВ В. К. Расчет энергии волн цунами. В *“Некорректные задачи математической физики и проблемы интерпретации геофизических наблюдений”*. ВЦ СО АН СССР, Новосибирск, 1976, 46–64.
- [26] ГУСЯКОВ В. К., ЧУБАРОВ Л. Б. Численное моделирование Шикотанского (Немуро-Оки) цунами 17 июня 1973 г. В *“Эволюция цунами от очага до выхода на берег”*. Радио и связь, М., 1982, 16–24.
- [27] ГУСЯКОВ В. К., ЧУБАРОВ Л. Б. Численное моделирование возбуждения и распространения цунами в прибрежной зоне. *“Изв. АН СССР. Сер. Физика земли”*, М., 1987, №11, 53–64.
- [28] КАРЕВ В. Ю., СИМОНОВ К. В., ЧУБАРОВ Л. Б., ШОКИН Ю. И. Вычислительный эксперимент в проблеме цунами. Детальное цунамирайонирование тихоокеанского побережья Камчатки. В *“Исследования цунами”*, №4, 1990, М., 64–84.
- [29] ЛАВРЕНТЬЕВ М. А. До теории довгих хвиль. *Зб. Праць Инст. Мат. АН УССР*, №8, 1946, 13–69.
- [30] ЛАВРЕНТЬЕВ М. А., ШАБАТ Б. В. *Проблемы гидродинамики и их математические модели*. Наука, М., 1973.
- [31] ЛАВРЕНТЬЕВ М. М. *О некоторых некорректных задачах математической физики*. Изд. СО АН СССР, Новосибирск, 1962.
- [32] ЛОБОВ В. В., ЧЕРНЫШЕВ В. М. К задаче возбуждения волн при различных начальных условиях. В: *“Распространение и набегание на берег волн цунами”*. Наука, М., 1981, 69–72.
- [33] МАРЧУК АН. Г. Один метод расчета генерации и распространения волн цунами в бассейне переменной глубины. В *“Модульный анализ”*, Изд. ИТПМ СО АН СССР, Новосибирск, 1978, 42–47.
- [34] МАРЧУК АН. Г., ГРОШЕВ Е. Б., ЧУБАРОВ Л. Б. Численное моделирование поведения волн цунами в шельфовой зоне. В *“Исследование цунами”*, Наука, М., №1, 1986, 94–102.
- [35] МАРЧУК АН. Г., ЧУБАРОВ Л. Б., ШОКИН Ю. И. *Численное моделирование волн цунами*. Наука, Сиб. отд-ние, Новосибирск, 1983.
- [36] НОВИКОВ В. А., ФЕДОТОВА З. И., КУЗЬМИЧЕВА Т. В. О некоторых проблемах моделирования наката длинных волн на берега сложных очертаний. В *“Вычисл. технологии”*, ИВТ СО РАН, Новосибирск, 2, №4, 1993, 196–209.
- [37] ПОДЪЯПОЛЬСКИЙ Г. С. Возбуждение длинной гравитационной волны в океане сейсмическим источником в коре. *Физика Земли*, №1, 1968, 7–24.
- [38] СОЛОВЬЕВ С. Л. Основные данные о цунами на Тихоокеанском побережье СССР, 1737–1976 гг. В *“Изучение цунами в открытом океане”*, Наука, М., 1978, 61–136.

- [39] СОЛОВЬЕВ С. Л., ГО Ч. Н. *Каталог цунами на восточном побережье Тихого океана*. Наука, М., 1975.
- [40] СОЛОВЬЕВ С. Л., ГО Ч. Н. *Каталог цунами на западном побережье Тихого океана*. Наука, М., 1974.
- [41] СОЛОВЬЕВ С. Л., ГО Ч. Н., КИМ Х. С. *Каталог цунами в Тихом океане, 1969–1982 гг.* М., 1986.
- [42] *Сообщение о научных работах по цунами, 1975–1978 гг.* Под ред. С. Л. Соловьева. М., 1979.
- [43] *Сообщение о научных работах по цунами в СССР в 1979–1982 гг.* Под ред. С. Л. Соловьева. М., 1983.
- [44] *Сообщение о научных работах по сейсмологии и физике недр Земли. Цунами. 1983–1986 гг.* Под ред. С. Л. Соловьева. М., 1987.
- [45] СУДАКОВ А. Н., ЧУВАРОВ Л. Б., ШОКИН Ю. И. Программно-аппаратный комплекс для автоматизации действий службы предупреждения о цунами. В *“Вычисл. технологии”*, ИВТ СО РАН, Новосибирск, **2**, №7, 1993, 174–192.
- [46] СУДОБИЧЕР В. Г., ШУГРИН С. М. Движения потока воды по сухому руслу. *Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук*, вып. 3, №13, 1968, 116–122.
- [47] СУНЬ ЦАО. О волноводе поверхностных волн в тяжелой жидкости. *Там же*, №5, 1959, 20–25.
- [48] ФЕДОТОВА З. И. О применении инвариантной разностной схемы к расчету колебаний жидкости в бассейне. *Числ. методы механики сплошной среды*, **9**, №3, Новосибирск, 1978, 137–146.
- [49] ФЕДОТОВА З. И. О свойствах разностных схем для длинноволновых приближений уравнений гидродинамики. В *“Вычисл. технологии”*, ИВТ СО РАН, Новосибирск, **2**, №7, 1993, 237–249.
- [50] ФЕДОТОВА З. И., ПАШКОВА В. Ю. Вариационные формулировки и законы сохранения для слабонелинейных уравнений с дисперсией. *Там же*, **4**, №11, 1995, 250–259.
- [51] ФРАНК А. М. Полностью консервативный численный алгоритм для дискретных моделей несжимаемой жидкости. *Моделир. в механике*, **1(18)**, №5, 1987, 134–144.
- [52] ФРАНК А. М. Численное моделирование уединенных поверхностных волн в рамках дискретной модели несжимаемой жидкости. *ПМТФ*, №3, 1989, 95–101.
- [53] ХАКИМЗЯНОВ Г. С. Численное моделирование косоугольного взаимодействия уединенной волны с вертикальной стенкой. *Моделир. в механике*, **6(23)**, №1, 1992, 141–146.
- [54] ЦУНАМИ. Библиографический указатель литературы на русском и иностранном языках за 1884–1973 гг., имеющейся в фондах библиотеки СахКНИИ ДВНЦ АН СССР. СахКНИИ ДВНЦ АН СССР, Новоалександровск, 1975.
- [55] ЧУВАРОВ Л. Б. О некоторых численных моделях распространения длинных волн в жидкости при наличии ледяного покрова. В *“Числ. анализ”*, Новосибирск, 1978, 99–110.



- [56] Шокин Ю. И., Ривин Г. С., ХАКИМЗЯНОВ Г. С., ЧУБАРОВ Л. Б. Вычислительный эксперимент как инструмент для исследования природных явлений. В *Вычисл. технологии*. ИВТ СО РАН, Новосибирск, **1**, №3, 1992, 12–33.
- [57] Шокин Ю. И., РУЗИЕВ Р. А., ХАКИМЗЯНОВ Г. С. Численное моделирование плоских потенциальных течений жидкости с поверхностными волнами. *Препринт №12*, Вычисл. центр, Красноярск, 1990.
- [58] Шокин Ю. И., ХАКИМЗЯНОВ Г. С. Конечно-разностный метод расчета вихревых и потенциальных течений жидкости со свободной поверхностью. В *“Вычисл. технологии”*, ИВТ СО РАН, Новосибирск, **3**, №8, 1994, 133–142.
- [59] Шокин Ю. И., ЧУБАРОВ Л. Б., ГУСЯКОВ В. К., ФЕДОТОВА З. И., МАРЧУК АН. Г. О комплексе программ для численного моделирования цунами. В *“Модульный анализ”*, ИТПМ, Новосибирск, 1978, 73–100.
- [60] Шокин Ю. И., ЧУБАРОВ Л. Б., МАРЧУК АН. Г., КОБКОВ В. В., ФЕДОТОВА З. И. Численное моделирование процессов генерации и распространения цунами при подводном землетрясении. *Препринт №31*, ИТПМ СО АН СССР, Новосибирск, 1980.
- [61] Шокин Ю. И., ХАКИМЗЯНОВ Г. С. Конечно-разностный метод расчета трехмерных потенциальных течений жидкости со свободной поверхностью. В *“Вычисл. технологии”*, ИВТ СО РАН, Новосибирск, **1**, №1, 1992, 154–176.
- [62] Шокин Ю. И., ЧУБАРОВ Л. Б. О программной реализации методик численного моделирования цунами. В *“Вопросы разработки и эксплуатации пакетов прикладных программ”*, ИТПМ СО АН СССР, Новосибирск, 1981, 33–44.
- [63] Шокин Ю. И., ЧУБАРОВ Л. Б. Численное моделирование распространения цунами. В *“Числ. анализ”*, ИТПМ СО АН СССР, Новосибирск, 1978, 119–128.
- [64] Шокин Ю. И., ЧУБАРОВ Л. Б., МАРЧУК АН. Г., СИМОНОВ К. В. *Вычислительный эксперимент в проблеме цунами*. Наука, Сиб. отд-ние, Новосибирск, 1989.
- [65] ШУГРИН С. М. Двумерные (плановые) неустановившиеся течения воды. В *“Динамические задачи механики сплошных сред”*, ИГД СО АН СССР, Новосибирск, вып. 35, 1978, 141–172.
- [66] ЯНУШАУСКАС А. И. Возбуждение волн подводными источниками переменной интенсивности. В *“Методы расчета возникновения и распространения цунами”*, Наука, М., 1978, 100–110.
- [67] ЯНУШАУСКАС А. И. Колебания жидкого слоя, вызываемые кратковременными подвижками дна. В *“Теорет. и экспериментальные исслед. по проблеме цунами”*, Наука, М., 1977, 7–17.
- [68] ЯНУШАУСКАС А. И. Возбуждение волн подвижками дна конечной длительности. В *“Эволюция цунами от очага до выхода на берег”*, Радио и связь, М., 1982, 25–29.
- [69] ЯНУШАУСКАС А. И. Возбуждение волн подвижками дна на поверхности безбрежного водоема конечной глубины. В *“Распространение и набегание на берег волн цунами”*, Наука, М., 1981, 58–66.

- [70] ЯНУШАУСКАС А. И. Приближенная модель возбуждения цунами. В *“Аналитические методы в теории эллиптических уравнений”*, Наука, Новосибирск, 1982, 160–167.
- [71] ЯНУШАУСКАС А. И. Теория Коши — Пуассона для сжимаемой жидкости. В *“Распространение и набегание на берег волн цунами”*, Наука, М., 1981, 41–55.
- [72] ALEXEEV A. S., GUSYAKOV V. K., CHUBAROV L. B., SHOKIN YU. I. Numerical simulation of tsunami generation and propagation in the ocean with a real bathymetry. Nonlinear model. *Symp. on Tsunamis*, Mexico, 1977. Marine Sciences Directorate, Ottawa, 1978, 37–51.
- [73] ALEXEEV A. S., GUSYAKOV V. K. Numerical simulation of tsunami generation and propagation in the ocean with a real bathymetry. *Waves on Water of Variable Depth: Lecture Notes in Physics*, V. 64, Springer-Verlag, Canberra — Berlin, 1977, 63–71.
- [74] BARAKHNIN V. B., KHAKIMZYANOV G. S. Adaptive grid numerical solution of unidimensional and two-dimensional problems for the shallow-water equations. *Advanced Mathematics: Computations and Applications*. Proc. of AMCA-95. Novosibirsk, 1995, 144–153.
- [75] BARAKHNIN V. B., KHAKIMZYANOV G. S. On the application of adaptive grids to the numerical solution of one-dimensional problems in the shallow water theory. *Russian J. Numer. Anal. Math. Modelling*, **10**, №5, 1995, 373–391.
- [76] CARRIER G. F. The dynamics of tsunamis. Mathematical problems in the geo-physical sciences. *Lecture in Applied Mathematics*, **13**, 1971, 157–187.
- [77] CHAWLA R. G. Tsunamis. A selected bibliography. Manuscript Rep. Ser., No. 51, 1978.
- [78] CHUBAROV L. B., FEDOTOVA Z. I., SHKUROPATSKII D. A. Investigation of wave characteristics induced by tsunami wave entering enclosed water areas. *Science of Tsunami Hazards*, **15**, No. 1, 1997, 49–63.
- [79] CHUBAROV L. B., FEDOTOVA Z. I., SHKUROPATSKII D. A. Investigation of computational models of long surface waves in the problem of interaction of a solitary wave with a conic island. *Russian J. Numer. Anal. Math. Modelling*, **13**, No. 4, 1998, 289–306.
- [80] CHUBAROV L. B., FEDOTOVA Z. I., SHOKIN YU. I. Boussinesque-type 2D models for the solution of test problems on the long-wave interaction with an obstacle. *Proc. of the Fourth European Comput. Fluid Dynamics Conf.* Athens, 1998, 89–94.
- [81] CHUBAROV L. B., SHKUROPATSKII D. A. Nonlinear-Dispersive Shallow-water Models of High Order Approximation. *Intern. J. of Comput. Fluid Dynamics*, **10**, No. 2, 1998, 91–100.
- [82] CHUBAROV L. B., SHOKIN YU. I. Mathematical modeling in mitigating the hazardous effect of tsunami waves in the ocean. A priori analysis and timely on-line forecast. *Science of Tsunami Hazards. Intern. J. of the Tsunami Soc.*, **13**, No. 1, 1995, 27–44.

- [83] CHUBAROV L. B., SHOKIN YU. I. The Numerical modeling of long-wave propagation in the framework of nonlinear dispersion models. *Computers and Fluids*, **15**, No. 3, 1987, 229–249.
- [84] CHUBAROV L. B., SHOKIN YU. I., KHAKIMZYANOV G. S. New potentialities of computational experiment in tsunami problem. *Fluid Dynamics*, Springer, Berlin et al., 1995, 53–61.
- [85] CHUBAROV L. B., SHOKIN YU. I., SIMONOV K. V. Using numerical modelling to evaluate tsunami hazard near the Kuril island. *Natural Hazards*, **5**, No. 3, 1992, 293–318.
- [86] CHUBAROV L. B., SHOKIN YU. I. Finite-difference simulation of tsunami propagation. *Theor. and Experim. Fluid Mechanics*, Mir, Moscow, 1979, 599–606.
- [87] CHUBAROV L. B., SHOKIN YU. I. The numerical modelling of long wave propagation in the framework of nonlinear dispersion models. *Computers and Fluids*, V. 15, No. 3, 1987, 229–249.
- [88] CHUBAROV L. B., SHOKIN YU. I., SUDAKOV A. N. Software and hardware support for tsunami service. *Proc. Intern. Tsunami Symp. TSUNAMI 93*, Wakayama, 1993, 821–834.
- [89] FEDOTOVA Z. I., KUZMICHJOVA T. V., LAPPO A. D., NOVIKOV V. A., NUDNER I. S., URUSOV A. I., ZAVYALOV V. K. Numerical and experimental simulation of propagation of long waves and their run-up on sloping shores. *Scientific Siberia, Ser. A. Numerical and Data Analysis*. AMSE-Press, **11**, 1994, 18–26.
- [90] FEDOTOVA Z. I., PASHKOVA V. YU. On the Numerical modelling of the dynamics of the weakly nonlinear waves with dispersion. *Russian J. Numer. Anal. Math. Modeling*, **10**, №5, 1995, 407–424.
- [91] GUSYAKOV V. K., CHUBAROV L. B. Numerical modelling of generation and propagation of tsunamis in the coastal zone. *Proc. Intern. Tsunami Symp., 1985, Institute of Ocean Sciences*, Sydney, British Columbia, 1985, 283–291.
- [92] GUSYAKOV V. K., CHUBAROV L. B. Tsunamis and earthquake mechanisms in the island arc regions. *Science of Tsunami Hazards*, **3**, No. 1, 1985, 3–21.
- [93] GUSYAKOV V. K., CHUBAROV L. B., SHOKIN YU. I. Numerical simulation of the 1973 Shikotan (Nemuro-Oki) tsunami. *Computer and Fluids*, **12**, No. 2, 1983, 123–132.
- [94] ISAEV V. G., NOVIKOV V. F., CHUBAROV L. B. Method of MAC-type for simulation of surface waves transformation over the arbitrary bottom. *Modelling, Measurement and Control*, C, **32**, No. 4, 1992, 57–63.
- [95] KHAKIMZYANOV G. S. Adaptive grid modelling of near-coast surface waves. *Advanced Mathematics: Computations and Applications*. Proc. of AMCA-95. Novosibirsk, 1995, 195–203.
- [96] MARCHUK AN. G., CHUBAROV L. B., SHOKIN YU. I. Numerical modelling of tsunami waves. *LA-Tr-85-40*, USA, 1985.
- [97] MARCHUK AN. G., CHUBAROV L. B., SHOKIN YU. I. Numerical simulation of tsunamis. In “*Numerical methods in fluid dynamics*”, Mir, Moscow, 1984, 159–183.

- [98] MARCHUK AN. G., CHUBAROV L. B., SHOKIN YU. I. To the numerical simulation of generation and propagation of tsunami according to the shallow-water equations. *Lecture Notes in Physics*, **90**, 1979, 487–491.
- [99] NOVIKOV V. A., FEDOTOVA Z. I. Some problems of numerical simulation of long waves dynamics in bays. *Modelling, Measurement, Control*, C, AMSE Press, **37**, No. 4, 1993, 27–48.
- [100] NOVIKOV V. A., SUDAКOV A. N., CHUBAROV L. B., SHOKIN YU. I. Calculations of tsunami travel time charts in the Pacific Ocean. *Science of Tsunami Hazards*, **5**, No. 2, 1987, 85–115.
- [101] PREISENDORFER W. Recent tsunami theory. *Report HIG-71-15*, Honolulu, 1971.
- [102] PUBLICATIONS. Hawaii Institute of Geophysics. Honolulu, 1975.
- [103] SHOKIN YU. I. Numerical modelling of fluid flows with surface waves. *Russian J. Numer. Analysis Math. Modelling*, **10**, No. 3, 1995, 233–253.
- [104] SHOKIN YU. I., CHUBAROV L. B., FEDOTOVA Z. I., PASHKOVA V. YU., SHKUROPATSKII D. A. Hydro-dynamic models of long waves interaction with islands. 7th Intern. Conf. on Natural & Man-Made Hazards: Abstracts and Program, 1998, 141–142.
- [105] SHOKIN YU. I., KHAKIMZYANOV G. S. A finite-difference method for calculating surface waves in coastal zone. *Russian J. Numer. Analysis Math. Modelling*, **8**, №6, 1993, 461–480.
- [106] SHOKIN YU. I., KHAKIMZYANOV G. S. Finite-difference method for potential and vortex fluid flows with a free surface. *Proc. of the 5th Intern. Symp. on Comput. Fluid Dynamics*, Sendai, **3**, 1993, 121–128.
- [107] SHOKIN YU. I., KHAKIMZYANOV G. S. Numerical modelling of surface waves near the coast. *Proc. of the First Asian Comput. Fluid Dynamic Conf.*, Hong Kong, **3**, 1995, 865–871.
- [108] SHOKIN YU. I., MARCHUK AN. G., CHUBAROV L. B. To the numerical simulation of tsunami according to the shallow-water equations. *Lecture Notes in Physics*, **90**, 1979, 487–491.
- [109] SHOKIN YU. I., NOVIKOV V. A., SIMONOV K. V., CHUBAROV L. B. Construction of a Local Tsunami Warning System Based on Computing Experiments. Tsunamis: Their Science and Hazard Mitigation. *Proc. of the Int. Tsunami Symp.*, ВЦ СОАН СССР, Новосибирск, 1990, 254–259.
- [110] SHOKIN YU. I., SIMONOV K. V., SUDAКOV A. N., CHUBAROV L. B. On the Atlas of Tsunami Travel Time Charts for the Tsunami Warning System in the Pacific. *Ibid.*, 54–59.
- [111] SIMONOV K. V., CHUBAROV L. B., SHOKIN YU. I. A computer experiment in tsunami problem. *Proc. Intern. Tsunami Symp.*, Vancouver, 1988, 147–178.