

Российская академия наук  
Сибирское отделение  
Институт вычислительных технологий

"УТВЕРЖДАЮ"  
Директор ИВТ СО РАН

академик \_\_\_\_\_ Ю. И. Шокин

15 ноября 2009 года

**Руководящий документ**  
**«Оценка максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах**  
**побережья Дальнего Востока Российской Федерации»**  
**(Проект)**

**ИТОГОВЫЙ ОТЧЕТ**  
**на выполнение НИОКР для государственных нужд по**  
**Федеральной целевой программе**  
**"Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций**  
**природного и техногенного характера**  
**в Российской Федерации до 2010 года "**  
**(контракт № 1н-09 от 09 февраля 2009 г.)**

Руководитель работ

г.н.с., д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_ Л. Б. Чубаров

Новосибирск, 2009 г

Исполнители:

д.ф.-м.н.

инженер-исследователь

аспирант НГУ

В.К.Гусяков

С.А.Бейзель

В.В.Бабайлов

## Содержание

Содержание .....	3
Введение .....	4
Общая характеристика методики .....	4
Сейсмотектонические модели Курило-Камчатского региона .....	6
Общая сейсмотектоническая характеристика исследуемой акватории .....	6
Характерные типы цунамигенных землетрясений в исследуемой акватории .....	7
Описание вычислительных алгоритмов .....	10
Алгоритм расчета начальных смещений в очаге цунами .....	10
Модель очага .....	10
Данные, необходимые для расчетов начальных смещений в очагах цунами .....	12
Алгоритмическая реализация модели генерации волн цунами .....	12
Алгоритмическое обеспечение расчета динамических характеристик цунами .....	13
Некоторые отличительные особенности программного компонента .....	14
Структура программы .....	15
Экономичные вычислительные технологии для повышения точности моделирования с использованием расчетных областей различной детальности .....	19
Общая характеристика проблемы .....	19
Два алгоритмических способа решения проблемы .....	20
Методика проведения большого объема численных экспериментов с использованием программного комплекса MassGlobalCalcul на многопроцессорных ЭВМ .....	23
Перечень специальных терминов .....	23
Основные стратегии .....	23
Организация одновременных расчетов .....	24
Особенности программ комплекса MassGlobalCalcul .....	25
Автоматизация одновременных расчетов .....	25
Предварительные результаты распараллеливания алгоритма .....	26
Общая характеристика управляющего программного комплекса .....	26
Информационное обеспечение проекта .....	27
Локальная база данных .....	28
Файловый состав папки хранилища .....	30
Импорт данных .....	31
Программное обеспечение для доступа к информации .....	31
Форматы данных .....	32
Бинарный формат grd-файла .....	33
Текстовый формат для экспорта распределений высот волн цунами (dat-файлов) .....	33
Формат файлов настроек утилит (ini-файлов) .....	33
Формат файлов мареограмм (dat-файлов) .....	34
Результаты испытания методики моделирования воздействия удаленных цунами на защищаемые участки побережья .....	34
Литература .....	36

## **Введение**

Итоговый отчет, согласно календарному плану и техническому заданию, посвящен разработке руководящего документа «Оценка максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации».

## **Общая характеристика методики**

Методика выполнения работ включает следующие технологические этапы.

1. Утверждение перечня защищаемых пунктов.
2. Определение акватории, прилегающей к защищаемому побережью и содержащей зоны возможных цунамигенных землетрясений.
3. Определение точек установки расчетных мареографов, отождествляемые с каждым из защищаемых пунктов. Эти мареографы устанавливаются в ближайших к защищаемым пунктам прибрежных точках. Работа в этой части выполняется путем сопоставления экспертных оценок с применением «внешнего» программного обеспечения из класса геоинформационных систем.
4. На основе изучения сеймотектонической обстановки расчетной области определяется схема возможного размещения модельных землетрясений.
5. Разрабатывается и утверждается совокупность модельных цунамигенных землетрясений, основанная на модели Подъяпольского-Гусякова-Окады. Эта работа также выполняется с привлечением дополнительных экспертных оценок.
6. Адаптируется система вычислительных и общесистемных алгоритмов для расчета начальных возмущений свободной поверхности, порожденных модельными землетрясениями.
7. Выполняется модификация вычислительных алгоритмов для расчета трансформации волн цунами от области источника возмущения вплоть до линии берега, эта модификация включает адаптацию к особенностям рельефа дна акватории и к особенностям геометрии береговых границ. Совокупность вычислительных алгоритмов включает различные их версии, используемые для оценки адекватности результатов моделирования и степени их устойчивости относительно учета донного и поверхностного трения, сферичности Земли, дивергентной и недивергентной формы записи уравнений математической модели, учета нелинейных эффектов и т.п.

8. Создается система управляющих алгоритмов, обеспечивающая организацию и проведения серийных расчетов распространения волны цунами.

9. Реализуется система управления данными, обеспечивающая обработку «сырых» расчетных материалов – мареограмм, по которым определяются:

- **для каждого модельного землетрясения**

- максимальные значения уровня свободной поверхности в каждом защищаемом пункте,

- минимальные значения уровня свободной поверхности в каждом защищаемом пункте,

- размах волны – полусуммы максимальных и минимальных значений уровня в каждом защищаемом пункте;

Для каждого землетрясения определяются времена прихода максимума и минимума амплитуд волн (по всем защищаемым пунктам), а также имена (индексы) защищаемых пунктов, в которых эти значения были определены.

- **для каждого защищаемого пункта**

- максимальные значения уровня свободной поверхности, порожденные каждым модельным землетрясением,

- минимальные значения уровня свободной поверхности, порожденные каждым модельным землетрясением,

- размах волны – полу суммы максимальных и минимальных значений уровня, порожденные каждым модельным землетрясением;

Для каждого защищаемого пункта определяются времена наступления максимума и минимума, а также имена (индексы) землетрясений, породивших эти экстремальные значения.

База данных и поставляемое Программное обеспечение являются фрагментом информационной системы и обеспечивают просмотр результатов расчетов для фиксированного набора защищаемых пунктов, фиксированного набора модельных землетрясений, фиксированной расчетной области, соответствующей расчетной сетки с равными шагами по обоим пространственным переменным, фиксированного набора параметров вычислительного алгоритма, фиксированных математических моделей расчета начального возмущения и динамических характеристик трансформирующейся в ходе распространения волны.

## **Сейсмотектонические модели Курило-Камчатского региона**

Результаты численного моделирования возбуждения цунами в рамках так называемой «упругой модели» показывают, что наиболее важными с точки зрения возбуждения цунами параметрами источника являются его **глубина** и **механизм** (в частности, *направление подвижки в плоскости разрыва*). В то же время такие параметры, как угол падения плоскости разрыва, скорость его распространения, время нарастания подвижки оказывают гораздо меньшее влияние на амплитуды цунами в эпицентральной области. Эти выводы находят подтверждение при анализе фактических данных об очагах цунамигенных землетрясений Курило-Камчатского и других цунамигенных регионов Тихого океана.

### ***Общая сейсмотектоническая характеристика исследуемой акватории***

Непосредственную угрозу цунами для восточного побережья Камчатки и Курильских островов представляют очаги мелкофокусных подводных землетрясений, расположенные в основной Курило-Камчатской сейсмотектонической зоне, которая протягивается вдоль всего восточного побережья Курильских островов и Камчатки и располагается между внешним краем шельфа и осью глубоководного желоба. На севере эта зона примыкает к Алеутско-Аляскинской сейсмической зоне, подходящей к ней под прямым углом в районе полуострова Камчатский, образуя здесь сложный сейсмотектонический узел стыка трех плит – Тихоокеанской, Северо-Американской и Охотской. На юге Курило-Камчатская зона плавно (при небольшом угловом несогласии) сочленяется с Японской сейсмоактивной зоной в районе пролива Цугару, разделяющего острова Хоккайдо и Хонсю. Общая протяженность зоны составляет около 2300 км при средней ширине порядка 150 км. За время исторических наблюдений (с 1737 года по настоящее время) в этой зоне произошло 89 цунамигенных землетрясений, среди которых были сильнейшие Камчатские землетрясения 1737 и 1952 годов с магнитудами  $M_w$  более 8.5, породившие разрушительные цунами с высотами более 20 метров. В центральной и южной частях Курило-Камчатской зоны землетрясений с таким большими магнитудами не наблюдалось. Сильнейшие цунамигенные землетрясения, происшедшие здесь в 1848, 1918, 1958, 1963, 1969 и 2007 годах, имели магнитуды  $M_w$  в диапазоне 8.1 – 8.4. Максимальные высоты цунами от них на ближайших участках побережья составляли 12 – 15 метров.

## **Характерные типы цунамигенных землетрясений в исследуемой акватории**

Согласно широко распространенному представлению, вытекающему из концепции тектоники плит, сейсмические процессы в периферийных частях Тихого океана обусловлены поддвигом океанической плиты под континентальную в зонах островных дуг и активных континентальных окраин. Типичным примером такой зоны является Курильская островная дуга. Очаги мелкофокусных землетрясений располагаются здесь в широкой полосе, протягивающейся от глубоководного желоба до фронтальной невулканической гряды, морфологически выраженной хребтом Витязя в центральной и северной частях зоны и Малой Курильской грядой в ее южной части. Собственно наклонная фокальная зона (зона Заварицкого-Беньофа), падающая под континент под углом  $45^\circ - 60^\circ$ , формируется ниже глубины 50 – 100 км, смещена от оси желоба в сторону островной дуги и хорошо прослеживается лишь до глубин 200 – 300 км (Балакина, 1979; Тараканов, Ким, 1980). Основное представление о сейсмичности, вытекающее из этой схемы, состоит в том, что очаги землетрясений должны располагаться на границе между погружающейся океанической и надвигающейся континентальной литосферой, а плоскости разрывов в очагах сильных землетрясений ориентированы вдоль этой границы, причем направление подвижек в очагах соответствует направлению относительного перемещения плит, то есть преобладающим механизмом в очагах должен быть пологий надвиг.

На основании сейсмических данных механизм очагов определяется с точностью до двух равновероятных плоскостей, перпендикулярных друг другу. Какая из них реализуется в очаге землетрясения – этого по сейсмическим данным сказать нельзя, поэтому необходимо использовать дополнительную информацию. Иногда выбор можно сделать, учитывая простирание обеих плоскостей и сеймотектонические особенности зоны. Однако, если говорить об очагах землетрясений в Курило-Камчатской зоне, то для них, как правило, оказывается, что одна из плоскостей ориентирована вдоль дуги и круто падает под океан, вторая, в среднем с таким же простиранием, имеет пологое падение под континент (Балакина, 1972, 1979). Следовательно, идентификация одной из плоскостей в качестве истинной требует выбора типа механизма между крутым взбросом и пологим надвигом.

Сторонники плитовой тектоники делают этот выбор обычно в пользу надвига, полагая, что разрывы в очагах развиваются вдоль зоны субдукции, отделяющей океаническую литосферу от континентальной. Противники этой концепции делают выбор чаще всего в пользу взбросов, основываясь, как правило, на лучшем совпадении

простирается крутой плоскости с простираем островной дуги. При этом подчас привлекаются данные о цунами, например, анализ знаков первых смещений в головной волне (Hatori, 1974), а также делаются ссылки (например, в работах Балакина, 1979; Лобковский, Сорохтин, 1980) на результаты теоретических расчетов, показывающих, что цунами наибольшей интенсивности должны возбуждаться субвертикальными взбросами. Однако, как отмечалось выше, наибольшая разница в амплитудах цунами существует между взбросами и сдвигами, уменьшение же угла падения, переводящее подвижку из взброса в надвиг, лишь в очень небольшой мере влияет на амплитуды цунами.

Пологий надвиг оказывается почти идентичен крутому взбросу и по отношению к картине остаточных смещений дна. Хотя детали несколько различны, общая картина поля смещений одинакова – континентальное крыло (при ориентации разрывов вдоль островной дуги) оказывается опущенным, океаническое крыло – приподнятым, причем поднятие по амплитуде примерно в 2.5 раза превышает опускание. Как следствие, мареограммы, вычисленные для обоих источников с учетом реальной топографии дна в Курило-Камчатском регионе, оказываются одинаковыми как по знакам первых вступлений, так и по амплитуде. Это говорит о том, что источники, неразличимые по сейсмическим данным, являются неразличимыми и по отношению к цунами.

Несмотря на неопределенность в выборе истинной плоскости разрыва, система напряжений, обеспечивающая подвижки по возможным плоскостям, устанавливается на основании тех же сейсмических данных однозначно. При этом оказывается (Балакина, 1972), что в зонах островных дуг (в том числе Курильской) напряжения сжатия близгоризонтальны и ориентированы преимущественно ортогонально простираению дуги, напряжения же растяжения в большинстве случаев являются субвертикальными. Такая система напряжений согласуется в целом с концепцией поддвига плит и приводит к взбросам по крутым (либо надвигам по пологим) плоскостям разрывов, ориентированных вдоль островной дуги. Гораздо реже встречаются случаи, когда вертикальным оказывается промежуточное напряжение, а напряжения сжатия и растяжения близгоризонтальны и ориентированы, соответственно, вкрест и вдоль простираения дуги. Эта система напряжений должна приводить к землетрясениям со сдвиговыми подвижками по плоскостям, секущим островную дугу. Время от времени такие землетрясения действительно происходят, их положение хорошо увязывается с выявленными поперечными разломами, рассекающими островные дуги на отдельные сегменты (Аверьянова, 1968). Для Курило-Камчатской зоны, например, положение поперечных разломов часто совпадает с проливами между крупными островами (Удинцев, 1962).

Наличие в очагах мелкофокусных курильских землетрясений крупных разрывов с падением под океан, а также разрывов со сдвиговым механизмом, секущим островную дугу, находит свое объяснение в рамках геодинамической модели поддвига, разработанной в Институте океанологии РАН (Лобковский, Сорохтин, 1979, 1980; Лобковский, Баранов, 1982). Не останавливаясь подробно на всех особенностях этой модели, отметим только те ее аспекты, которые касаются механизма цунамигенных землетрясений.

В основе обсуждаемой модели лежит концепция поддвига океанической плиты под островные дуги и активные континентальные окраины. При этом считается, что мелкофокусная сейсмичность фронтальной области островной дуги обусловлена взаимодействием поддвигаемой океанической плиты с перекрывающим ее островодужным выступом, простирающимся от глубоководного желоба до невулканической гряды, в районе которой погружающаяся плита испытывает резкий излом за счет развития в ее теле сдвиговых пластических деформаций. Это взаимодействие осуществляется вдоль узкой контактной зоны трения между поддвигаемой плитой и покрывающим ее литосферным выступом. В этой зоне происходят сильные землетрясения (с преимущественно поддвиговым типом механизма.

Однако в рамках данной модели оказывается возможным и другой тип механизма. Расчетные данные (Лобковский, Сорохтин, 1979) и физическое моделирование (Лобковский и др., 1980) показывают, что литосферный выступ под действием напряжений, возникающих на его подошве в процессе поддвига океанической плиты, будет деформироваться и разрушаться с образованием разрывов, круто падающих под океан, по которым должны происходить подвижки взбросового типа.

В соответствии с этой схемой в работе (Лобковский, Баранов, 1982) выделяется три типа цунамигенных землетрясений:

- «смешанный», характеризующийся практически одновременными подвижками по обоим возможным плоскостям (пологий надвиг и крутой взброс);
- связанный с подвижкой типа надвига по пологой зоне контакта между плитами;
- связанный с взбросовой подвижкой по одному из крутых разломов, рассекающих островодужный выступ.

Как отмечалось выше, оба основных механизма (пологий надвиг и крутой взброс) создают примерно одинаковые вертикальные смещения дна в эпицентральной области. То же самое верно и в отношении горизонтальной компоненты смещения: взбросовая подвижка по крутопадающему в сторону океана разрыву также вызывает смещение континентального склона в сторону океана и, следовательно, также может

рассматриваться в качестве источника типа «доски». Различия между этими двумя типами очагов проявляются, прежде всего, в средней глубине источников – для третьего типа она всегда как минимум вдвое больше, чем для второго. Кроме того, для взбросовой подвижки весьма вероятным является выход разрыва на дно океана, что должно приводить к более полному снятию накопленных напряжений и большим остаточным смещениям.

Рассматриваемая геодинамическая модель дает объяснение и сдвиговым землетрясениям, при которых одна из возможных плоскостей разрыва является секущей по отношению к островной дуге. Многочисленные сейсмические, геологические и геоморфологические данные (Аверьянова, 1968; Балакина, 1979; Гнибиденко и др., 1980; Тараканов, Ким, 1980) свидетельствуют о наличии системы поперечных разломов, разбивающих островодужный выступ на ряд сегментов, относительно независимых друг от друга. Эта сегментированность островной дуги хорошо увязывается с концепцией сейсмических брешей, выдвинутой в работах (Федотов, 1965, 1968). Согласно этой концепции, активная стадия жизни сейсмической бреши, включающая момент упора сегмента в невулканическую гряду, быстрого нарастания смещения в нем, срыва и последующего выдвигания в океан, должна характеризоваться вспышкой сначала форшоковой, затем афтершоковой активности по ограничивающим сегмент поперечным разрывам, причем подвижки по ним должны иметь преимущественно сдвиговый характер (Лобковский, Баранов, 1982).

## **Описание вычислительных алгоритмов**

### ***Алгоритм расчета начальных смещений в очаге цунами***

Согласно распространенному представлению, сеймотектонические цунами вызываются вертикальными смещениями морского дна, происходящими во время подводного землетрясения на больших площадях. В большинстве случаев фактические деформации скрыты толщей воды и труднодоступны для непосредственных измерений. В такой ситуации теоретически рассчитанные остаточные смещения от соответствующей модели очага землетрясения с параметрами, полученными из сейсмических наблюдений, могут быть использованы в качестве начальных данных в программах расчета распространения цунами.

### **Модель очага**

Сравнительный анализ различных моделей возбуждения цунами (Гусяков, Марчук, 1993) привел к выводу о том, что так называемая "поршневая модель" является вполне адекватной для расчета возбуждения цунами в случаях, когда в этот процесс не

вовлекается какой-либо вторичный механизм типа подводного оползня или берегового обвала.

Поршневая модель основана на решении уравнений статической теории упругости для однородного полупространства с внутренним распределенным источником дислокационного типа. Задача сводится к решению уравнения равновесия

$$(\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} \bar{\mathbf{U}} + \mu \Delta \bar{\mathbf{U}} + \bar{\mathbf{F}} = 0 \quad (1)$$

при нулевых напряжениях на свободной границе упругого полупространства (при  $z=0$ )

$$\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0. \quad (2)$$

Здесь  $\bar{\mathbf{U}}(x, y, z)$  – вектор смещения частиц среды относительно начального напряженного состояния,  $\mu$  и  $\lambda$  – параметры Ляме упругой среды,  $\bar{\mathbf{F}}$  – приложенная сила, отнесенная к единице объема. Решение задачи (1) – (2) строится для единичной вертикальной и горизонтальной сосредоточенной силы, затем делается переход к дипольным силовым источникам, моделирующим подвижку по бесконечно малому элементу разрыва. Далее решение обобщается на случай пространственного источника дислокационного типа, характеризующегося длиной плоскости разрыва  $L$ , ее шириной  $W$ , глубиной верхнего края разрыва  $h_0$ , углом падения плоскости разрыва  $\delta$ , направлением подвижки в этой плоскости  $\lambda$  и величиной смещения противоположных берегов разрыва  $D_0$ .

В качестве меры интенсивности такого источника используется величина его сейсмического момента

$$M_0 = \mu \cdot L \cdot W \cdot D_0, \quad (3)$$

где  $\mu$  – модуль поперечной жесткости среды, которому по известному корреляционному соотношению (Аки, 1972) может быть сопоставлена величина его магнитуды.

Создаваемые таким источником деформации дна  $U_z(x, y)$  рассчитываются по программе, описанной в (Гусяков, 1978), и используются в качестве начальных данных (смещения свободной поверхности) для программы расчета распространения цунами в океане с реальным рельефом дна.

Смещения дна рассчитываются для прямоугольной подобласти, размеры которой задаются величинами  $L$  и  $W$ , в узлах той же сетки, которая используется для расчета распространения цунами. Оценки показывают, что такая подобласть содержит примерно 90% общего объема перемещения дна бассейна, так что вклад в генерацию цунами неучитываемых деформаций дна во внешней области можно считать достаточно малым. В такой постановке также пренебрегается искажениями поля остаточных смещений,

вносимыми неоднородностями свободной границы упругого полупространства (рельефом дна).

### **Данные, необходимые для расчетов начальных смещений в очагах цунами**

Исходными данными, необходимыми для расчетов начальных смещений в очагах цунами являются положение и параметры описанного выше пространственного дислокационного источника, моделирующего очаг подводного землетрясения:

$L$  – длина разрыва;

$W$  – вертикальная протяженность разрыва;

$\delta$  – угол падения плоскости разрыва (отсчитывается от горизонтальной плоскости);

$\lambda$  – направление подвижки в плоскости разрыва (отсчитывается по часовой стрелке от вертикальной линии в плоскости разрыва);

$\theta$  – направление простирания (азимут) разрыва (отсчитывается от направления на север);

$D_0$  – величина смещения противоположных крыльев разрыва.

Эти данные являются экспертной оценкой, полученной на основании решения СМТ (тензор сейсмического момента) по механизму очага.

### **Алгоритмическая реализация модели генерации волн цунами**

Используемая модель генерации волн цунами характеризуется перечисленными выше основными параметрами. Наборы этих параметров подаются на вход для утилиты `source.exe`, реализующей алгоритм генерации волн цунами. Используя их, производится расчет начального возмущения в ограниченной прямоугольной области в декартовых координатах.

После расчета начального возмущения в локальных декартовых координатах, координаты эпицентра сдвигаются в ближайший узел сферической сетки. После этого происходит пересчет начального возмущения из квадратной сетки в декартовых координатах в квадратную сетку с минутным шагом в сферических координатах. Это необходимо для дальнейших вычислений распространения возмущений по линейной и нелинейной модели в сферических координатах. Затем по формулам билинейной интерполяции для прямоугольной сетки формируется массив значений начального возмущения на сферической сетке во всем рассматриваемом регионе. Причем величина возмущения в узле принимается равной нулю, если этот узел не попадает внутрь локальной области.

Сформированный массив начального возмущения подается на вход модулю расчета динамических характеристик цунами.

### **Алгоритмическое обеспечение расчета динамических характеристик цунами.**

Для выполнения серийных расчетов распространения цунами используется специализированный программный компонент (Елецкий, 2006), назначение которого – гидродинамическое моделирование трансформации волны цунами от зоны начального возмущения к защищаемым пунктам на берегу в рамках теории мелкой воды в системе координат "долгота-широта" ( $\lambda, \varphi$ ).

**Название комплекса:** MassGlobalCalcul

**Физическая постановка задачи:** гидродинамическое моделирование трансформации волны цунами от зоны начального возмущения к защищаемым пунктам на берегу.

**Математическая модель:** линейная или нелинейная системы уравнений мелкой воды (по выбору).

**Метод решения:** конечно-разностные алгоритмы типа Мак-Кормака (Федотова, 2006) на неподвижной равномерной прямоугольной сетке; для регуляризации решения применяются метод сглаживания и ряд специальных дополнительных процедур (по выбору). Для работы вычислительного алгоритма требуется постановка граничных условий, а также задание начального условия, батиметрии и параметров разностного метода. В алгоритме реализованы два варианта взаимодействия волн с границами вычислительной области. Это свободный выход волны за пределы области и отражение от условно возведенной вертикальной стены, с помощью которой моделируются очертания островов, контуры берега и прибрежные сооружения вдоль береговой линии. Для стабилизации решения в случае возникновения разного рода вычислительной неустойчивости использовались следующие вспомогательные методы:

- применение искусственной вязкости;
- избирательная фильтрация высокочастотных возмущений свободной поверхности;
- коррекция решения в случае нефизического роста скоростей.

**Ограничения сложности задачи:** могут быть вызваны только ограниченностью ресурсов ЭВМ.

**Требования к ЭВМ:** IBM совместимая.

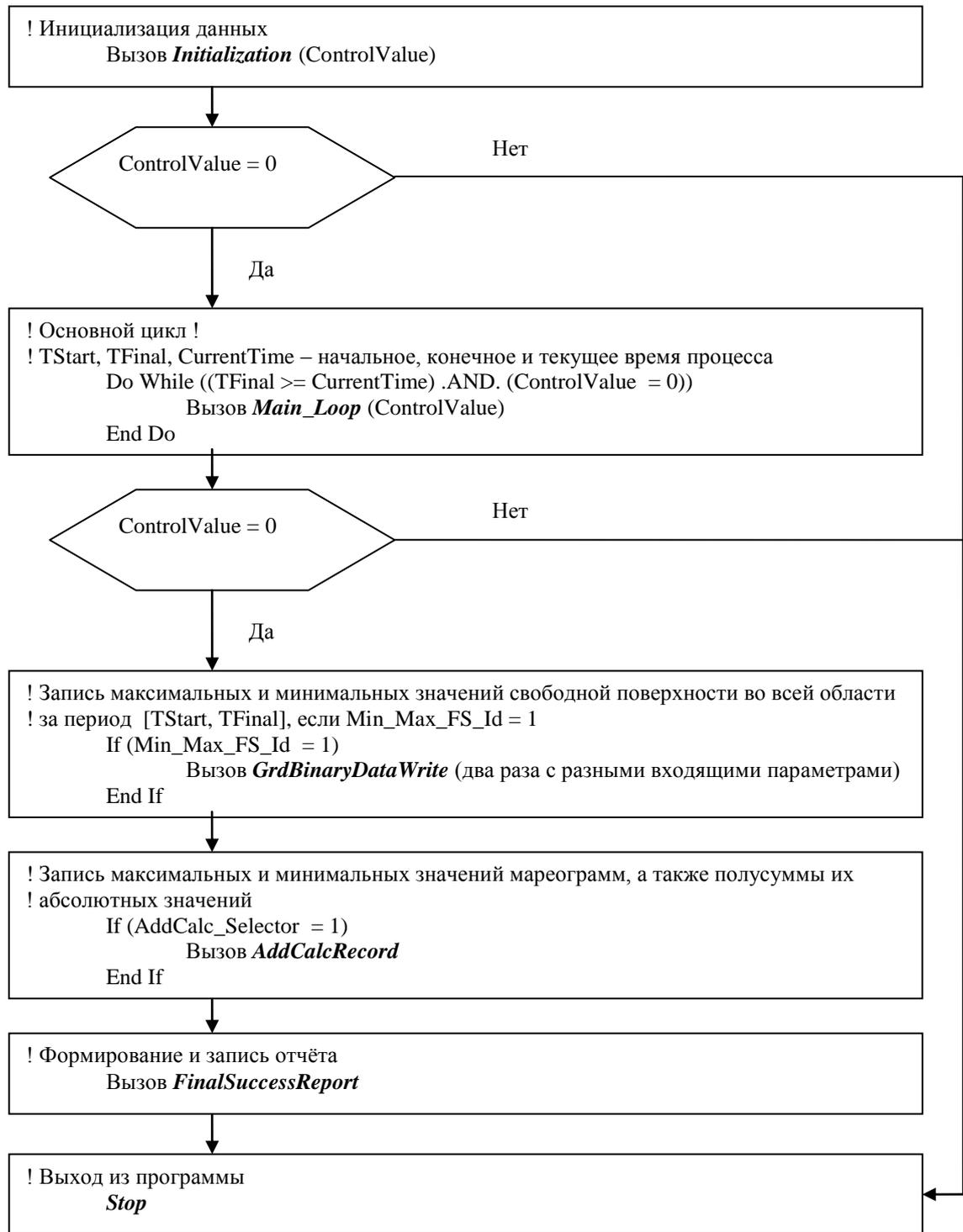
**Язык программирования:** Фортран (стандарт Fortran 95).

*Операционная система: Windows 2000/XP/2003.*

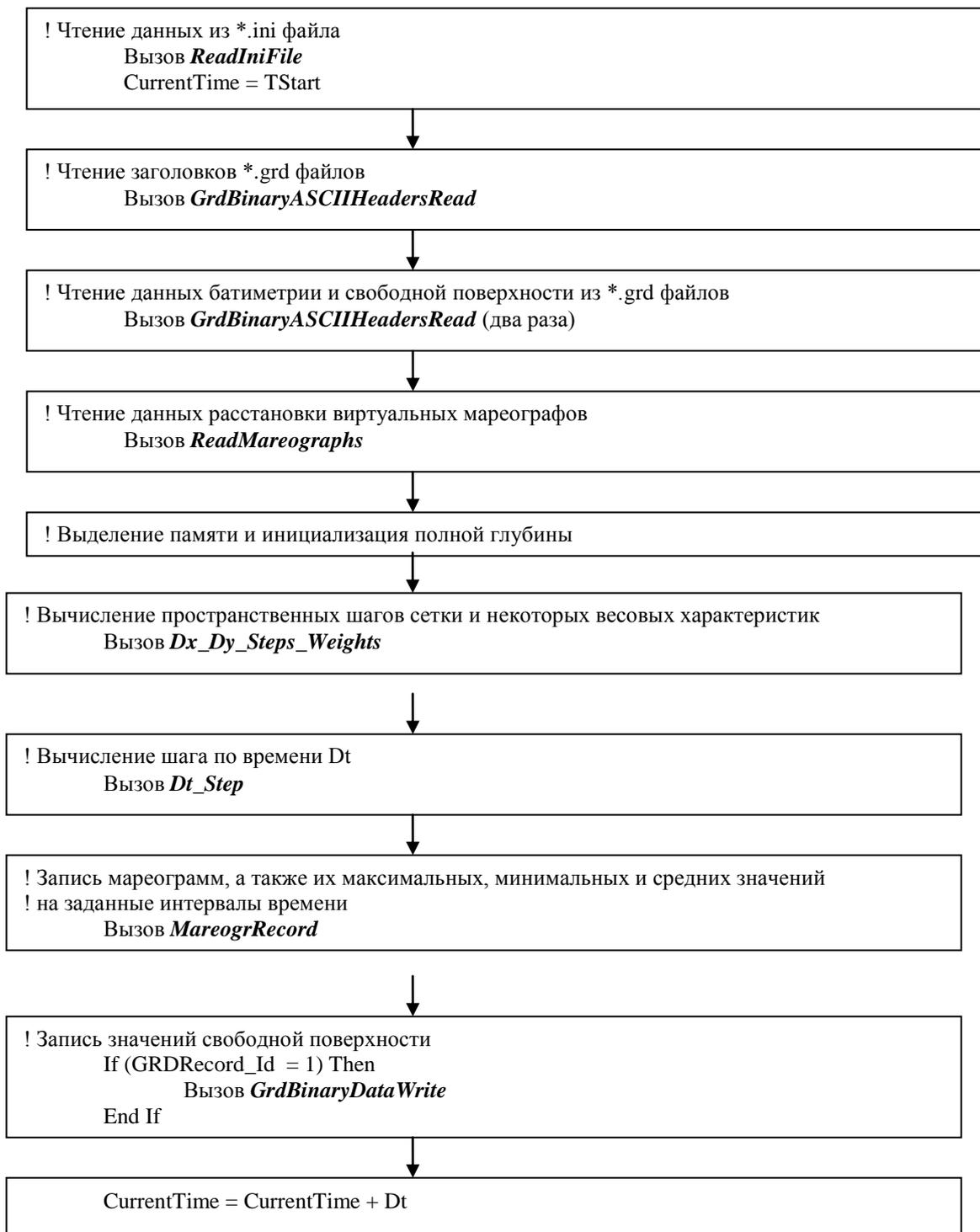
### **Некоторые отличительные особенности программного компонента**

- Полный контроль выделения оперативной памяти и экономный ее расход (но не в ущерб производительности). Отсутствие зарезервированной, неиспользуемой памяти.
- Полный контроль вводимой информации, ее оценка на правдоподобность, проверка составляющих частей (элементов) на согласованность.
- Требование наличия у пользователей знаний математика-вычислителя и/или программиста и/или геофизика не являются критичными (однако являются желательными).
- Благодаря выбранным средствам реализации и оптимизации (алгоритмической, исходного кода и исполняемого файла), скорость выполнения расчетов является высокой.

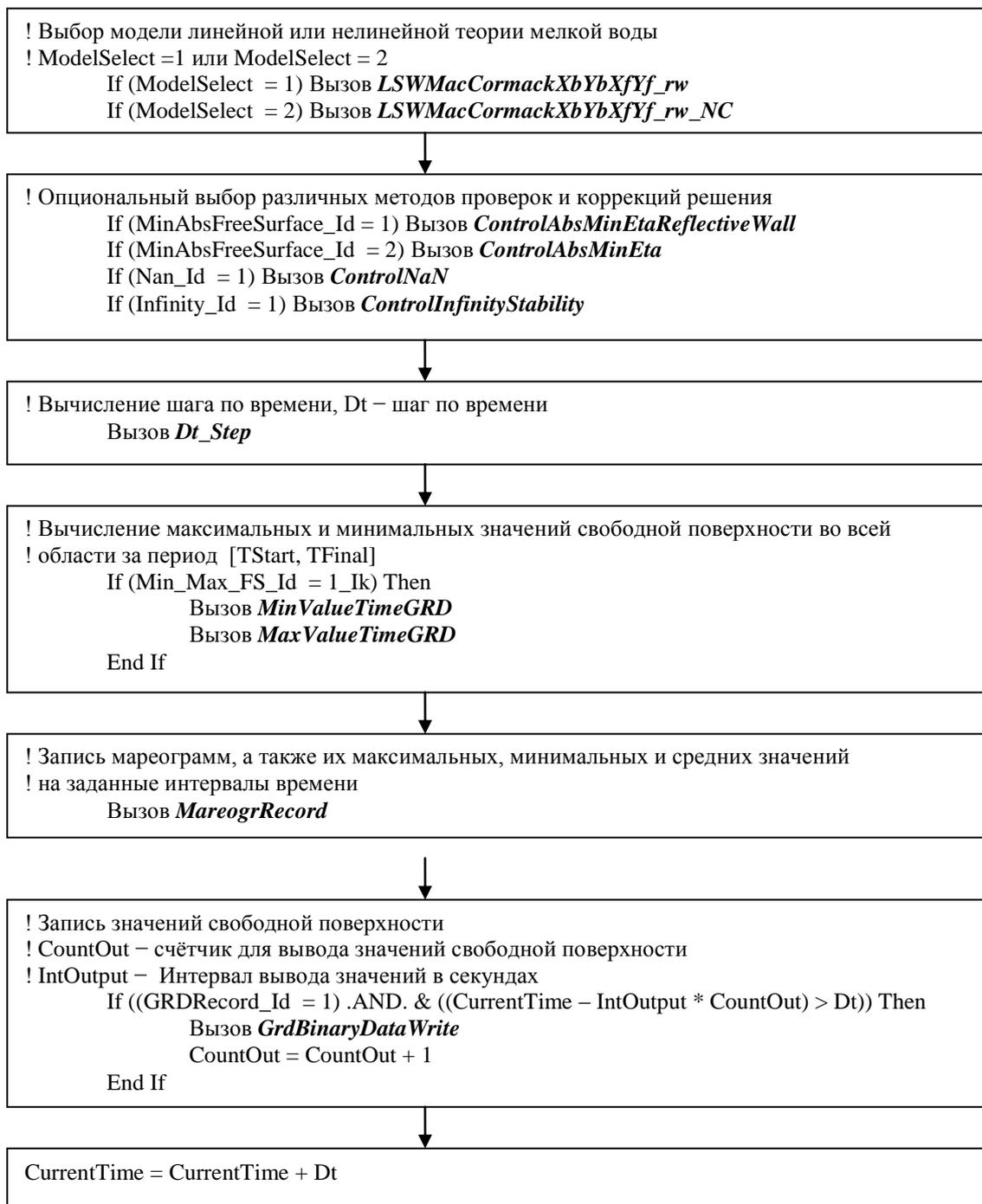
## Структура программы



Блок-схема программы (для наглядности записана с использованием псевдокода)



Упрощённая блок-схема подпрограммы *Initialization*  
(для наглядности записана с использованием псевдокода)



**Упрощенная блок-схема подпрограммы *Main\_Loop***  
(для наглядности записана с использованием псевдокода)

**Замечание:** В блок-схемах подпрограмм *Initialization* и *Main\_Loop* опущено описание второстепенных присвоений, проверок данных и инициализаций. Во всех блок-схемах приведены ключевые моменты, дающие представление о программном устройстве алгоритмов.

Все подпрограммы и глобальные данные, используемые в программном компоненте, разбиты на следующие программные модули, оформленные в виде бинарных модульных файлов Фортрана \*.mod:

- (M01) MassGlobalCalcul\_Add\_Calc
- (M02) MassGlobalCalcul\_Control\_Solution
- (M03) MassGlobalCalcul\_Data
- (M04) MassGlobalCalcul\_Initialization
- (M05) MassGlobalCalcul\_Loop
- (M06) MassGlobalCalcul\_LSW
- (M07) MassGlobalCalcul\_NSW\_NC
- (M08) MassGlobalCalcul\_Report
- (M09) MassGlobalCalcul\_RW
- (M10) MassGlobalCalcul\_Smoothing
- (M11) MassGlobalCalcul\_Steps\_Weights
- (M12) MassGlobalCalcul\_Types\_Of\_Kinds

Функциональное назначение модулей.

Модуль	Имя подпрограммы	Откуда вызывается	Описание
M01	<i>MaxValuesTimesGRD</i>	<i>Main_Loop</i>	Вычисляет максимальное значение уровня свободной поверхности в каждой точке сетки и время, при котором данное значение было зафиксировано
	<i>MinValuesTimesGRD</i>	<i>Main_Loop</i>	В отличие от <i>MaxValuesTimesGRD</i> , вычисляет минимальные значения
M02	<i>ControlNaN</i>	<i>Main_Loop</i>	Выполняет проверку рабочих массивов (см. постановку задачи) на наличие величин, которые не являются числами (могут возникнуть, например, после арифметических операций типа " $\infty/\infty$ ")
	<i>ControlInfinityStability</i>	<i>Main_Loop</i>	Осуществляет проверку и специальную корректировку решения в случае значительного роста скоростей
	<i>ControlAbsMinEta</i>	<i>Main_Loop</i>	Обнуляет значения уровня свободной поверхности в расчетной области, по модулю меньше указанного минимума
	<i>ControlAbsMinEtaReflectiveWall</i>	<i>Main_Loop</i>	Та же функция, что и у <i>ControlAbsMinEta</i> , только применяется у внутренних границ, на которых реализуются условия отражения от вертикальной стенки
M03	—	—	Содержит описание всех глобальных переменных
M04	<i>Initialization</i>	Основная программа	Обеспечивает считывание данных из файлов и инициализацию исходных данных расчёта
M05	<i>Main_Loop</i>	Основная программа	Обеспечивает получение решения на одном шаге по времени
M06	<i>MassGlobalCalcul_LSW</i>	<i>Main_Loop</i>	Содержит алгоритма расчета линейных уравнений мелкой воды с учетом внешних граничных условий, при этом полагается, что все внутренние границы – вертикальные стенки (см. постановку задачи)
M07	<i>MassGlobalCalcul_NSW_NC</i>	<i>Main_Loop</i>	Содержит алгоритма расчета нелинейных уравнений мелкой воды в недивергентной форме с учетом внешних граничных условий, все внутренние границы – вертикальные стенки (см. постановку задачи)
M08	<i>FinalSuccessReport</i>	Основная программа	Формирует файл-отчёт об успешном завершении вычислений
M09	<i>ReadIniFile</i>	<i>Initialization</i>	Считывает данные из *.ini файла
	<i>GrdBinaryASCIIHeadersRead</i>	<i>Initialization</i>	Считывает заголовки файлов *.grd
	<i>GrdBinaryASCIIDataRead</i>	<i>Initialization</i>	Считывает данные из *.grd файлов
	<i>GrdBinaryDataWrite</i>	<i>Initialization, Main_Loop</i>	Формирует бинарный *.grd файл
	<i>ReadMareographs</i>	<i>Initialization</i>	Считывает координаты виртуальных мареографов
	<i>MareogrRecord</i>	<i>Initialization, Main_Loop</i>	а) Записывает мареограммы б) Вычисляет максимальные и минимальные значения мареограмм, а также полусуммы их абсолютных значений на время обращения
	<i>AddCalcRecord</i>	Основная программа	Записывает максимальные и минимальные значения мареограмм, а также полусуммы их абсолютных значений
M10	<i>SmoothingCalculation</i>	<i>Main_Loop</i>	Сглаживает решение на заданных слоях по времени
M11	<i>Dx_Dy_Steps_Weights</i>	<i>Initialization</i>	Вычисляет пространственные шаги сетки и некоторые весовые характеристики соотношений между ними, требующиеся для процессов интерполяции
	<i>Dt_Step</i>	<i>Initialization, Main_Loop</i>	Вычисляет временной шаг для каждого слоя по времени из условия устойчивости
M12	—	—	Содержит описание всех используемых подтипов типов данных Фортрана

## **Экономичные вычислительные технологии для повышения точности моделирования с использованием расчетных областей различной детальности.**

В настоящем разделе излагаются особенности методики, связанные с повышением эффективности выполнения численных экспериментов по расчету высот волн цунами, генерируемых множеством модельных источников, за счет организации вычислений с использованием комбинации расчетных областей различной детальности.

### **Общая характеристика проблемы.**

Исследование расчетных материалов и их сопоставление с известными историческими данными показали, что исходная минутная равномерная сетка не всегда обеспечивает требуемую точность. Рассчитанные на такой сетке в акваториях, содержащих протяженные мелководные зоны и резкие перепады глубин, значения амплитуд волн, порожденных источниками, расположенными на большой глубине, оказываются сильно заниженными в прибрежных мареографах.

*<sup>1</sup>Суть проблемы демонстрирует задача, связанная с реальным регионом – частью побережья Камчатки, омываемой Карагинским заливом, рельеф дна которого характеризуется обширным прибрежным мелководьем. Начальное возвышение свободной поверхности было рассчитано от двух сейсмических источников магнитуды 7.8, один из которых (25с, по терминологии контракта 01н-07) находился в глубоководной зоне акватории, другой (24с) – на мелководье. Численный эксперимент был выполнен на трех сетках (самая грубая – минутная, каждая последующая получена путем уменьшения шага сетки вдвое). Изменения уровня свободной поверхности регистрировались на виртуальных мареографах, установленных вдоль берега. Показано, что если источник находится на большой глубине, то результаты расчета на грубой сетке трансформации в прибрежной зоне волны, порожденной этим источником, оказываются очень неточными.*

*Для источников, полностью расположенных в мелководной зоне, или, что то же, для волн, распространяющихся в акваториях с относительно однородным рельефом дна, ситуация кардинально изменяется. Этот тезис иллюстрируется результатами расчета для модельного источника 24с, полностью расположенного на мелководье. Так, мареограммы, рассчитанные в тех же пунктах на различных сетках, находятся в удовлетворительном согласии и не показывают существенной зависимости от шага сетки.*

*Проверка предположения о связи между неоднородностью дна в исследуемой акватории и необходимостью повышения разрешающей способности расчетной сетки выполняется с помощью расчетов в области с дном постоянной глубины при одновременном сохранении контура границ «вода–суша», присутствующих расчетной области «Карагинский залив».*

---

<sup>1</sup> Здесь курсивом выделены соображения, подтверждающие необходимость применения предлагаемой технологии.

*Соответствующие вычислительные эксперименты выполнялись для «глубоководного» источника 25с с глубинами 10 и 2000 метров. Результаты этих экспериментов показали, что в акваториях с постоянной глубиной, независимо от ее значения, различий при расчетах на сетках с разной разрешающей способностью не наблюдается.*

### **Два алгоритмических способа решения проблемы.**

Для обеспечения необходимой точности расчета в таких ситуациях следует использовать детальную сетку, локально сгущаемую в окрестности защищаемых пунктов.

Один из реализующих этот прием методов будем далее называть «перехват», а другой – «заморозка». Оба метода предназначены для выполнения расчета в области  $\omega$ , содержащей пункты, требующие повышенной точности результатов, с использованием мелкой сетки с шагом  $h_1$ , обеспечивающей такую точность, и результатов, полученных в большой области  $\Omega \supset \omega$  на грубой сетке с шагом  $h$ . При этом расчет на грубой сетке используется для введения волны в малую область либо через ее границу («перехват»), либо в качестве начальных данных («заморозка»).

Алгоритм первого метода («перехват») выглядит следующим образом:

1. выделение в исходной области  $\Omega$  малой подобласти  $\omega$ , представляющей особый исследовательский интерес и содержащей совокупность защищаемых пунктов или часть этой совокупности;
2. расчет в области  $\Omega$  на грубой сетке с шагом  $h$  с записью мареограмм по периметру  $\partial\omega$  области  $\omega$ ;
3. пересчет (интерполяция) значений мареограмм по периметру  $\partial\omega$  с шагом  $h_1$ ;
4. расчет волнового режима в области  $\omega$  с использованием пересчитанных на предыдущем шаге алгоритма значений на  $\partial\omega$  в качестве краевых условий.

Алгоритм второго метода («заморозка») также требует пересчета (интерполяции) вычисленных на грубой сетке волновых полей на мелкую. Последовательность операций здесь следующая:

1. выбор подобласти  $\omega$  и момента времени  $t_z$  на основе анализа результатов предварительных расчетов;
2. расчет в области  $\Omega$  на грубой сетке с шагом  $h$  до момента времени  $t_z$  с сохранением всех рассчитанных волновых полей (высоты волн, скорости) в узлах сетки, принадлежащих части области  $\Omega$ , выделенной в качестве подобласти  $\omega$ ;
3. пересчет (интерполяция) значений сохраненных волновых полей в области  $\omega$  на мелкую сетку с шагом  $h_1$ ;

4. расчет в области  $\omega$  на мелкой сетке с шагом  $h_1$  до финального времени  $t_f$  с использованием пересчитанных на предыдущем шаге волновых полей в качестве начальных данных на момент времени  $t_z$ .

В тестовых расчетах, выполненных для крайне неблагоприятных условий моделирования, количественное и качественное соответствие результатов, полученных с помощью метода «заморозки», эталонным следует признать более чем удовлетворительным.

В ситуациях, когда используется сложный по своей конфигурации источник порождающий волновое поле, содержащее весьма тонкие структуры, которые существенно искажаются при расчете на грубой сетке, «ранняя заморозка», фиксирующая волновые поля на ранних стадиях грубого расчета, оказывается предпочтительней, уменьшая влияние грубой сетки.

Сравнение экономичных технологий «перехвата» и «заморозки», предназначенных для повышения эффективности моделирования трансформации волн цунами в реальных акваториях с необходимой точностью, проводилось в модельной акватории с использованием начального возмущения в виде верхней половины эллипсоида.

Анализ результатов показывает, что оба метода обладают практически одинаковыми возможностями. В мареографных точках, расположенных в центральной прибрежной зоне, соответствующие результаты почти совпадают с эталоном, причем головная волна повышения несколько лучше воспроизводится методом «перехвата», а волна понижения и последующий «хвост» мареограмм – методом «заморозки». По мере приближения к боковым границам малой области наблюдается некоторое снижение точности, при несколько лучших результатах у метода «заморозки», как на положительных, так и на отрицательных амплитудах.

В некоторых ситуациях распределение волн в момент  $t_z$  не позволяет выбрать малую область так, чтобы она содержала всю существенную часть возмущения. Тогда возможен расчет на мелкой сетке во всей области  $\Omega$  (без выделения  $\omega$ ) с использованием переинтерполированных данных. В этом случае применение «заморозки» оправдывается тем, что часть расчета проводится на грубой сетке, счет на которой идет намного быстрее, чем на мелкой. В проведенных вычислительных экспериментах при измельчении сетки в два раза время расчета увеличивается в 8 раз, при измельчении в 4 раза продолжительность расчета возрастает в 64 раза и т.д. Таким образом, при расчете без выделения малой области экономичность достигается за счет того, что на мелкой сетке выполняется только завершающая часть расчета.

<sup>2</sup>Реализация такого приема была выполнена для моделирования распространения волны цунами в области «Карагинский залив», простирающейся от 161.8 до 166.8 градусов Восточной долготы и от 57.1 до 60.6 градусов Северной широты. Начальное возмущение рассчитывалось с использованием модели «глубоководного» источника 25с. Как было показано выше, точность расчета в прибрежных мареографах волн, порожденных этим источником, сильно зависит от детальности используемой сетки. Для оценки адекватности выбора момента «заморозки» волновых полей были проведены два вычислительных эксперимента, в первом из которых «заморозка» происходила в момент времени:  $t_z = 570$  секунд, а во втором – в момент  $t_z = 760$  секунд, что соответствовало 150 и 200 временным шагам в расчете на грубой 1-минутной сетке.

Так как размеры содержательных фрагментов волновых полей оказались сравнимы с размерами расчетной области и экономия вычислительных ресурсов за счет ее уменьшения не представлялась возможной, исполнителями было принято решение в данном случае малую область  $\omega$  не выделять, а продолжать расчет на мелкой 15-секундной сетке во всей исходной области. Таким образом, потеря точности могла происходить здесь только из-за выполнения начального этапа расчета с использованием грубой сетки. Результаты расчетов с «заморозкой» в обоих случаях очень близки к эталонным во всех мареографных точках. Все видимые расхождения объясняются некоторым слабым искажением результатов вследствие применения грубой сетки. Так как эти различия оказались пренебрежимо малы, можно полагать, что метод достаточно устойчив к выбору момента «заморозки».

Результаты решения модельных задач дают основания утверждать, что предложенные специальные вычислительные методики позволяют обеспечить необходимую точность моделирования трансформации волн цунами на трассах от области генерации к защищаемым участкам побережья при вполне приемлемых требованиях к размерам вычислительных ресурсов.

Методику «заморозки» целесообразно использовать в тех случаях, когда область содержит одновременно глубоководную зону, в которой достаточно использования грубой сетки, и мелководную, в которой расчеты необходимо вести на мелкой сетке. Результаты испытаний на модельных задачах показали, что для обеспечения необходимой точности необходимо правильно выбрать момент «заморозки»  $t_z$  и адекватно выделить малую область  $\omega$ . При соблюдении этих условий удастся практически избежать снижения качества моделирования, которое порождается проведением части расчета на грубой сетке и отсечением некоторых фрагментов волновых полей при переходе в малую область. В то же время, продолжительность расчета существенно уменьшается.

---

<sup>2</sup> Здесь курсивом выделены фрагменты текста, иллюстрирующие эффективность предлагаемой вычислительной технологии

Результаты моделирования трансокеанского цунами также подтвердили ее работоспособность.

## **Методика проведения большого объема численных экспериментов с использованием программного комплекса MassGlobalCalcul на многопроцессорных ЭВМ.**

Настоящая методика предназначена для ускорения выполнения численных экспериментов по расчету высот волн цунами, генерируемых множеством модельных источников, с использованием возможностей вычислительных комплексов (кластеров) с большим числом процессоров, обеспечивающих возможность одновременного (параллельного) решения однотипных задач, различающихся наборами входных данных (расчетных областей, начальных данных – источников цунами, точек записи результатов – виртуальных мареографов, привязанных к реальным защищаемым пунктам).

### ***Перечень специальных терминов.***

**Вычислительный кластер** – система, состоящая из нескольких ЭВМ, имеющих, как правило, общую файловую систему и объединенных единой средой передачи сообщений между отдельными ЭВМ.

**Вычислительный процессор** – элемент вычислительной машины, независимо обрабатывающий прерывания операционной системы. Роль вычислительного процессора может исполнять как отдельный процессор, так и процессорное ядро в составе многоядерного процессора или один из нескольких процессоров, имитируемых единственным процессором с поддержкой технологии эмуляции многоядерности.

**Коммутационная среда** – среда передачи сообщений между ЭВМ, объединенными в вычислительный кластер.

**Многопроцессорная ЭВМ** – ЭВМ, имеющая более одного вычислительного процессора, управляемая одним экземпляром операционной системы.

**Узел кластера** – ЭВМ в составе вычислительного кластера.

**Система пакетной обработки** – система, управляющая распределением задач в вычислительном кластере, предназначенная для обеспечения загрузки узлов кластера, исключающей возможность превышения определенных лимитов.

### ***Основные стратегии.***

Проведенные ранее в рамках НИР «Расчет высот волн цунами для защищаемых пунктов Курило-Камчатского региона» исследования распространения волн цунами в акватории Японского и Охотского морей показали недостаточность разрешения минутной сетки для достижения необходимой точности численного решения. Проведение расчетов

на измельченных сетках приводит к значительному возрастанию требований к ресурсам ЭВМ. В первую очередь – к объему доступной оперативной памяти и производительности процессора.

Необходимость разработки методики расчетов на многопроцессорных ЭВМ обусловлена, с одной стороны, возросшими требованиями, а с другой – доступностью большого числа вычислительных машин одной архитектуры, объединенных в вычислительные кластеры с общей файловой системой. Разрабатываемая методика предназначена для проведения большого числа компьютерных экспериментов с малой зависимостью трудозатрат от числа экспериментов и пригодна для использования на большинстве доступных многопроцессорных ЭВМ и вычислительных кластеров.

Для ускорения расчетов рассматриваются две стратегии. Одна состоит в использовании большого числа процессоров при выполнении расчетов для различных источников, а другая состоит в распараллеливании каждого расчета. Первая стратегия отличается простотой реализации и не требует значительного изменения существующей однопроцессорной версии программы. Основным преимуществом стратегии распараллеливания является возможность проведения расчетов на сетках с большим числом ячеек, что позволяет повысить точность расчета.

В силу простоты реализации и ограниченного срока выполнения расчетов, в первую очередь, разработана методика, реализующая первую стратегию с малой зависимостью трудозатрат при выполнении расчетов от количества выполняемых экспериментов.

Суть разработанной методики состоит в следующем: для каждого эксперимента по расчету распространения волн цунами в некоторой акватории для заданного набора источников с помощью комплекса сценариев формируется последовательность задач, которые передаются в систему пакетной обработки. По окончании вычислений для всей последовательности задач, результаты расчетов собираются в одной директории в общей файловой системе для последующей обработки.

### ***Организация одновременных расчетов.***

Реализация методики состоит из нескольких этапов:

1. Изучение исходного кода программы.
2. Приведение кода программы в соответствие с требованиями **стандарта** языка программирования.
3. Автоматизация запуска расчетных заданий.
4. Подготовка и выполнение расчетных заданий.

Изучение программного кода состоит в установлении зависимостей между программными модулями и определении порядка разделения работы между процессорами, обеспечивающего корректность результата. Комплекс *MassGlobalCalcul* состоит из трех программ: *serial\_calc.exe*, *source.exe* и *MassGlobalCalcul.exe*. Запуск расчета осуществляется запуском программы *serial\_calc.exe*. Одновременное выполнение расчетов для различных источников требует параллельной реализации основного цикла в программе *serial\_calc.exe*.

Такое распараллеливание осложняется наличием зависимостей по данным между блоками. Обмен данными между программами производится через промежуточные дисковые файлы. Существенным здесь является наличие перезаписываемых файлов, названия которых являются одинаковыми для всех источников. Таковыми являются файлы *MassGlobalCalcul.ini*, *Mareographs.dat* и *Source.ini*. Устранение этих зависимостей требует внесения изменений в программы комплекса с целью назначения этим файлам имен, уникальных для каждого источника или отказа от использования файлов для обмена данными между программами.

При одновременном выполнении расчетов для различных источников, запуск модуля *serial\_calc.exe* осуществлялся независимо для каждого из источников, а подготовка входных файлов для запуска автоматизирована. В результате, распараллеливание не потребовало внесения изменений в логику программ комплекса, оно было осуществлено целиком и полностью внешними средствами.

### ***Особенности программ комплекса MassGlobalCalcul.***

Основной объем кода реализован в рамках диалектов языков Fortran 77 и Fortran 90. В результате изучения исходного кода было установлено, что код может быть с незначительными изменениями приведен в соответствие с требованиями стандарта языка Fortran 90 (ANSI, 1992), за исключением функций ввода-вывода файлов в формате GRD, для выполнения которых требуется поддержка двоичного потокового ввода-вывода (WG5, 1996) в реализации, включенной в стандарт языка Fortran 2003 (ISO, 2004). Соответствие со стандартом было подтверждено тестированием с компиляторами Sun Studio 12, Intel Fortran Compiler 10.1 и GNU Compiler Collection 4.3.1.

### ***Автоматизация одновременных расчетов.***

Средства автоматизации, применявшиеся при организации одновременных расчетов в настоящем проекте, пока не являются частью комплекса программ *MassGlobalCalcul*, а являются полностью внешними по отношению к комплексу. Для

включения средств автоматизации одновременных расчетов в комплекс программ необходимо реализовать функции проверки корректности входных данных.

### ***Предварительные результаты распараллеливания алгоритма.***

Комплекс MassGlobalCalcul содержит два вычислительных ядра, соответствующих линейной и нелинейной моделям распространения длинных волн в океане. Оба вычислительных ядра представляют собой реализации явных разностных схем сквозного счета типа предиктор-корректор для определения значений функций  $u(x,y,t)$ ,  $v(x,y,t)$ ,  $\eta(x,y,t)$  и  $h(x,y,t)$  на регулярной прямоугольной сетке  $(x_i,y_j)$ . Для каждого  $(i,j)$ -го узла некоторые величины вычисляются по различным формулам в зависимости от значений функций в этом и соседних узлах.

Анализ графа зависимостей программы позволяет выделить в дереве циклов максимальные циклы, итерации которых независимы. Такими являются циклы по переменной  $x$  в блоках предиктора и корректора. Следовательно, производительность комплекса на многопроцессорных ЭВМ с общей памятью может быть повышена за счет разделения пространства итераций этих циклов между несколькими вычислительными процессорами. В случае выполнения одновременных расчетов для нескольких источников такое распараллеливание оправдано в случае, если объем оперативной памяти многопроцессорной ЭВМ не позволяет запустить одновременно расчеты для различных источников на каждом из вычислительных процессоров.

## **Общая характеристика управляющего программного комплекса**

Управляющий программный комплекс представляет собой совокупность реализованных вычислительных алгоритмов, утилит по управлению ими, правила и форматы по обмену информацией между модулями и утилиту импорта данных в БД.

`source.exe` – утилита для вычисления начального возмущения свободной поверхности в локальных декартовых координатах и сферических. Начальные данные для этой утилиты задаются в файле `source.txt`, который одновременно является файлом описания этой утилиты.

`MassGlobalCalcul.exe` – утилита для вычисления распространения возмущения по данному начальному возмущению. Входные параметры для этого алгоритма указываются в файле `MassGlobalCalcul.ini`, который также выполняет функцию описания утилиты.

`Serial_calc.exe` - утилита, предназначенная для запуска и управления серийными расчетами с участием двух выше описанных утилит. Описание работы этой утилиты приведено ниже.

В одну папку помещаются файлы `bathymetry.grd` (исходная батиметрия), `MassGlobalCalcul.exe`, `source.exe`, `serial_calc.exe` и папки `calculations`, `input`. В папке `input` содержатся файлы `000MassGlobalCalcul.ini`, `mareographs.txt`, `serial.ini`, `sources.txt`. Файлы `MassGlobalCalcul.ini` и `source.ini` генерируются в процессе работы программного комплекса.

В файле `serial.ini` задаются параметры для управления расчетом: `SOURCES` – определяет, вычислять источники или использовать вычисленные ранее; `MAREOS` – определяет, производить ли расчеты свободной поверхности.

Необходимо создать или отредактировать файл `sources.txt`. Этот файл содержит набор параметров источника и имеет следующий формат: описание каждого источника состоит из двух строк. Первая строка это название, которое будет участвовать в названиях создаваемых файлов. Вторая строка состоит из чисел, разделенных табуляцией: **Y** – широта центра источника, **X** – долгота центра источника, **L** – длина подвижки, **W** – ширина подвижки, **DE**, **LA**, **TE** – углы, **D0**, **H\_top**, **JJ**, **KK**.

В файле `000MassGlobalCalcul.ini` указываются параметры для утилиты `MassGlobalCalcul.exe` с указанием имен в виде шаблонов. В именах файлов, указанных в этом `ini`-файле, нужно использовать маску вида `<ID>`.

В файле `mareographs.txt` в два столбца указываются координаты мареографов (номера узлов сетки). В первом находится *номер узла по долготе*, во втором *номер узла по широте*.

После заполнения перечисленных выше файлов и папок для начала расчета следует запустить утилиту `Serial_calc.exe`, которая самостоятельно будет формировать необходимые для вычислительных модулей входные данные и управлять последовательностью их работы. После отработки этой утилиты в папке `calculations` будут сформированы файлы мареограмм, начальных возмущений, минимумов и максимумов амплитуд в мареографах. Далее эти данные импортируются в БД с помощью утилиты импорта `Import.exe`.

## **Информационное обеспечение проекта**

Информационное обеспечение проекта выполняется с использованием специализированного структурированного хранилища информации (базы данных) о

появлении цунами и необходимого для доступа к этой информации программного обеспечения. Хранилище состоит из локальной базы данных, поддерживающей язык доступа к данным посредством SQL-запросов, и локального хранилища файлов.

### **Локальная база данных**

Локальная база данных представляет собой базу данных MS Access. Эта БД проста в эксплуатации и поддерживает язык SQL-запросов, что позволит в дальнейшем при необходимости легко перейти на другую базу данных SQL.

Реализованная структура базы данных позволяет хранить информацию о модельных цунамигенных землетрясениях, защищаемых пунктах и других сущностях. При этом данные большого объема (такие как массивы мареограмм, возмущений свободной поверхности и др.) хранятся на локальном диске, а в БД хранятся только необходимые ссылки и значения необходимых функционалов от этих массивов для быстрого доступа к ним (например, максимальные и минимальные амплитуды мареограмм).

База данных включает в себя набор таблиц, структура которых представлена в последующих таблицах.

#### **Таблица защищаемых пунктов: dt\_defended\_points**

Название поля	Тип	Описание
id	Integer	Уникальный идентификатор
name	String	Название защищаемого пункта
Fi	Real	Широта пункта, предоставленная заказчиком
psi	Real	Долгота пункта, предоставленная заказчиком
main_point	Integer	Основной мареограф. Идентификатор из таблицы <b>dt_points</b>
point1	Integer	Крайний левый соседний мареограф. Идентификатор из таблицы <b>dt_points</b>
point2	Integer	Левый соседний мареограф. Идентификатор из таблицы <b>dt_points</b>
point3	Integer	Правый соседний мареограф. Идентификатор из таблицы <b>dt_points</b>
point4	Integer	Крайний правый соседний мареограф. Идентификатор из таблицы <b>dt_points</b>

#### **Таблица мареографов: dt\_points**

Название поля	Тип	Описание
id	integer	Уникальный идентификатор
fi	real	Широта мареографа
psi	real	Долгота мареографа
N_fi	integer	Номер узла сетки по направлению широты
N_psi	integer	Номер узла сетки по направлению долготы
depth	real	Глубина океана в этом узле. Вычисляется из батиметрии.

**Таблица очагов: dt\_sources**

Название поля	Тип	Описание
id	integer	Уникальный идентификатор
name	string	Название очага (источника). Уникальный символьный шифр источника.
fi	real	Широта эпицентра.
psi	real	Долгота эпицентра.
M	real	Магнитуда
L	real	Длина разрыва в километрах
W	real	Ширина разрыва в километрах
U0	real	Величина подвижки в метрах
LA	real	Направление подвижки в плоскости разрыва. Угол в градусах.
TE	real	Азимут источника. Угол в градусах.
DE	real	Угол падения разрыва в градусах.
H_top	real	Глубина залегания верхнего края разрыва в километрах.
path_small	string	Имя файла, содержащего локальное возмущение (<name>_z.grd)
path	string	Имя файла, содержащего локальное возмущение во всей области (<name>_etta.grd)
jj	integer	Количество точек на длину площадки по направлению L (используемое для вычисления интегралов).
kk	integer	Количество точек на длину площадки по направлению W (используемое для вычисления интегралов).

**Таблица параметров расчета: dt\_calc\_params**

Название поля	Тип	Описание
id	integer	Уникальный идентификатор
Name	string	Название модели

**Таблица полученных мареограмм: dt\_mareos**

Название поля	Тип	Описание
id	integer	Уникальный идентификатор
calc_param	integer	Ссылка на набор параметров расчета. Идентификатор из таблицы <b>dt_calc_params</b> .
source	integer	Ссылка на источник. Идентификатор из таблицы <b>dt_sources</b> .
path	string	Имя файла с мареограммами, полученными от этого источника.
path_min_freesurface	string	Имя файла свечений минимумов
path_max_freesurface	string	Название файла свечений максимумов
min_value	real	Минимальное значение амплитуды в океане от данного источника
max_value	real	Максимальное значение амплитуды в океане от данного источника

**Таблица результатов расчета: dt\_maxmin\_val**

Название поля	Тип	Описание
id	integer	Уникальный идентификатор
calc_param	integer	Ссылка на набор параметров расчета. Идентификатор из

		таблицы <b>dt_calc_params</b> .
source	integer	Ссылка на источник. Идентификатор из таблицы <b>dt_sources</b> .
point	integer	Ссылка на мареограф. Идентификатор из таблицы <b>dt_points</b> .
max_val	Real	Максимальная высота волны в мареографе при данных параметров расчета и источнике.
min_val	Real	Минимальная высота волны в мареографе при данных параметров расчета и источнике.
t_max_val	Real	Время, когда достигнут максимум.
t_min_val	Real	Время, когда достигнут минимум.

Локальное хранилище файлов это папка на локальном диске, в которой находится программное обеспечение для пользовательского режима, файл базы данных и структурированный набор подпапок с хранимой в них информацией.

### Файловый состав папки хранилища

Bathymetry – папка, в которой хранится файл с массивом батиметрии bathymetry.grd;

DataBase – папка, в которой хранится файл базы данных main\_db.mdb;

Export – папка, в которую помещаются файлы полученные в результате экспорта данных из системы;

Glowings – папка, предназначенная для хранения вычисленных свечений;

Import – папка, в которую помещаются данные для импорта в систему. Она содержит две папки: Calculations и Input. Первая папка содержит файлы:

<name>\_Max\_FreeSurface.grd - свечения максимумов,

<name>\_Min\_FreeSurface.grd - свечения минимумов<sup>3</sup>,

а в папку Input складываются файлы Sources.txt и Mareographs.txt, содержащие таблицы источников и точек расстановки мареографов, соответственно.

Mareograms – папка, в которой хранятся файлы с массивами мареограмм. Эта папка содержит файлы <name>\_Mareograms.dat со всеми мареограммами, полученными от источника <name>.

Modules – в этой папке в будущем планируется размещать дополнительные вычислительные модули.

Sources – папка, содержащая файлы начальных возмущений от всех источников. Эта папка содержит файлы:

<name>\_Etta.grd – массив возмущений в сферической системе координат.

<name>\_Z.grd – массив возмущений в локальной декартовой системе координат.

<sup>3</sup> <name> – название источника.

Kamchatka.exe – исполняемый файл программы для доступа к данным.

Kamchatka.ini – файл с параметрами настройки программы Kamchatka.exe

## Импорт данных

Для осуществления импорта в БД необходимо поместить утилиту Import.exe в папку программы, в которой создана вышеописанная структура папок. После заполнения всех папок хранилища следует запустить эту утилиту и нажать кнопку «Импортировать данные из папки Import». В результате произойдет наполнение БД.

При этом будут заполнены не все таблицы, и кое-что приходится делать вручную после импорта, а именно:

- 1) В таблице dt\_sources не проставлены магнитуды. Чтобы их проставить, следует ввести в поле «SQL-запрос» соответствующий запрос:

```
UPDATE dt_sources  
SET M=xxx  
WHERE L=yyy,
```

где вместо xxx нужно подставить значение магнитуды (например, 7.8), а вместо yyy – соответствующее значение L (например, 108.0).

Затем нажать кнопку «Выполнить SQL-запрос». Таким образом можно проставить магнитуды у всех источников в таблице dt\_sources, ориентируясь на значения L (длина подвижки одинакова у источников с одинаковой магнитудой).

- 2) Таблицу dt\_defended\_points необходимо заполнить вручную, открыв ее в MS Access: сначала поля name, fi, psi для всех защищаемых пунктов, а потом проставлять ссылки в поля main\_point, point1, point2, point3, point4 на соответствующие мареографы в dt\_points.

## Программное обеспечение для доступа к информации

Программа для доступа к информации, хранимой в базе данных, представляет собой оконное приложение Win32 и запускается исполняемым файлом Kamchatka.exe. Кнопка «Показать информацию» открывает окно, в котором отображается информация, связанная с выбранным объектом. Для любого объекта окно содержит информацию об этом объекте, связанные с ним характеристики (максимальная и минимальная амплитуда и др.), таблицу распределений максимумов и минимумов (если выбран защищаемый пункт – распределение по источникам, если выбран источник – распределение по защищаемым пунктам) и представление этой таблицы в виде диаграммы. На диаграмме красным цветом изображены максимумы, синим – минимумы, черным штрихом –

величина размаха (среднее арифметическое абсолютных значений минимума и максимума).

Нажатие на кнопку «Показать мареограмму» открывает окно с мареограммой в выбранном защищаемом пункте для конкретного источника.

Главное меню приложения содержит команду «Экспортировать распределения...», которая экспортирует в текстовый формат данные всех распределений (диаграмм). Эти данные в дальнейшем можно использовать для просмотра с использованием сторонних приложений (например, Grapher).

Все данные, отображаемые в приложении, выводятся на основе результатов SQL-запросов к базе данных `main_db.mdb`.

Для построения мареограмм сначала происходит запрос имени файла мареограммы к таблице **dt\_mareos** по известному идентификатору источника, а затем открывается файл мареограмм, полученных от этого источника, и происходит отрисовка мареограммы с необходимым номером, полученным из таблицы **dt\_points** по идентификатору защищаемого пункта.

Таким образом, любая операция по запросу данных или экспорту выполняется через базу данных, что существенно упрощает доступ и управление данными.

## **Форматы данных**

Для хранения и обмена информацией в системе были использованы следующие форматы данных.

## Бинарный формат grd-файла

Type	Description
char	single byte
short	16 bit signed integer
float	32 bit single precision floating point value
double	64 bit double precision floating point value

The **Surfer 6** format has the following layout:

Element	Type	Description
id	char	4 byte identification string 'DSBB' which identifies the file as a <b>Surfer 6</b> binary grid file.
nx	short	number of grid lines along the X axis (columns)
ny	short	number of grid lines along the Y axis (rows)
xlo	double	minimum X value of the grid
xhi	double	maximum X value of the grid
ylo	double	minimum Y value of the grid
yhi	double	maximum Y value of the grid
zlo	double	minimum Z value of the grid
zhi	double	maximum Z value of the grid
z11, z12, ...	float	first row of the grid. Each row has a constant Y coordinate. The first row corresponds to ylo, and the last row corresponds to yhi. Within each row, the Z values are ordered from xlo to xhi.
z21, z22, ...	float	second row of the grid
z31, z32, ...	float	third row of the grid
...	float	all other rows of the grid up to yhi

## Текстовый формат для экспорта распределений высот волн цунами (dat-файлов)

Файлы с таким форматом имеют 6 столбцов. В первом перечислены индексы защищаемых пунктов (источников), по которым определяется распределение высот волн. Во втором столбце содержатся соответствующие минимальные значения амплитуд, в третьем - время достижения этих минимальных значений, в четвертом – максимальные значения, в пятом – времена достижения максимумов, в шестом – размахи амплитуд.

## Формат файлов настроек утилит (ini-файлов)

Это текстовые файлы со структурой данных стандартного ini-файла Windows. Любая строка, начинающаяся с символа «;», считается комментарием и игнорируется при считывании данных. Любой параметр утилиты записывается заглавными символами, а его

значение указывается в той же строке через знак «=». Последовательность задания параметров произвольная.

### **Формат файлов мареограмм (dat-файлов)**

Этот формат используется для хранения данных мареограмм в текстовом формате, который также поддерживается программой Grapher. В первом столбце файла в таком формате содержатся значения, отложенные по оси времени, а в последующих столбцах значения амплитуд в мареографах. Первая строка этого файла имеет особенный вид. Она фактически является заголовком: Time \_1\_ \_2\_ \_3\_ ... \_N\_, где соответствующее целое число указывает номер (индекс) мареографа.

Программная реализация позволяет независимо друг от друга выполнять объемные вычисления, проектировать базу данных и разрабатывать пользовательский интерфейс программы, обеспечивающий доступ к БД. Также благодаря разделенности вычислительных модулей между собой и отделения их от управляющей утилиты (serial\_calc.exe) достигается раздельность кода, обеспечивающего функциональность системы, и, как следствие, простота отладки модулей по отдельности.

## **Результаты испытания методики моделирования воздействия удаленных цунами на защищаемые участки побережья**

В качестве расчетной области использовалась акватория Тихого океана в пределах от 135 градусов в.д. до 70 градусов з.д. (*«290 градусов в.д.» – с учетом перехода через 180 градусов*) и от 50 градусов ю.ш. до 65 градусов с.ш.

Начальные возмущения рассчитывались с использованием модельных очагов землетрясений, произошедших у берегов Чили. Один из них, называемый далее «Chilean-S», моделировал Чилийское землетрясение 22-го мая 1960-го года с магнитудой 9.5 и координатами гипоцентра 42.2 градуса ю.ш., 74.2 градуса з.д., второй («Iquique») – землетрясение 1877-го года у города Икике магнитуды 9.0 с гипоцентром в точке 20.8 градуса ю.ш., 70.2 градуса з.д., третий («Cascadia») – январское 1700 года землетрясение в районе залива Пуджет Саунд (штат Вашингтон) с магнитудой 9.1 и гипоцентром в точке 44.5 градуса с.ш., 124.6 градуса з.д. Был рассмотрен также модельный очаг «Chilean-N», находящийся у побережья, примыкающего к Икике, но имеющий параметры, соответствующие первому, более сильному очагу. Координаты гипоцентра здесь были выбраны так, чтобы примерные верхняя и правая границы его положительной части возмущения (край разрыва) проходили вдоль побережья.

Вычисленные по этим параметрам начальные возмущения изменялись в следующих пределах: для очагов «Chilean-S» и «Chilean-N» – от -3 до +9 метров, для «Iquique» – от -1.2 до +4.5 метров, а для очага «Cascadia» – от -2.3 до +6.6 метров.

Виртуальные мареографы были установлены вблизи Курильских и Камчатских защищаемых пунктов из перечня предыдущих расчетов, а также вблизи населенных пунктов Магадан и Охотск в акватории Охотского моря.

Предварительные расчеты были проведены на сетке с шагом 5 минут до момента времени 150000 секунд (~42 часа).

Согласно полученным результатам, для модельного очага «Chilean-S» основная часть энергии распространяется на северо-запад: к Филиппинам, Японии, Курилам и Камчатке, при этом по результатам расчета на 5-минутной сетке на Курилах были зафиксированы амплитуды до 3-х метров, на Камчатке – до 1.5 м. Для очагов «Iquique» и «Chilean-N», расположенных севернее, энергия больше рассеивается по всему Тихому океану. В случае очага «Cascadia» распространения значительной части волновой энергии в сторону Российского побережья не наблюдается.

От очага «Chilean-N» в защищаемых пунктах наблюдаются амплитуды **Ошибка!** **Источник ссылки не найден.** примерно в 2 раза меньше, чем от «Chilean-S» (до 1 – 1.5 метров), а от «Iquique» – в 5 – 6 меньше (до 0.5 метра). Амплитуды волн, рассчитанные от очага «Cascadia», по своей величине схожи с амплитудами для очага «Chilean-N».

Положительные результаты предварительных расчетов и возможность выполнения вычислительных работ на суперкомпьютере Новосибирского государственного университета, позволили перейти к детальным расчетам на сетке с шагом 2 минуты. Первые из них были проведены с использованием изложенной выше технологии «заморозки» для модельного очага землетрясения «Chilean-S». Для этого при расчете на пятиминутной сетке массивы данных запоминались в момент времени 70000 секунд, после чего расчет продолжался только в малой области, координаты которой изменялись в пределах от 135 до «195» градусов в.д. и от 0 до 65 градусов с.ш.

Были проведены два расчета, в первом из которых вычисления в малой области велись без измельчения – на пятиминутной сетке, а во втором – на сетке с разрешением 2 минуты. Задачей первого расчета была оценка погрешности, происходящей за счет «потери» информации о динамике волнового режима после перехода в малую область, а второго – оценка влияния на точность расчета измельчения пространственного шага в 2.5 раза.

Картины свечений, рассчитанных после «заморозки» в момент времени 70000 секунд с продолжением расчета в малой подобласти на сетке без измельчения

пространственного шага, и свечений, полученных в ходе расчета на такой же сетке без «заморозки», показали, что структура поверхностей практически идентична. На мареограммах незначительная разница в результатах наблюдается так же только в «хвостовых» частях мареограмм. Таким образом, можно говорить о том, что использование технологии «заморозки» с выбранными параметрами (границы подобласти и время «заморозки») не приводит к появлению какой-либо существенной погрешности в результатах.

Сравнение мареограмм, полученных при помощи «заморозки» с вычислениями в малой области на пяти- и двухминутной (после соответствующей интерполяции) сетках, позволило определить важность использования в расчетах более детальной сетки. В части защищаемых пунктов увеличение разрешающей способности сетки не привело к существенному изменению мареограмм, но в некоторых амплитуды увеличились до двух раз и более.

## Литература

1. Aki K. (1972) Earthquake mechanism // *Tectonophysics*, 1972, V.13, № 1 - 4, P. 423-446.
2. Hatori T. (1974) Tsunami sources on the Pacific side in northern Japan. // *Zisin*, 1974, 27, №4, P. 321 – 337.
3. Аверьянова В.Н. (1968) Детальная характеристика сейсмических очагов Дальнего Востока, М.: Наука, 1968, 192 с.
4. Балакина Л.М. (1972) Цунами и механизм очага землетрясений северо-западной части Тихого океана. // В кн.: Волны цунами: Труды СахКНИИ, вып. 29, Южно-Сахалинск, 1972, С.48 – 72.
5. Балакина Л.М. (1979) Ориентация разрывов и подвижек в очагах сильных землетрясений северной и северо-западной части Тихого океана. // *Физика Земли*, 1979, № 4, С.43 – 52.
6. Гнибиденко Г.С., Быков Т.Г., Веселов С.В. и др. (1980) Тектоника Курило-Камчатского глубоководного желоба // М.: Наука, 178с.
7. Гусяков В.К. (1978) Остаточные смещения на поверхности упругого полупространства // Условно-корректные задачи математической физики в интерпретации геофизических наблюдений, Новосибирск: ВЦ СО РАН, 23-51.
8. Гусяков В.К., Марчук Ан.Г. (1993) Цунамирайонирование Берингоморского побережья Карагинского и Олюторского районов Корякского автономного округа // Предварительный отчет по х/д 2-93 "Уточнение карты сейсмического

- районирования КАО. Этап накопления и обработки полученных данных.", Н-ск: ВЦ СО РАН, 27с.
9. Елецкий С.В. (2006) Программная система моделирования волн цунами NEREUS, опыт разработки: предназначение и реализация // Сборник материалов I (XIX) Международной конференции молодых ученых, посвященной 60-летию Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, 15-20 июня 2006г. / отв. ред. О.Н. Лихачева. Южно-Сахалинск. 2007. С. 230 – 236.
  10. Лобковский Л.И., Сорохтин О.Г., Шеменда А.И. (1980) Моделирование деформаций островных дуг, приводящих к образованию тектонических террас и возникновению цунамигенных землетрясений // ДАН СССР. 1980. Т. 255. № 1. С. 74-77.
  11. Лобковский Л.И., Баранов Б.В. (1982) К вопросу о возбуждении цунами в зонах поддвига литосферных плит.// В кн.: Процессы возбуждения и распространения цунами, М.: ИО АН СССР, 1982, С.7 – 17.
  12. Лобковский Л.И., Сорохтин О.Г. (1979) Деформация литосферных плит в зонах поддвига // В кн.: Океанология. Геофизика океана, Т.2, Геодинамика, М.: Наука, 1979, С.194 – 203.
  13. Лобковский Л.И., Сорохтин О.Г. (1980) Тектоника литосферных плит и происхождение цунамигенных землетрясений. // ДАН СССР, 1980, 251, № 5. С.1092 – 1095.
  14. Тараканов Р.З., Ким Х.С. (1980) Особенности сейсмичности Курило-Камчатской зоны и проблема выделения поперечных разломов // В кн.: Сейсмичность и механизмы очагов землетрясений Дальнего Востока, Южно-Сахалинск: СахКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1980, С.31 – 39.
  15. Удинцев Г.Б. (1962) Рельеф дна и вопросы тектоники // Труды океанограф. комиссии АН СССР, Т.10, № 3.
  16. Федотов С.А. (1965) Закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии. // М.. Труды ИФЗ АН СССР, № 203 (36), С.66 - 93.
  17. Федотов С.А. (1968) О сейсмическом цикле, возможности количественного районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР, С.121-150.
  18. Федотова З.И. (2006) О применении разностной схемы Мак-Кормака для задач длинноволновой гидродинамики // Вычисл. технологии. 2006. Т. 11, часть 2. Специальный выпуск. С. 53 – 63.