

Российская академия наук
Сибирское отделение
Институт вычислительных технологий

"УТВЕРЖДАЮ"
Директор ИВТ СО РАН

академик _____ Ю. И. Шокин

19 ноября 2007 года

**Контракт № 1н-07 от 22 марта 2007 г. 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 "**

**«РАСЧЕТ ВЫСОТ ВОЛН ЦУНАМИ ДЛЯ
ЗАЩИЩАЕМЫХ ПУНКТОВ
КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА»**

ИТОГОВЫЙ ОТЧЕТ

Руководитель работ

г.н.с., д.ф.-м.н., профессор

_____ Л. Б. Чубаров

Новосибирск, 2007 г.

Исполнители:

аспирант

д.ф.-м.н.

аспирант

к.ф.-м.н.

В.В.Бабайлов

В.К.Гусяков

С.В.Елецкий

З.И.Федотова

| | |
|---|----|
| Введение | 4 |
| 1. Модель генерации волн цунами подводными землетрясениями. | 4 |
| 1.1. Вычисление начальных смещений в очаговой области цунами | 5 |
| 1.1.1. Статические смещения от внутренних сосредоточенных сил | 6 |
| 1.1.2. Точечные модели очага землетрясения | 9 |
| 1.1.3. Пространственная модель разрыва | 13 |
| 1.1.4. Алгоритмическая реализация модели генерации волн цунами | 15 |
| 2. Сеймотектонические условия возникновения цунами в Курило-Камчатской зоне ... | 16 |
| 3. Алгоритмическое обеспечение расчета динамических характеристик цунами. | 24 |
| 3.1. Краткие сведения о программном компоненте | 24 |
| 3.2. Некоторые отличительные особенности программного компонента | 24 |
| 3.3. Вычислительный модуль системы | 25 |
| 3.4. Структура программы | 30 |
| 3.5. Руководство по использованию программного компонента | 34 |
| 4. Информационное обеспечение проекта | 42 |
| 4.1. Описание системы | 44 |
| 4.1.1. «Пользовательский» режим | 45 |
| 4.1.2. Локальная база данных | 45 |
| 4.1.3. Организация локального хранилища файлов | 50 |
| 4.1.4. Программное обеспечение | 51 |
| 4.1.5. О внутреннем устройстве приложения | 54 |
| 4.1.6. «Исследовательский» режим | 55 |
| 4.2. Форматы данных | 57 |
| 4.2.1. Бинарный формат grd-файла | 57 |
| 4.2.2. База данных main_db.mdb | 58 |
| 4.2.3. Текстовый формат dat-файла для экспорта распределений | 58 |
| 4.2.4. Файлы настроек утилит (ini-файлы) | 58 |
| 4.2.5. Файл мареограмм (dat-файл) | 58 |
| 4.3. Реализация проекта | 59 |
| 4.4. Планы развития системы | 59 |
| 5. Литература | 61 |

Введение

Содержание четвертого итогового отчета по Контракту, согласно календарному плану, непосредственно связано с изложением методик, использовавшихся при разработке базы данных модельных очагов цунамигенных землетрясений, при разработке базы данных максимальных высот волн в защищаемых пунктах для модельных очагов цунамигенных землетрясений, а также методики расчета этих мареограмм.

Отчет состоит из основного текста, в него включены таблицы и рисунки. Заказчику также передается усовершенствованная База данных, с модифицированным многооконным интерфейсом и дополнительными функциональными возможностями.

1. Модель генерации волн цунами подводными землетрясениями.

Для исследования возбуждения цунами наиболее адекватной математической моделью следует считать решение замкнутой системы уравнений динамической теории упругости, описывающей совместные колебания упругого полупространства (модель земной коры) и лежащего на нем слоя гравитирующей жидкости (модель океана). Такой подход обладает многими преимуществами при изучении процесса генерации цунами, позволяя связать волну цунами непосредственно с параметрами очага подводного землетрясения. Одним из его существенных ограничений, однако, является необходимость использования модели океана с плоским дном. Уравнение Ляме с гравитационными членами, используемое для описания возбуждения цунами, одновременно является уравнением движения для гравитационной волны в слое сжимаемой жидкости постоянной глубины. При переменной глубине жидкого слоя решение полной системы уравнений динамической теории упругости возможно лишь численными методами, применение которых к трехмерным задачам этого типа встречает все еще большие затруднения. Таким образом, до этапа стыковки с моделью распространения цунами волна считается распространяющейся по ровному дну и влияние его рельефа учитывается лишь начиная с этого момента. Глубина бассейна, однако, служит основным фактором, определяющим скорость распространения цунами и, следовательно, конфигурацию фронта и разнообразные эффекты фокусировки и рассеяния на неоднородностях дна. Поэтому переменность глубины бассейна должна быть существенным элементом модели распространения цунами.

Ранее было показано (Подъяпольский, 1968, 1978; Comer, 1984) что в длинноволновом приближении решение полной задачи о возбуждении цунами эквивалентно последовательному решению двух задач: (1) определению остаточных деформаций дна, создаваемых очагом землетрясения в эпицентральной области, (2) расчету распространения цунами в рамках, например, линейной теории мелкой воды с использованием полученных в результате решения первой задачи смещений дна в неоднородных граничных условиях либо в качестве начальных данных.

Такой подход широко применяется в работах по численному моделированию цунами на реальных участках акватории океана (см., напр., Abe, 1978, 1979; Aida, 1974, 1978; Ando, 1982; Geist, 1998; Hwang, Divoky, 1970) и в случаях, когда известны

достоверные параметры сейсмического источника либо распределение остаточных смещений дна, обеспечивает достаточно хорошее совпадение расчетных мареограмм с наблюдаемыми.

В настоящей работе мы также используем разделение полной задачи на два этапа. На первом этапе вычисляются остаточные смещения $U_z(x,y)$ на поверхности однородного упругого полупространства под действием внутреннего распределенного источника дислокационного типа. На втором этапе полученные вертикальные остаточные смещения поверхности полупространства $U_z(x,y)$ вводятся в уравнение неразрывности системы уравнений мелкой воды, используемой для описания распространения цунами. Смещения дна рассчитываются в некоторой ограниченной прямоугольной области Ω_0 , называемой областью задания источника; в узлах той же сетки, которая используется для расчета распространения цунами. Размеры этой области выбираются так, чтобы она содержала 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).

1.1. Вычисление начальных смещений в очаговой области цунами

Изучение остаточных смещений поверхности Земли в эпицентральных зонах землетрясений проводится в последние годы для всех разрушительных землетрясений, происходящих в пределах суши, а в некоторых случаях – и под дном океана. Картирование остаточных смещений дает возможность оценки (по их распределению) некоторых параметров очага землетрясения, таких как размеры разрыва, его ориентация, тип и величина подвижки. Возможность теоретического расчета остаточных смещений необходима также в задачах численного моделирования волн цунами, которые, согласно распространенному представлению, 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.

Теоретически остаточные смещения, вызванные источником дислокационного типа, помещенным внутри упругого полупространства, исследовались в работах (Chinnery, 1951; Maruyama, 1964; Press, 1965). В работе (Sato, Matsu'ura, 1974) получены выражения для компонент напряжений, смещений и вызванных ими наклонов свободной поверхности полупространства. В работе (Matsu'ura, Sato, 1975) теми же авторами выполнена серия расчетов полей остаточных смещений при различных параметрах модельного очага. В отечественной литературе можно отметить работы (Введенская, 1956, 1959), содержащие формулы для остаточных смещений от малой дислокации, в которых, однако, источник считался помещенным в безграничную упругую среду, так что влиянием свободной поверхности пренебрегалось. Для наиболее общего случая разрывного

нарушения в упругой среде сводка формул для вычисления остаточных смещений приведена в работе (Okada, 1985).

Создаваемые пространственным дислокационным источником остаточные смещения на поверхности однородного упругого полупространства рассчитываются по формулам, полученным в работе (Гусяков, 1978). Расчеты по эти формулам неоднократно сопоставлялись с расчетами по формулам, полученным в работе (Okada, 1985), при этом расхождения в результатах не выходят за пределы ошибок округления, определяющихся особенностями используемых вычислительных устройств. Преимуществом использования именно этой модели в настоящей работе является непосредственное участие разработчика (Гусякова В.К.) в проекте, а следовательно и доступность кодов, гибкость настроек алгоритмов и программы, понимание существа дела и следующая из этого надежность расчетного алгоритма.

В использованном в (Гусяков, 1978) подходе на основе формул для компонент смещений свободной поверхности упругого полупространства, возникающих под действием внутренних сосредоточенных сил, выводятся формулы для дипольных источников, являющихся точечными силовыми моделями очага землетрясения. Затем путем численного интегрирования находятся смещения от пространственной модели очага, характеризующейся длиной и шириной разрыва, азимутом простирания, углом падения, направлением подвижки в плоскости разрыва и величиной подвижки, равной амплитуде смещения противоположных берегов разрыва. Значения этих параметров выбираются из корреляционных соотношений с магнитудой землетрясения и сейсмотектонических особенностей очаговой области (подробнее об этом в разделе 2).

1.1.1. Статические смещения от внутренних сосредоточенных сил

Задача определения смещений в упругом теле, возникающих при приложенной нагрузке, является одной из основных задач классической теории упругости. Ее решения для различных постановок изложены в ряде учебников и руководств (Ляв, 1935; Лурье, 1955; Снеддон, Бэрри, 1961).

Простейший случай такого типа – это задача нахождения напряженного состояния в безграничной упругой среде, возникающего под действием простой сосредоточенной силы, приложенной к одной из точек этой среды. Математически такая задача сводится к нахождению решения уравнения равновесия

$$(\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} \bar{U} + \mu \Delta \bar{U} + \bar{F} = 0, \quad (1.1)$$

где \bar{U} – вектор смещения частиц среды относительно начального ненапряженного состояния, λ и μ – упругие параметры Ляме, \bar{F} – приложенная сила, отнесенная к единице объема.

Решение такой задачи методом интегральных преобразований приведено, например, в (Ляв, 1935). В наиболее общем случае (произвольно ориентированная сила \bar{F} , приложенная в точке с радиус-вектором \bar{a}) возникающие в точке с радиус-вектором \bar{R} смещения представляются формулой (Снеддон, Бэрри, 1961):

$$\bar{U}(\bar{R}) = \frac{\lambda + \mu}{8\pi\mu(\lambda + 2\mu)} \left[(\bar{R} - \bar{a}) \frac{(\bar{R} - \bar{a})\bar{F}}{|\bar{R} - \bar{a}|} + \frac{\lambda + 3\mu}{\lambda + \mu} \frac{\bar{F}}{|\bar{R} - \bar{a}|} \right], \quad (1.2)$$

Это соотношение может быть также получено из известной формулы Стокса, описывающей динамическое поле смещений, создаваемое включенной в момент времени $t = 0$ сосредоточенной силой.

Аналогичная задача для силы, приложенной к внутренним точкам упругого полупространства $z \geq 0$, ставится как краевая задача для уравнения (1.1) при граничных условиях

$$\sigma_z = 0, \quad \tau_{xz} = 0, \quad \tau_{yz} = 0 \quad \text{при } z=0, \quad (1.3)$$

выражающих отсутствие нормальных и касательных напряжений на свободной поверхности. Ее решение может быть получено на основе решения вида (1.2) для бесконечной упругой среды, если воспользоваться следующим приемом.

Рассмотрим частный случай решения (1.2) для силы величиной Q , приложенной в точке $(0,0,h)$ и действующей в положительном направлении оси z , и запишем в декартовой системе координат x, y, z компоненты создаваемого такой силой смещения:

$$U_x(x, y, z) = \frac{(\lambda + \mu)Q}{8\pi\mu(\lambda + 2\mu)} \frac{x(z-h)}{R_1^3}$$

$$U_z(x, y, z) = \frac{(\lambda + \mu)Q}{8\pi\mu(\lambda + 2\mu)} \left[\frac{z^2}{R_1^3} + \frac{\lambda + 3\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{R_1} \right], \quad (1.4)$$

$$U_y(x, y, z) = \frac{(\lambda + \mu)Q}{8\pi\mu(\lambda + 2\mu)} \frac{y(z-h)}{R_1^3}$$

где $R_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-h)^2}$.

При аналогичном воздействии в полубесконечном упругом теле, занимающем область $z \geq 0$ и находящемся в положении равновесия, компоненты смещения должны иметь в точке $(0,0,h)$ такие же особенности, какие имеют в этой точке компоненты, определяемые выражениями (1.4), и, кроме того, удовлетворять нулевым граничным условиям (1.3) на свободной поверхности. Этого можно достичь, изменив соответствующим образом решение (1.4).

Приложим в точке $(0,0,-h)$ силу, численно равную Q , но противоположно направленную. Из соображений симметрии ясно, что при совокупном действии обеих сил на плоскости $z = 0$ будут отсутствовать касательные напряжения τ_{xz} , τ_{yz} , но появятся нормальные напряжения σ_z , которые легко могут быть определены на основе известного решения для бесконечного упругого тела (см., например, (Снеддон, 1955):

$$\sigma_z^0 = -\frac{12\mu h^3}{(x^2 + y^2 + h^2)^{5/2}} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{4\mu h}{(x^2 + y^2 + h^2)^{3/2}}. \quad (1.5)$$

Для выполнения граничного условия $\sigma_z = 0$ теперь достаточно приложить к плоскости $z = 0$ нормальное напряжение противоположного знака.

Искомое решение получается сложением трех напряженных состояний:

- (1) напряженного состояния, создаваемого в бесконечном упругом теле действием силы Q , приложенной в точке $(0, 0, h)$;
- (2) напряженного состояния, создаваемого в бесконечном упругом теле силой $-Q$, приложенной в точке $(0, 0, -h)$;
- (3) напряженного состояния в полубесконечном упругом теле, создаваемого нормальной нагрузкой, распределенной на плоскости $z = 0$ и равной $-\sigma_z^0$

Первое из этих состояний непосредственно определяется формулами (1.4). Второе получается из (1.4) путем замены знаков у Q и h на противоположные. Наконец, третье может быть найдено с помощью потенциалов П.Ф.Папковича, для чего необходимо определить гармоническую функцию $\omega(x,y,z)$ из условия

$$\frac{1}{2\pi} \left(\frac{\partial \omega}{\partial z} \Big|_{z=0} \right) = -\sigma_z^0(x, y). \quad (1.6)$$

Решение по этому методу, называемому иногда методом зеркального отображения, задачи о действии сосредоточенной силы в упругом полупространстве приведено в книге (Лурье, 1955) для случаев нормальной и касательной сил, приложенных в точке $(0, 0, h)$ упругой среды. Окончательные формулы для компонент смещения при $z = 0$ имеют вид:

сила величиной Q , действующая вдоль оси z :

$$U_x^Q(x, y) = -\frac{Q}{4\pi\mu} \frac{x}{R^2} \left[\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{R}{R+h} + \frac{h}{R} \right], \quad (1.7)$$

$$U_y^Q(x, y) = -\frac{Q}{4\pi\mu} \frac{y}{R^2} \left[\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{R}{R+h} + \frac{h}{R} \right], \quad (1.8)$$

$$U_z^Q(x, y) = \frac{Q}{4\pi\mu} \frac{1}{R} \left[1 + \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{h^2}{R^2} \right], \quad (1.9)$$

сила величиной S , действующая параллельно оси x :

$$U_x^S(x, y) = \frac{S}{4\pi\mu} \frac{\mu}{\lambda + 2\mu} \frac{1}{R} \left[2 + \frac{\lambda + \mu}{\mu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{R}{R+h} + \left(\frac{\lambda + \mu}{\mu} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{R^2}{(R+h)^2} \right) \frac{x^2}{R^2} - \frac{h}{R+h} \left(1 - \frac{x^2}{R^2} \left(1 + \frac{R}{R+h} \right) \right) \right], \quad (1.10)$$

$$U_y^S(x, y) = \frac{S}{4\pi\mu} \frac{\mu}{\lambda + 2\mu} \frac{xy}{R^3} \left[\frac{\lambda + \mu}{\mu} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{R^2}{(R+h)^2} - \frac{h}{R+h} \left(1 + \frac{R}{R+h} \right) \right], \quad (1.11)$$

$$U_z^S(x, y) = \frac{S}{4\pi\mu} \frac{x}{R^2} \left[\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{R}{R+h} - \frac{h}{R} \right]. \quad (1.12)$$

На основе формул (1.10)-(1.12) можно выписать выражения для компонент смещения в случае силы величиной T , действующей параллельно оси y :

$$U_x^T(x, y) = \frac{T}{4\pi\mu} \frac{\mu}{\lambda + 2\mu} \frac{xy}{R^3} \left[\frac{\lambda + \mu}{\mu} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{R^2}{(R + h)^2} - \frac{R}{R + h} \left(1 + \frac{R}{R + h} \right) \right], \quad (1.13)$$

$$U_y^T(x, y) = \frac{T}{4\pi\mu} \frac{\mu}{\lambda + 2\mu} \frac{1}{R} \left[2 + \frac{\lambda + \mu}{\mu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{R}{R + h} + \left(\frac{\lambda + \mu}{\mu} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{R^2}{(R + h)^2} \right) \frac{x^2}{R^2} - \frac{h}{R + h} \left(1 - \frac{x^2}{R^2} \left(1 + \frac{R}{R + h} \right) \right) \right], \quad (1.14)$$

$$U_z^T(x, y) = \frac{T}{4\pi\mu} \frac{y}{R^2} \left[\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{R}{R + h} - \frac{h}{R} \right]. \quad (1.15)$$

В формулах (1.7) – (1.15) $R = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - h)^2}$.

Выписанные выражения дают решение задачи о смещении свободной границы упругого полупространства под действием внутренних сосредоточенных сил. Все дальнейшие выкладки и преобразования опираются на эти формулы.

1.1.2. Точечные модели очага землетрясения

Как известно (Введенская, 1956, 1959; Костров, 1975; Саваренский, 1972), в качестве точечных моделей очага землетрясения могут использоваться дипольные силовые источники. Они могут быть представлены комбинацией двух пар сил с равными и противоположно направленными моментами, либо комбинацией двух двойных сил без моментов, действующих перпендикулярно друг другу, одна из которых создает напряжение сжатия, другая - растяжения.

Поле смещений, создаваемое источником дипольного типа, может быть получено на основе решения для простых сосредоточенных сил путем дифференцирования по координатам источника. Для этого необходимо записать формулы (1.7)-(1.15) для случая сил, приложенных в произвольной точке (x_0, y_0, h) упругого полупространства, и после дифференцирования по соответствующей координате устремить x_0, y_0 к нулю, с тем чтобы получить дипольный источник в прежней точке. Поскольку дифференцирование по x_0, y_0 отличается от дифференцирования по x, y только знаком результата, в (1.7)-(1.15) можно выполнять дифференцирование вдоль осей x и y по координатам точки наблюдения, меняя знаки у окончательных выражений для того, чтобы получить правильный знак смещения.

В общем случае поле от произвольно ориентированного в пространстве диполя может быть разложено на девять составляющих, соответствующих девяти "эталонным" диполям, составленным из сил, ориентированных вдоль координатных осей x, y, z . Шесть из них - диполи с моментами, три - диполи без моментов.

Всего для трех компонент смещения получается таким образом 27 формул. За недостатком места мы их здесь не выписываем, любая из них непосредственно получается из (1.7) – (1.15) путем дифференцирования по соответствующей координате. Условимся в дальнейшем обозначать тип источника двумя верхними индексами у компоненты смещения, первый из которых означает величину и направление действия силы, второй - ось, вдоль которой производилось дифференцирование. Например, U_x^{Sy} - x -компонента

смещения от диполя с моментом, образованного силами S и $-S$ с плечом Δy , параллельным оси y ; U_z^{Qz} - z -компонента смещения от диполя без момента, образованного силами Q и $-Q$, точки приложения которых находятся на оси z на расстоянии Δz друг от друга.

Будем считать, что для всех диполей величины сил (Q, S, T) и расстояния между точками их приложения ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) одинаковы, их произведения (вида $F_i \cdot \Delta j$) будем называть величиной диполя и обозначать буквой M . В терминах дислокационной теории $M = \mu D_0 \delta \Sigma$,

$$(1.16)$$

где D_0 – конечная амплитуда смещения противоположных берегов разрыва, $\delta \Sigma$ – площадь элемента разрыва, μ – модуль жесткости среды.

Как известно (Введенская, 1959), силовая и дислокационная модели очага землетрясения эквивалентны между собой, поскольку поле смещений от разрыва совпадает с полем, которое создают в упругой среде без разрыва силовые источники, определенным образом расположенные на поверхности $\delta \Sigma$. Так, например, взбросовая подвижка на наклонной плоскости разрыва с углом падения δ , отсчитываемом от горизонтальной плоскости, моделируется системой диполей, представленной на рисунке 1.1а. На этом рисунке пунктиром показана вторая возможная плоскость, возникающая при замене разрыва его силовой моделью, в рамках которой эти плоскости являются неразличимыми. Для того, чтобы записать смещения, создаваемые такой подвижкой, через смещения от "эталонных" источников, рассмотрим произвольно ориентированный в плоскости xz диполь с моментом, линия действия которого образует угол δ с осью x (см. Рис. 1.1б).

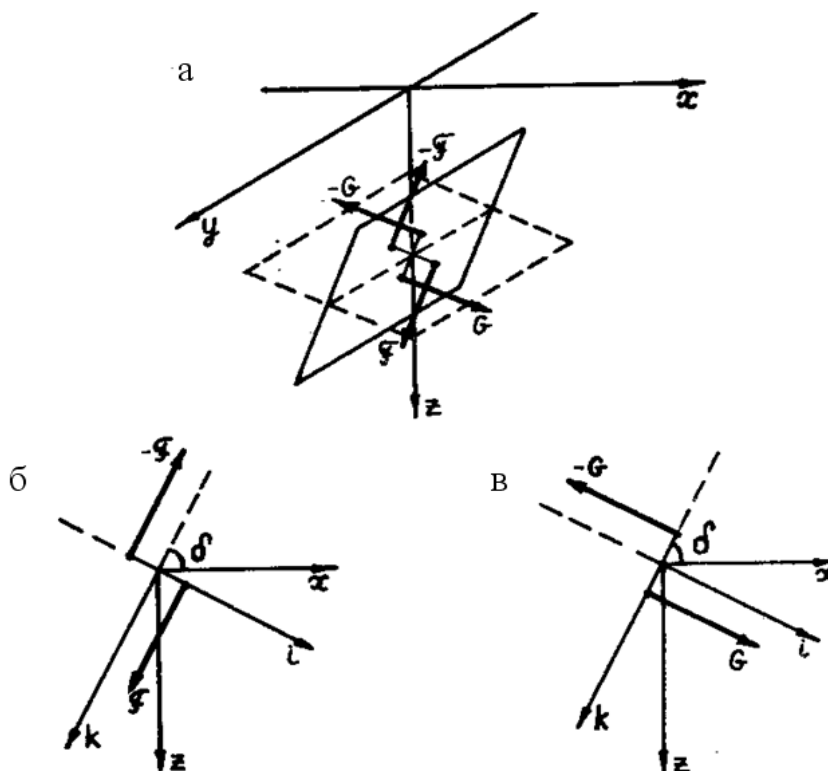


Рис.1.1. Силовая модель, эквивалентная взбросовой подвижке по наклонной плоскости разрыва (а); диполь с моментом, ориентированный вдоль оси y (б), направление сил перпендикулярно плоскости чертежа; диполь с моментом, ориентированный вдоль оси i (в), плечо диполя перпендикулярно плоскости чертежа. На рисунке (а) пунктиром показана другая возможная плоскость разрыва.

Введем в плоскости xz , параллельно фиксированной системе координат x, z , вращающуюся i, k , совместив их начала и направив ось k вдоль линии действия диполя. Для того, чтобы получить смещения от диполя с моментом, образованного силами F и $-F$, параллельными оси k , точки приложения которых находятся на оси i , нужно продифференцировать смещения, создаваемые силой F , по i . Для j – компоненты смещения ($j=x, y, z$) имеем:

$$\begin{aligned} F_j^{Fi}(\delta) &= \frac{\partial}{\partial i} U_j^F(\delta) = \frac{\partial}{\partial i} (U_j^Q \sin \delta - U_j^S \cos \delta) = \left(\frac{\partial}{\partial z} \cos(i, z) + \frac{\partial}{\partial x} \cos(i, x) \right) (U_j^Q \sin \delta - U_j^S \cos \delta) = \\ &= \frac{\partial U_j^Q}{\partial x} \sin^2 \delta - \frac{\partial U_j^S}{\partial z} \cos^2 \delta + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_j^Q}{\partial z} - \frac{\partial U_j^S}{\partial x} \right) \sin 2\delta = \\ &= U_j^{Qx} \sin^2 \delta - U_j^{Sz} \cos^2 \delta + \frac{1}{2} (U_j^{Qx} - U_j^{Sz}) \sin 2\delta. \end{aligned} \quad (1.17)$$

Смещения, создаваемые диполем с моментом, составленным из сил G и $-G$, параллельных оси i , с плечом вдоль оси k (рис.1.1в), получаются аналогичным образом:

$$\begin{aligned} U_j^{Gk}(\delta) &= \frac{\partial}{\partial k} U_j^G(\delta) = \frac{\partial}{\partial k} (U_j^Q \cos \delta + U_j^S \sin \delta) = \left(\frac{\partial}{\partial z} \cos(k, z) + \frac{\partial}{\partial x} \cos(k, x) \right) (U_j^Q \cos \delta + U_j^S \sin \delta) = \\ &= \frac{\partial U_j^S}{\partial z} \sin^2 \delta - \frac{\partial U_j^Q}{\partial x} \cos^2 \delta + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_j^Q}{\partial z} - \frac{\partial U_j^S}{\partial x} \right) \sin 2\delta = \\ &= U_j^{Sz} \sin^2 \delta - U_j^{Qx} \cos^2 \delta + \frac{1}{2} (U_j^{Qz} - U_j^{Sx}) \sin 2\delta. \end{aligned} \quad (1.18)$$

Совместное действие этих двух диполей моделирует взбросовую подвижку по разрыву с углом падения δ :

$$U_j^{Gz}(\delta) = U_j^{Fi}(\delta) + U_j^{Gk}(\delta) = (U_j^{Qz} - U_j^{Sx}) \cdot \sin 2\delta - (U_j^{Qx} + U_j^{Sz}) \cdot \cos 2\delta. \quad (1.19)$$

Сдвиговую (горизонтальную) подвижку по наклонной плоскости разрыва создает действие двух диполей, один из которых образован силами, параллельными оси y , с плечом вдоль оси i (перпендикулярно плоскости разрыва), другой образован силами, параллельными оси i , с плечом вдоль оси y (см. Рис. 1.2а). Выражения для смещений от таких диполей через действие эталонных источников получаются аналогичным образом. Для диполя, изображенного на рисунке 1.2б имеем:

$$\begin{aligned} U_j^{Ti}(\delta) &= \frac{\partial}{\partial i} U_j^T = \left(\frac{\partial}{\partial z} \cos(i, z) + \frac{\partial}{\partial x} \cos(i, x) \right) (u_j^T) = \\ &= \frac{\partial U_j^T}{\partial z} \cos \delta + \frac{\partial U_j^T}{\partial x} \sin \delta = U_j^{Tz} \cos \delta + U_j^{Tx} \sin \delta, \end{aligned} \quad (1.20)$$

для диполя, изображенного на рис.1.2в:

$$\begin{aligned} U_j^{Gy}(\delta) &= \frac{\partial}{\partial y} U_j^G(\delta) = \frac{\partial}{\partial y} (U_j^Q \cos \delta + U_j^S \sin \delta) = \\ &= \frac{\partial U_j^Q}{\partial y} \cos \delta + \frac{\partial U_j^S}{\partial y} \sin \delta = U_j^{Qy} \cos \delta + U_j^{Sy} \sin \delta. \end{aligned} \quad (1.21)$$

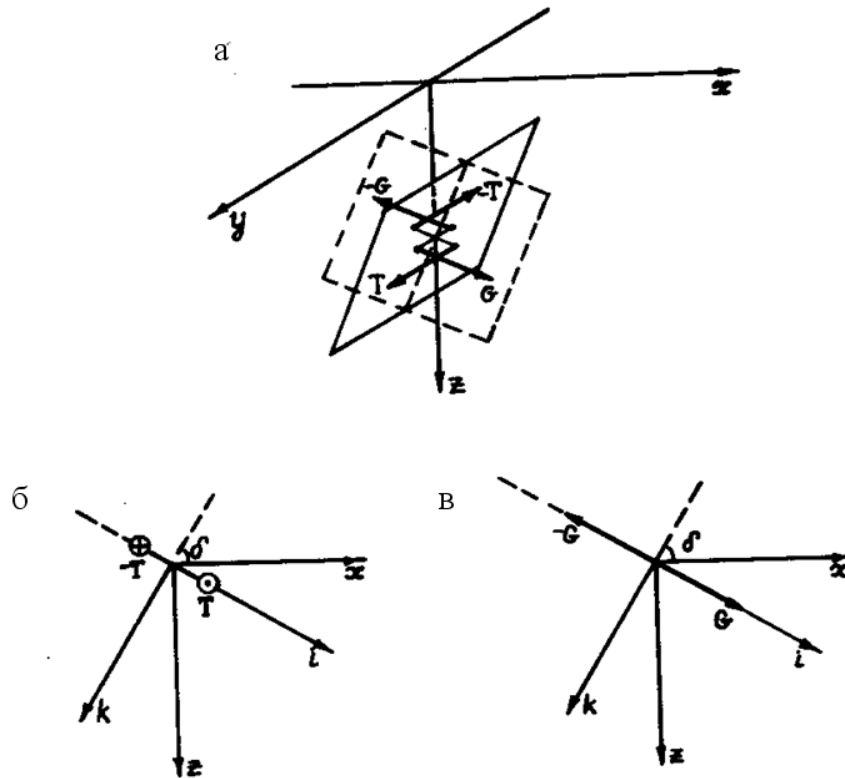


Рис.1.2. Силовая модель, эквивалентная сдвиговой подвижке по наклонной плоскости разрыва (а); диполь с моментом, ориентированный вдоль оси y (б), направление сил перпендикулярно плоскости чертежа; диполь с моментом, ориентированный вдоль оси i (в), плечо диполя перпендикулярно плоскости чертежа. На рисунке (а) пунктиром показана другая возможная плоскость разрыва.

Совместным действием этих двух диполей моделируется сдвиговая подвижка по наклонной плоскости разрыва:

$$U_j^{cob}(\delta) = U_j^{Ti}(\delta) + U_j^{Gy}(\delta) = (U_j^{Sy} + U_j^{Tx}) \cdot \sin \delta + (U_j^{Qy} + U_j^{Tz}) \cdot \cos \delta. \quad (1.22)$$

В общем случае подвижка по разрыву может иметь как взбросовую, так в сдвиговую компоненту. Если λ - угол между направлением подвижки, за которое принимается направление движения верхнего крыла разрыва, и горизонтальной линией на разрыве, то смещение от такой подвижки можно представить формулой

$$\begin{aligned} U_j(\delta, \lambda) &= U_j^{cob}(\delta) \cdot \sin \lambda - U_j^{cob}(\delta) \cdot \cos \lambda = \\ &= \left((U_j^{Qz} - U_j^{Sx}) \cdot \sin 2\delta - (U_j^{Qx} - U_j^{Sz}) \cdot \cos 2\delta \right) \cdot \sin \lambda - \\ &- \left((U_j^{Sy} + U_j^{Tx}) \cdot \sin \delta + (U_j^{Qy} + U_j^{Tz}) \cdot \cos \delta \right) \cdot \cos \lambda \end{aligned} \quad (1.23)$$

Выражение (1.23) содержит смещения от восьми из девяти "эталонных" диполей. Отсутствие составляющей от одного диполя, а именно U_j^{Ty} , есть следствие выбора направления простирания разрыва, совпадающим с осью y , чего всегда можно добиться поворотом системы координат.

В частном случае взбросовой подвижки ($\lambda = 90^\circ$) по разрыву с углом падения $\delta = 45^\circ$ из (1.23) получаем

$$U_j = U_j^{Qz} - U_j^{Sx}, \quad (1.24)$$

т.е. такой источник может быть представлен суммой двух двойных сил без моментов, ориентированных вдоль осей z и x , причем одна из них создает напряжение сжатия, другая - растяжения. Согласно (Введенская, 1956) такой источник действительно эквивалентен площадке разрыва в одной из двух возможных плоскостей, ориентированных под углом 45° к осям z и x .

1.1.3. Пространственная модель разрыва

Формула (1.23) дает смещение от элемента разрыва площадью $\delta\Sigma$, ориентация и тип подвижки которого заданы углами δ и λ . Чтобы получить смещения от пространственного разрыва, имеющего конечные размеры, нужно проинтегрировать (1.23) по плоскости разрыва Σ . Для разрыва прямоугольной формы с размерами L (длина) на W (ширина), это сводится к замене y на $y-\eta$, x на $x-\xi \cos \delta$, h на $h-\xi \sin \delta$ (где ξ и η - координаты точки на плоскости разрыва) и к выполнению интегрирования по переменной η в пределах от 0 до L и по переменной ξ от 0 до W :

$$U_j(x, y) = \int_0^L \int_0^W U_j(x-\xi \cos \delta, y-\eta, h-\xi \sin \delta) d\eta d\xi. \quad (1.25)$$

В некоторых частных случаях эталонной ориентации плоскости разрыва (например, взброс в вертикальной плоскости) интегралы оказывается возможным взять в явном виде, в общем же случае необходимо производить численное интегрирование. Подынтегральная функция в (1.25) изменяется достаточно плавно и не имеет особенностей в пределах области интегрирования, поэтому вычисление двойного интеграла не требует большого числа интерполяционных узлов и, следовательно, больших затрат машинного времени. В данной работе использовалась квадратурная формула Симпсона, заменяющая интеграл от функции $f(x)$ на отрезке $[a, b]$ суммой

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{b-a}{6} \left[f(a) + 4f\left(\frac{b-a}{2}\right) + f(b) \right] \quad (1.26)$$

Промежуток интегрирования $[0, W]$ по переменной ξ разбивался на k отрезков, на каждом из которых применялась формула (1.26). Затем выполнялось интегрирование по переменной η с разбиением интервала $[0, L]$ на l отрезков. Проверка правильности и точности работы процедуры численного интегрирования производилась путем сравнения результатов с вычислениями по явным формулам для некоторых частных случаев ориентации плоскости разрыва. Численные эксперименты показали, что для типичных значений параметров разрыва ($L=100\text{км}$, $W=50\text{км}$) значения $k=10$, $l=20$ обеспечивают точность результата интегрирования в 3-4 значащие цифры. Время счета для одного варианта (вычисляются значения смещения в узлах сетки размерностью 20 на 20) составляет около 5 сек на ПЭВМ типа Pentium IV.

Для расчета источника начального возмущения для каждого из цунамигенных землетрясений задавался стандартный набор параметров, определяющих начальное смещение поверхности океана над реальным рельефом дна от пространственной

дислокационной модели очага землетрясения. Такая модель характеризуется семью основными параметрами (см. Рис. 1.3):

- Длиной разрыва L (км),
- Шириной разрыва W (км),
- Глубиной верхнего края разрыва d (км),
- Азимутом простирания разрыва ψ ,
- Углом падения разрыва δ ,
- Направлением подвижки в плоскости разрыва λ ,
- Величиной подвижки D (м).

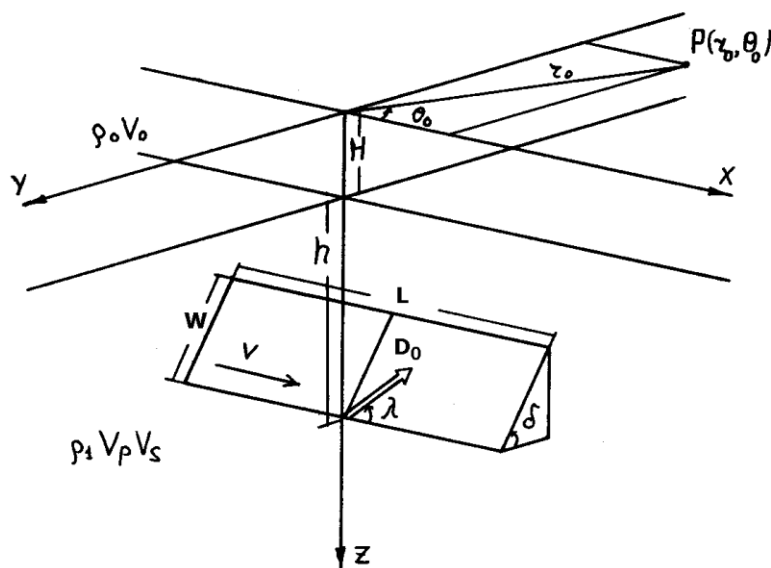


Рис.1.3 Модель среды и источника

Значения параметров L , W , d , D , углы δ и λ подбираются на основе информации, полученной из анализа сеймотектонических особенностей региона, , угол простирания (азимут) ψ принимается равным углу простирания глубоководной впадины или ориентации береговой линии в районе очага землетрясения.

Зависимость нарастания подвижки от времени аппроксимировалась следующей функцией:

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0, \\ t/\tau_0 & 0 \leq t \leq \tau_0, \\ 1, & t \geq \tau \end{cases} \quad (1.27)$$

где τ_0 - характерное время нарастания смещения по разрыву. Имеющиеся данные наблюдений (Кажуга, 1981) дают основания полагать, что главная часть остаточных деформаций в очагах цунамигенных землетрясений завершается в относительно короткое время (порядка 1-2 мин), которое можно считать малым по сравнению с характерным периодом цунами (15-20 мин).

Выполненные численные и лабораторные эксперименты (Гусяков, 1974; Наммаск, 1972, 1973) показывают, что вариации параметра τ_0 в пределах 1-50 с практически не оказывают влияния на амплитуду и форму возникающих в рамках такой модели волн

цунами, поэтому в расчетах значение параметра τ_0 принималось равным 10 с - одному шагу по времени разностной схемы, аппроксимирующей систему уравнений, описывающую движение волны цунами в океане.

1.1.4. Алгоритмическая реализация модели генерации волн цунами

Как уже упоминалось ранее, используемая нами модель генерации волн цунами характеризуется семью основными параметрами: длиной разрыва L (км), шириной разрыва W (км), глубиной верхнего края разрыва d (км), азимутом простирания разрыва ψ , углом падения разрыва δ , направлением подвижки в плоскости разрыва λ , величиной подвижки D (м). 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 по формулам, описанным в разделе «**Вычисление начальных смещений в очаговой области цунами**».

Для проведения расчета используется квадратная расчетная сетка, размерность которой определяется динамически так, чтобы шаг сетки был не более 4.72 км. При этом важно отметить, что размерность сетки по каждому из направлений должна быть нечетной, чтобы эпицентр землетрясения попадал на узел сетки. Сама расчетная область является квадратной, каждая из ее сторон принимается равной $2.5 \max(L, W)$. Это позволяет гарантировать попадание в область 90% общего объема возмущений для каждого источника.

Для всех источников при вычислении интегралов использовались значения порядка $k=100$, $l=200$ (см. пункт *Пространственная модель разрыва*), что с одной стороны позволило обеспечить необходимую точность, а с другой стороны сохранить относительно небольшое время вычисления начальных возмущений.

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. При пересчете начального возмущения пересчитывались сферические координаты локальной декартовой сетки:

$$\begin{cases} \phi_{i,j} = \frac{y_j - \frac{Width}{2}}{1.85} + \phi_0 \\ \varphi_{i,j} = \frac{x_j - \frac{Length}{2}}{1.85 \cos \phi_{i,j}} + \varphi_0 \end{cases}$$

где x_i и y_i – координаты узлов локальной сетки в декартовой системе, $\phi_{i,j}$ и $\varphi_{i,j}$ их координаты в сферической системе, ϕ_0 и φ_0 координаты эпицентра землетрясения, сдвинутые в узел сферической сетки. $Length$ и $Width$ - размеры локальной области.

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 принималась равной нулю, если этот узел не попадал внутрь локальной области.

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

2. Сейсмотектонические условия возникновения цунами в Курило-Камчатской зоне

Согласно широко распространенному представлению, вытекающему из концепции тектоники плит, сейсмические процессы в периферийных частях Тихого океана обусловлены поддвигом океанической плиты под континентальную в регионах островных дуг и активных континентальных окраин. Типичным примером такого региона является Курило-Камчатская сейсмоактивная зона. Северной оконечностью этой зоны можно считать район ее сочленения с Алеутской островной дугой, лежащий вблизи полуострова Камчатский, к северу от которого фоновая сейсмичность убывает достаточно быстро, хотя возможность редких сильных землетрясений на Беринговоморском побережье Камчатки сохраняется (подробнее об этом см. ниже). На юге Курило-Камчатская зона сопрягается с Японской сейсмоактивной зоной в районе пролива Цуруга (между островами Хоккайдо и Хонсю).

Очаги мелкофокусных землетрясений Курило-Камчатской зоны располагаются 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 (см. Рис. 2.1). Собственно наклонная фокальная зона (зона Заварицкого-Беньюфа), падающая под континент под углом 45° - 60° , 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).

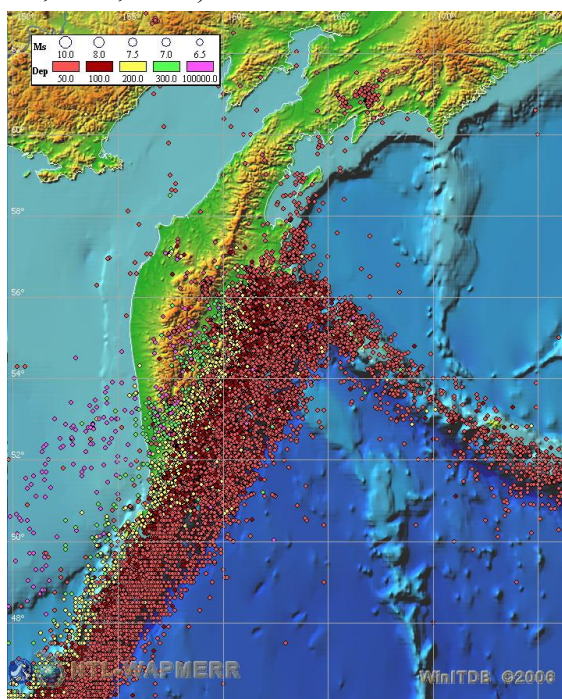


Рис.2.1. Карта эпицентров Курило-Камчатских землетрясений, зарегистрированных инструментально в 1900-2007 гг.

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 простирания крутой плоскости с простиранием островной дуги.

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 простиранию 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 простирания 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).

Анализ исторических данных по землетрясениям Курило-Камчатской зоны показывает, что цунамигенными являются, как правило, землетрясения с магнитудой выше 7.5, очаг которых вспарывает отдельный сеймотектонический блок, хотя в отдельных особых случаях (так. наз. «цунами-землетрясений») возможно возникновение опасных цунами и при более слабых землетрясениях. На рисунке 2.2 изображена карта

очагов цунамигенных землетрясений, происшедших в рассматриваемой зоне с 1737 года по настоящее время. Всего за весь период исторических наблюдений в северной половине Курило-Камчатской зоны произошло 48 цунамигенных землетрясений, сильнейшими из которых были события 1737 и 1952 года.

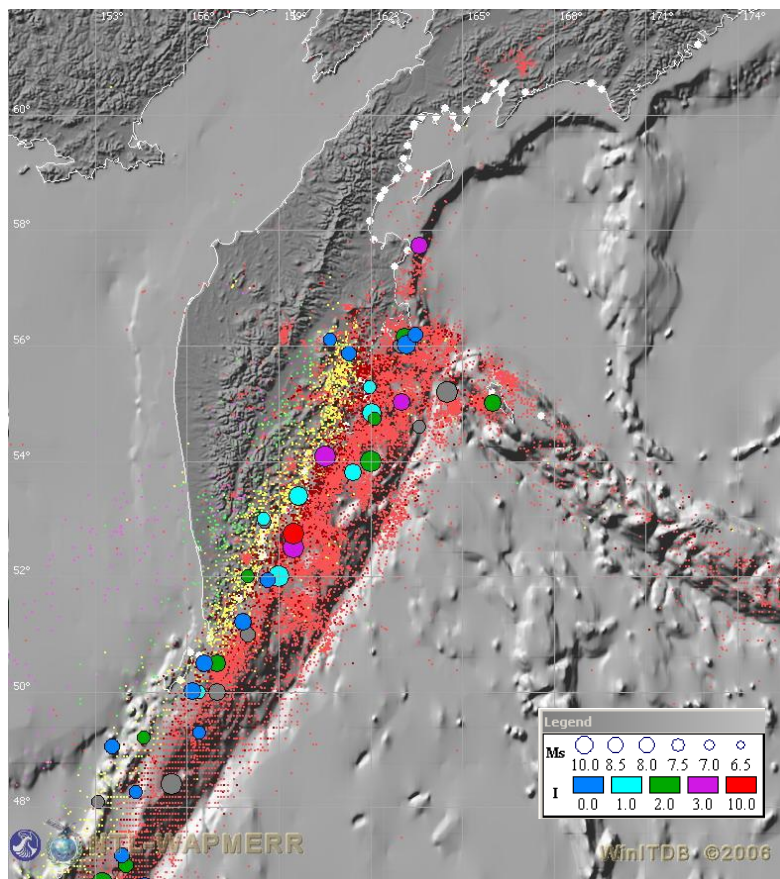


Рис.2.2. Карта очагов цунамигенных землетрясений, происшедших в Курило-Камчатском регионе с 1737 года по настоящее время.

Наличие в очагах мелкофокусных курильских землетрясений крутых разрывов с падением под океан, а также разрывов со сдвиговым механизмом, секущим островную дугу, находит свое объяснение в рамках так наз. клавишной модели поддвига, разработанной в Институте океанологии РАН (Лобковский, Сорохтин, 1979, 1980; Лобковский, Баранов, 1982). Не останавливаясь подробно на всех особенностях этой модели, рассмотрим только те ее аспекты, которые касаются механизма цунамигенных землетрясений. В основе этой 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 магнитудами до 9.2 и 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 подвига океанической плиты, будет деформироваться и разрушаться с образованием разрывов, круто падающих под океан, по которым должны происходить подвижки взбросового типа.

Важным аспектом этой модели является разбиение фронтальной части островной дуги поперечными разломами на отдельные клинообразные блоки (клавиши), характерный размер которых составляет порядка 100-150 км (О такой сегментированности островодужного клина свидетельствуют результаты многочисленных геофизических, геологических и геоморфологических исследований этой зоны (Аверьянова, 1968; Балакина, 1979; Гнибиденко и др., 1980; Тараканов, Ким, 1980), показывающих наличие 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 С.А.Федотовым в начале 60-х годов прошлого века (Федотов, 1965, 1968).

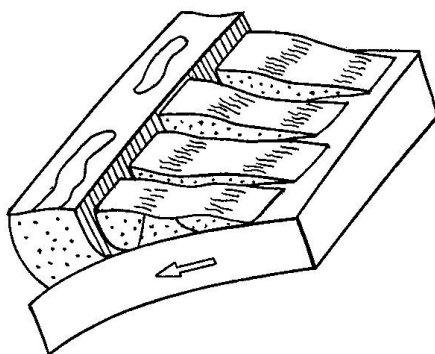


Рис.2.3. Клавишная модель сеймотектоники Курило-Камчатского региона (по Лобковский, Баранов, 1982). Фронтальная часть дуги разбита поперечными разломами на отдельные блоки (клавиши), находящиеся на различных стадиях сейсмического цикла. Очаги сильнейших землетрясений могут захватывать один-два или несколько соседних блоков.

Сейсмичность примыкающей с востока Алеутской сейсмической зоны обусловлена относительным движением Тихоокеанской и Берингоморской плит. Большинство сейсмических очагов здесь также располагаются в зоне островодужного клина, но в отличие от Курило-Камчатской зоны, отдельные блоки этого клина находятся в условиях фронтального сжатия, обусловленного косым (относительно зоны контакта) движением Тихоокеанской плиты, что находит свое отражение в преобладающих механизмах очагов этой зоны, в которых отмечается наличие значительной сдвиговой компоненты.

Отдельно следует сказать о сеймотектоническом режиме западной части Берингова моря, примыкающей к территории Корякского автономного округа (КАО). Особенностью этой зоны является то, что в ней отсутствует фоновая сейсмичность на уровне 7-8 энергетического класса (Викулин, 1998), однако возможны редкие сильные (с магнитудами до 7.7) землетрясения с большими или неизвестными периодами повторяемости. В отсутствие исторических данных о проявлениях цунами на берингоморском побережье КАО (за исключением проявления Чилийского цунами 23

мая 1960 года) реальностью его цунамиопасности в течение длительного времени пренебрегалось. Достаточно сказать, что во всех существовавших схемах цунамирайонирования Курило-Камчатского побережья (см., например, Атлас ..., 1978; Го и др., 1884, 1986; Пелиновский, Плинк, 1980) Беринговоморское побережье Камчатки не рассматривалось вовсе. Возникновение сильного цунамигенного землетрясения 23 ноября 1969 года ($M = 7.7$) с высотами волн в районе полуострова Озерной до 10-15 метров оказалось полной неожиданностью, но поскольку оно произошло вблизи практически незаселенного побережья и не вызвало значительного материального ущерба и человеческих жертв, это событие не привело к пересмотру существовавших схем цунамирайонирования Камчатки.

Озерновское землетрясение явилось первым из серии достаточно сильных ощутимых землетрясений на территории Корякского автономного округа. Через шесть с небольшим лет, 21 января 1976 года произошло землетрясение магнитуды 6.2 с эпицентром в районе западного побережья острова Карагинский, которое ощущалось с интенсивностью до 5-6 баллов в пос. Оссора. Следующее ощутимое (5-6 баллов) землетрясение произошло 10 сентября 1985 года в районе пос. Пахачи, эпицентр которого находился в прибрежной части Олюторского залива. Через шесть лет после него сильное землетрясение с магнитудой 7.1 произошло 8 марта 1991 года в глубине Корякского нагорья в районе пос. Хаилино и вызвало панику в поселке Тиличики и других населенных пунктах округа. Последнее по времени разрушительное землетрясение с магнитудой $M=7.5$ в той же зоне произошло 20 апреля 2006 года и сопровождалось значительным материальным ущербом. Таким образом, можно говорить о происходящем в последние годы значительном усилении сейсмической активности на территории Корякского автономного округа. Эпицентры всех этих сильных землетрясений находились частично или полностью на суше, поэтому волны цунами с высотами, достаточными для визуального обнаружения, не возникали, мареографные же установки в данном районе отсутствуют. Однако очаг следующего сильного землетрясения вполне может оказаться непосредственно под дном Карагинского залива и в таком случае возникновение цунами становится весьма вероятным событием.

О реальности угрозы цунами для Беринговоморского побережья КАО свидетельствует также обнаружение в полевых экспедиционных работах следов палеоцунами в торфяных отложениях прибрежных болот и маршей Укинской губы, острова Карагинский и на северном побережье Олюторского залива (Мелекесцев, Курбатов, 1993). Эти следы представляют собой прослойки песка и мелкого гравия морского происхождения (часто с остатками морских ракушек) в прибрежных лагунах и торфяниках, которые интерпретируются как отложения поднятого волной донного и берегового осадочного материала в процессе набегания и обратного отката волн цунами (Minoura, 1991). В частности, возраст найденного в районе пос. Хайлюля прослоя торфа, содержащего цунамигенный песчаный слой, радиоуглеродным методом был определен в интервале 1500-1550 гг. н.э. В результате полевых работ сезона 1993 года на острове Карагинском были выявлены и датированы радиоуглеродным и тефрохронологическими методами три доисторических цунами - около 720, 820 и 940 гг. н.э. Предположительно, сейсмотектонический подъем, приведший к возникновению 1.5-2-метровой береговой террасы и следы локального цунами на мысе Крещенный Огнем, идентифицируемого по

обнаруженному прослою раковин гастропод и устриц (возраст по C^{14} 820 ± 80 лет т.н.), вызваны одной причиной - катастрофическим землетрясением, происшедшим в этом районе около 1220-1230 гг. н.э. (Мелекесцев, Курбатов, 1994).

В соответствии с приведенными выше представлениями о сеймотектоническом режиме Курило-Камчатской зоны в качестве системы модельных очагов была выбран базовый набор пространственных дислокационных моделей очагов землетрясений, описанных в разделе 1 и представляющих возможные очаги цунамигенных землетрясений Курило-Камчатской зоны, угрожающих восточному побережью Камчатки. Базовый набор состоит из иерархического набора модельных очагов, предложенного А.А.Гусевым (ИВиС ДВО РАН) на основе анализа магнитуд и механизмов очагов реальных исторических землетрясений данного региона.

В основе базового набора лежат модельные очаги с размером плоскости разрыва 108 на 38 км, что при подвижке порядка 2.75 м дает сейсмический момент, соответствующий магнитуде $M_w=7.8$. Согласно (Викулин, 1990) именно такая магнитуда служит порогом сильного землетрясения, вспарывающего отдельный сейсмогенный блок и заполняющего «сейсмическую брешь». В основной сейсмофокальной плоскости Курило-Камчатской зоны эти очаги располагаются в широкой полосе, протягивающейся между осью глубоководного желоба и восточным побережьем Курильской гряды и Камчатского полуострова (см. Рис. 2.4).

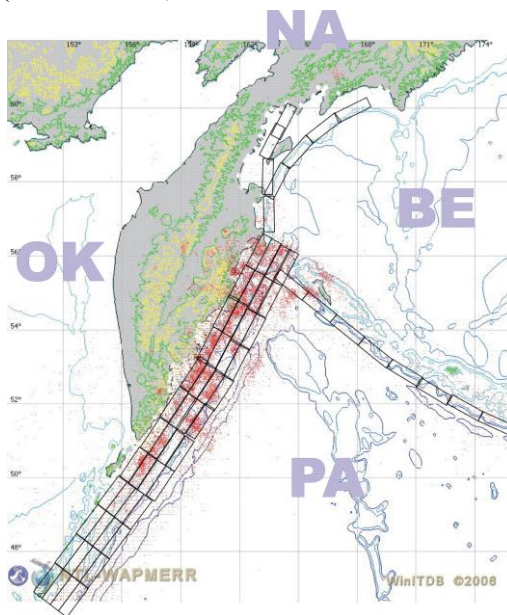


Рис. 2.4. Базовый набор модельных очагов с магнитудами $M_w=7.8$. Прямоугольные области на карте представляют собой проекции на свободную поверхность плоскостей разрыва в модельных источниках с длиной $D=108$ км и шириной $W=38$ км.

В качестве преобладающего механизма этих очагов принимается пологий надвиг с углом падения $\delta=15^\circ$, равным углу наклона главной литосферной границы раздела этой зоны между погружающейся океанической литосферой и надвигающимся на нее островодужным клином. Угол подвижки в плоскости разрыва λ при этом принимается равным 90° , что соответствует прямому поддвигу плиты в отсутствие какой-либо сдвиговой компоненты. Глубина верхнего края разрывов, находящихся во внешней (по отношению к островной дуге) части полосы задается равной 5 км, глубины во внутренних полосах увеличиваются, соответственно, каждая на величину вертикальной

протяженности разрыва, представляющих возможные очаги цунамигенных землетрясений Курило-Камчатской зоны, угрожающих восточному побережью Камчатки $dW=W*\sin \delta$.

В соответствии с принятой сеймотектонической моделью региона в толще островодужного клина возможны также землетрясения с преимущественно взбросо-сбросовым типом механизма (Лобковский, Баранов, 1982). Размеры плоскости разрыва для них те же, угол падения δ принимается равным $\pm 35^\circ$, угол подвижки λ равен 90° . Глубина расположения этих разрывов подбирается такой, что бы верхний край их располагался на расстоянии 5 км под дном океана.

Базовый набор очагов этой магнитуды (7.8) в зоне контакта Тихоокеанской и Берингоморской плит состоит из одной полосы очагов, протягивающихся вдоль материкового склона Алеутской гряды. Механизм этих очагов соответствует косому поддвигу (угол λ для них принимается равным 170°). Тихоокеанской плиты под Берингоморскую по очень пологой ($\delta=10^\circ$) плоскости раздела.

Зона сейсмичности Берингоморского побережья КАО представлена двумя полосами очагов, одна из которых протягивается вдоль границы шельфовой зоны и заканчивается в Олюторском заливе, вторая проходит по шельфу западнее острова Карагинский и заканчивается в районе поселка Хаилино в зоне очага землетрясения 1991 года. В качестве возможного механизма для этих очагов принимаются взбросо-сбросы по относительно крутым плоскостям разлома (углы $\delta=\pm 35^\circ$).

Перечисленные модельные очаги представляют собой базовый набор потенциальных источников цунами, от которых рассчитываются возможные высоты волн вблизи защищаемых пунктов Камчатского побережья. Дополнительно к ним рассматриваются также наборы более крупных очагов, соответствующих магнитудам $M_w=8.4$ и $M_w=9.2$. Размеры плоскостей разрыва очагов с $M_w=8.4$ представляют собой удвоенные размеры базовых источников с магнитудами $M_w=7.8$, т.е. для них принимается $L=215$ км и $W=75$ км. Эти очаги располагаются в той же основной полосе сейсмичности, что и базовые очаги с $M_w=7.8$ в зоне контакта Тихоокеанской плиты с Охотоморской и Берингоморской плитами, но отсутствуют вблизи Берингоморского побережья Корякии (см. Рис. 2.5).

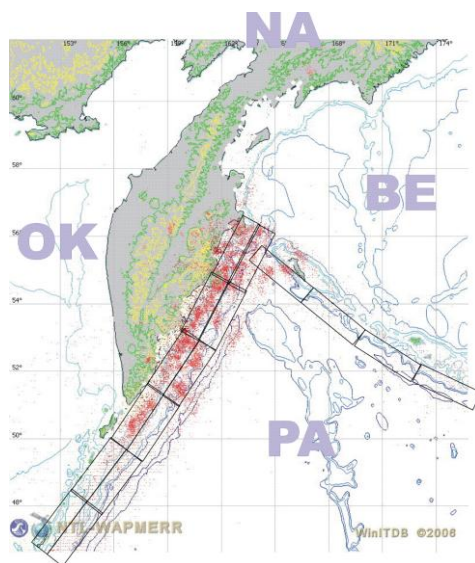


Рис.2.5. Набор модельных очагов с магнитудами $M_w=8.4$. Прямоугольные области на карте представляют собой проекции на свободную поверхность плоскостей разрыва в модельных источниках с длиной $D=215$ км и шириной $W=75$ км.

В качестве возможного механизма для них также принимаются пологие надвиги ($\delta=15^\circ$, $\lambda=90^\circ$) для зоны контакта Тихоокеанской и Охотоморской плит, и косые поддвиги ($\delta=10^\circ$, $\lambda=170^\circ$) для зоны контакта Тихоокеанской и Берингоморской плит.

В качестве моделей предельно сильных возможных землетрясений Курило-Камчатской зоны рассматриваются очаги с $M_w=9.2$, представляемые разрывами с $L=430$ км и $W=150$ км. Они располагаются как в зоне контакта Тихоокеанской и Охотоморской плит (3 очага), где представляют собой поддвиги ($\delta=15^\circ$, $\lambda=90^\circ$) по главной литосферной границе раздела этой зоны, так и в зоне контакта Тихоокеанской и Берингоморской плит (2 очага), где моделируются косым поддвигом ($\delta=10^\circ$, $\lambda=170^\circ$) Тихоокеанской плиты под Берингоморскую (см. Рис. 2.6).

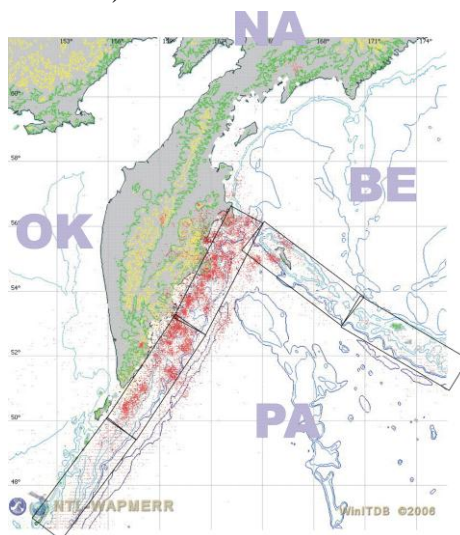


Рис. 2.6. Набор модельных очагов с магнитудами $M_w=9.2$. Прямоугольные области на карте представляют собой проекции на свободную поверхность плоскостей разрыва в модельных источниках с длиной $D=430$ км и шириной $W=150$ км.

Дополнительно к описанной системе модельных очагов целесообразно рассмотреть возможную систему очагов с расположением в районе внешнего (по отношению в желобу) поднятия (см. Рис. 2.7).

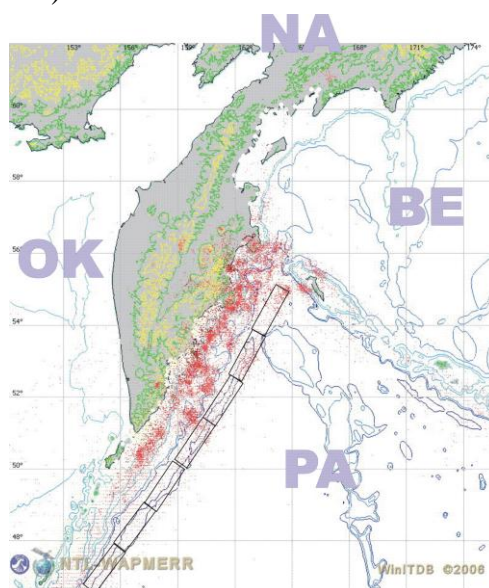


Рис. 2.7. Дополнительный набор модельных очагов с магнитудами $M_w=8.1$. Прямоугольные области на карте представляют собой проекции на свободную поверхность плоскостей разрыва в модельных источниках с длиной $D=150$ км и шириной $W=52$ км.

Историческим аналогом такого землетрясения является недавнее землетрясение с $M_s=8.2$, произошедшее 13 января 2007 года в районе глубоководного желоба, лежащем против острова Симушир. Такие землетрясения, по мнению А.А.Гусева, могут возникать на всем протяжении Курило-Камчатского желоба, их магнитуды могут достигать значений $M_w=8.1$. Соответственно этому значению магнитуды, размеры плоскости разрыва выбираются равными 150 на 52 км, возможный механизм очага – взбросо-сбросовые подвижки по крутым плоскостям разрыва ($\delta=\pm 45^\circ$, $\lambda=90^\circ$).

3. Алгоритмическое обеспечение расчета динамических характеристик цунами.

Для выполнения серийных расчетов распространения цунами был разработан программный компонент, не входящий в комплект программного обеспечения поддержки «пользовательского» режима. Выполняемые им функции обеспечены набором алгоритмического и программного обеспечения, поддерживающего «исследовательский» режим работы. Назначение этого компонента – гидродинамическое моделирование трансформации волны цунами от зоны начального возмущения к защищаемым пунктам на берегу в рамках теории мелкой воды в системе координат "долгота-широта" (λ, φ). Функциональные возможности этой системы, а также её краткое описание, включающее математическую постановку задачи и методы её решения, приводятся ниже.

3.1. Краткие сведения о программном компоненте

Название: MassGlobalCalcul

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

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

Метод решения: конечно-разностные алгоритмы типа Мак-Кормака на неподвижной равномерной прямоугольной сетке; для регуляризации решения применяются метод сглаживания и ряд специальных дополнительных процедур (по выбору).

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.

3.2. Некоторые отличительные особенности программного компонента

- Полный контроль выделения оперативной памяти и экономный её расход (но не в ущерб производительности). Отсутствие зарезервированной, неиспользуемой памяти.
- Полный контроль вводимой информации, её 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 расчётов является высокой.

3.3. Вычислительный модуль системы.

Одной из основных частей *системы* является математическое моделирование динамики волн цунами с последующим усвоением результатов численных расчетов. Эффективность этого звена системы определяется положенной в основу гидродинамической моделью и ее численной реализацией, а также выбранными для этого программными средствами. Предварительное изучение поставленной проблемы показало, что для определения максимальных высот волн в расчетных мареографах, установленных в ближайших к защищаемым пунктам прибрежных точках, и, отождествляемых с защищаемыми пунктами, достаточно использовать классические уравнения мелкой воды.

Эта модель характеризуется набором “физических”, “географических” и “математических” параметров. К физико-географическим параметрам относятся начальные данные (форма начального возмущения свободной поверхности), форма границ (очертания берегов и сооружений) и граничные условия, батиметрия, шероховатость донной поверхности, ветровое трение, коэффициенты турбулентного перемешивания и др. Математические параметры носят виртуальный характер и возникают в ходе построения вычислительных алгоритмов.

Вычислительный модуль системы включает в себя вычислительный алгоритм расчета распространения цунами, обеспечивающий два типа границ: взаимодействие с вертикальными непроницаемыми стенками и выход волн за границы расчетной области.

Этот алгоритм реализует конечно-разностный метод, аналогичный двухшаговой схеме Мак-Кормака, в рамках модели мелкой воды.

При моделировании реальных событий приходится учитывать кривизну земной поверхности, поэтому при описании законов распространения и трансформации цунами на большие расстояния уравнения гидродинамики записываются на сфере. В географической системе координат линейные уравнения мелкой воды с учётом воздействия внешних сил Кориолиса и донного трения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left[\frac{\partial (Hu)}{\partial \lambda} + \frac{\partial (Hv \cos \varphi)}{\partial \varphi} \right] &= 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{g}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} &= f_1, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{g}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} &= f_2. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Здесь R – средний радиус земли, φ – географическая широта, λ – географическая долгота, t – время, $h = H + \eta$ – полная глубина, H – глубина невозмущенного слоя жидкости, η – смещение свободной поверхности, g – ускорение силы тяжести; u и v – компоненты вектора скорости по направлениям λ и φ соответственно,

$f_1 = lv - g \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h}$, $f_2 = -lu - g \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h}$, $l = 2\omega \sin \varphi$, ω – угловая скорость вращения Земли, φ – географическая широта, C – коэффициент Шези, определяемый из соотношения $C = \frac{R^{1/6}}{n}$ (формула Маннинга), R – гидравлический радиус, обычно принимаемый для широкого открытого русла равным глубине H , n – коэффициент групповой шероховатости (его размерность [сек/м^{1/3}]).

Нелинейные уравнения мелкой воды на сфере могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left[\frac{\partial hu}{\partial \lambda} + \frac{\partial hv \cos \varphi}{\partial \varphi} \right] &= 0, \\
 \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{R} \left[\frac{1}{2 \cos \varphi} \frac{\partial u^2}{\partial \lambda} + v \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \frac{g}{\cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} \right] &= f_1, \\
 \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{R} \left[\frac{u}{\cos \varphi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{1}{2} \frac{\partial v^2}{\partial \varphi} + g \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} \right] &= f_2.
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Приведём вычислительные алгоритмы для решения уравнений мелкой воды в географической системе координат (φ, λ) .

Пусть $\Omega(\lambda, \varphi) = \{(\lambda, \varphi) : \lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2, \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2, \lambda_1, \varphi_1, \lambda_2, \varphi_2 - const\}$ – область в плоскости географических координат φ и λ . Введём в области Ω равномерную прямоугольную сетку: $\bar{\Omega} = \{(\lambda_i, \varphi_j) : \lambda_1 \leq \lambda_i \leq \lambda_2, \varphi_1 \leq \varphi_j \leq \varphi_2, 0 \leq i \leq N_\lambda, 0 \leq j \leq N_\varphi\}$ с шагами $\Delta \lambda$ и $\Delta \varphi$ по пространственным переменным λ и φ , соответственно. Пусть $\Delta \tau^n$ ($\Delta \tau^n = t^{n+1} - t^n$) – шаг по времени.

Введем сеточную функцию $\phi_{ij}^n = \phi(\lambda_i, \varphi_j, t^n)$ и аппроксимируем систему уравнений (3.1) во внутренних узлах сетки $\bar{\Omega}$ явной двухшаговой конечно-разностной схемой типа Мак–Кормака:

1 шаг –

$$\begin{aligned}
 \frac{h_{ij} - h_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{1}{R \cos \varphi_j} \left[\frac{H_{ij}^n u_{ij}^n - H_{i-1j}^n u_{i-1j}^n}{\Delta \lambda} + \frac{\cos \varphi_j H_{ij}^n v_{ij}^n - \cos \varphi_{j-1} H_{ij-1}^n v_{ij-1}^n}{\Delta \varphi} \right] &= 0, \\
 \frac{u_{ij} - u_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{g}{R \cos \varphi_j} \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{i-1j}^n}{\Delta \lambda} &= f_{1ij}^n, \\
 \frac{\hat{v}_{ij} - v_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{g}{R} \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{ij-1}^n}{\Delta \varphi} &= f_{2ij}^n.
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

2 шаг –

$$\begin{aligned} \frac{h_{ij}^{n+1} - (h_{ij}^n + h_{ij})/2}{\tau^n/2} + \frac{1}{R \cos \varphi_j} \left[\frac{H_{i+1j}^n u_{i+1j} - H_{ij}^n u_{ij}}{\Delta \lambda} + \frac{\cos \varphi_{j+1} H_{ij+1}^n \hat{v}_{ij+1} - \cos \varphi_j H_{ij}^n \hat{v}_{ij}}{\Delta \varphi} \right] &= 0, \\ \frac{u_{ij}^{n+1} - (u_{ij}^n + u_{ij})/2}{\tau^n/2} + \frac{g}{R \cos \varphi_j} \frac{h_{i+1j} - H_{i+1j}^n - h_{ij} + H_{ij}^n}{\Delta \lambda} &= f_{1ij}, \\ \frac{v_{ij}^{n+1} - (v_{ij}^n + \hat{v}_{ij})/2}{\tau^n/2} + \frac{g}{R} \frac{h_{ij+1} - H_{ij+1}^n - h_{ij} + H_{ij}^n}{\Delta \varphi} &= f_{2ij}, \end{aligned} \quad (3.4)$$

Для системы уравнений (3.2) выпишем конечно-разностный алгоритм, аналогичный (3.3) – (3.4):

1 шаг –

$$\begin{aligned} \frac{h_{ij} - h_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{1}{R \cos \varphi_j} \left[\frac{h_{ij}^n u_{ij}^n - h_{i-1j}^n u_{i-1j}^n}{\Delta \lambda} + \frac{\cos \varphi_j h_{ij}^n v_{ij}^n - \cos \varphi_{j-1} h_{i-1j}^n v_{i-1j}^n}{\Delta \varphi} \right] &= 0, \\ \frac{u_{ij} - u_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{1}{R \cos \varphi_j} \left[\frac{(u_{ij}^n)^2 - (u_{i-1j}^n)^2}{2\Delta \lambda} + g \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{i-1j}^n}{\Delta \lambda} \right] + \frac{v_{ij}^n}{R} \frac{u_{ij}^n - u_{i-1j}^n}{\Delta \varphi} &= f_{1ij}^n, \\ \frac{\hat{v}_{ij} - v_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{u_{ij}^n}{R \cos \varphi_j} \frac{v_{ij}^n - v_{i-1j}^n}{\Delta \lambda} + \frac{1}{R} \left[\frac{(v_{ij}^n)^2 - (v_{i-1j}^n)^2}{2\Delta \varphi} + g \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{i-1j}^n}{\Delta \varphi} \right] &= f_{2ij}^n. \end{aligned}$$

2 шаг –

$$\begin{aligned} \frac{h_{ij}^{n+1} - (h_{ij}^n + h_{ij})/2}{\tau^n/2} + \frac{1}{R \cos \varphi_j} \left[\frac{h_{i+1j} u_{i+1j} - h_{ij} u_{ij}}{\Delta \lambda} + \frac{\cos \varphi_{j+1} h_{ij+1} \hat{v}_{ij+1} - \cos \varphi_j h_{ij} \hat{v}_{ij}}{\Delta \varphi} \right] &= 0, \\ \frac{u_{ij}^{n+1} - (u_{ij}^n + u_{ij})/2}{\tau^n/2} + \frac{1}{R \cos \varphi_j} \left[\frac{(u_{i+1j})^2 - (u_{ij})^2}{2\Delta \lambda} + g \frac{h_{i+1j} - H_{i+1j}^n - h_{ij} + H_{ij}^n}{\Delta \lambda} \right] + \frac{\hat{v}_{ij}}{R} \frac{u_{ij+1} - u_{ij}}{\Delta \varphi} &= f_{1ij}, \\ \frac{v_{ij}^{n+1} - (v_{ij}^n + \hat{v}_{ij})/2}{\tau^n/2} + \frac{u_{ij}}{R \cos \varphi_j} \frac{\hat{v}_{i+1j} - \hat{v}_{ij}}{\Delta \lambda} + \frac{1}{R} \left[\frac{(\hat{v}_{ij+1})^2 - (\hat{v}_{ij})^2}{2\Delta \varphi} + g \frac{h_{ij+1} - H_{ij+1}^n - h_{ij} + H_{ij}^n}{\Delta \varphi} \right] &= f_{2ij}. \end{aligned}$$

Для работы описанного выше алгоритма требуется постановка граничных условий, а также задание начального условия, батиметрии и параметров разностного метода. Расчетная область $\bar{\Omega}$, внешняя граница которой является контуром прямоугольника, включает, в соответствии с реальной геометрией, как водную поверхность, так и участки суши, которые соответствуют островам и береговой зоне. Для данного проекта на основе предварительного анализа исторических данных о цунами в акватории полуострова Камчатка и в соответствии с концепцией конструирования набора модельных источников в качестве базовой расчетной области был выбран район, простирающийся по долготе от 150 до 177 градусов Восточной долготы и по широте от 45 до 62 градусов Северной широты.

В системе 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.

Как было сказано выше, область расчета представляет собой прямоугольник $\Omega(\lambda, \varphi) = \{(\lambda, \varphi) : \lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2, \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2\}$ в области изменения переменных λ, φ . Верхняя и нижняя стороны прямоугольника параллельны экватору, а левая и правая проходят по меридианам. Звенья границы “вертикальная стенка” проходят через узлы равномерной прямоугольной сетки так, что всегда параллельны внешним сторонам прямоугольника $\Omega(\lambda, \varphi)$. На фрагментах границы, являющихся меридианами, граничные условия для разностной схемы имеют вид: $u = 0, \partial v / \partial \lambda = 0, \partial \eta / \partial \lambda = 0$; а на параллелях, соответственно $v = 0, \partial u / \partial \varphi = 0, \partial \eta / \partial \varphi = 0$.

На внешних границах $\Omega(\lambda, \varphi)$ поставлены условия Зоммерфельда. В случае используемой системы координат они имеют вид следующих соотношений на параллелях

$$R \frac{\partial \eta}{\partial t} \pm c \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} = 0,$$

$$R \frac{\partial u}{\partial t} \pm c \frac{\partial u}{\partial \varphi} = 0,$$

$$R \frac{\partial v}{\partial t} \pm c \frac{\partial v}{\partial \varphi} = 0$$

и на меридианах

$$R \frac{\partial \eta}{\partial t} \pm \frac{c}{\cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} = 0,$$

$$R \frac{\partial u}{\partial t} \pm \frac{c}{\cos \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} = 0,$$

$$R \frac{\partial v}{\partial t} \pm \frac{c}{\cos \varphi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} = 0,$$

$c = \sqrt{gh}$, выбор знака \pm зависит от направления внешней нормали к соответствующей стороне (границе) прямоугольника.

Для данного проекта батиметрия поверхности дна и топография суши являются фиксированными, хранятся в соответствующей базе данных и используются вычислительным модулем и модулем визуализации. Математически эти данные представляют собой сеточную функцию $\tilde{H}(\lambda_i, \varphi_j)$, $0 \leq i \leq N_\lambda, 0 \leq j \leq N_\varphi$, определенную в узлах дискретной области $\bar{\Omega}$. Значения $\tilde{H}(\lambda_i, \varphi_j)$ определяются как численные значения глубин и высот (возвышение суши над уровнем моря), заданных на равномерной 1-минутной сетке, покрывающей участок от 153 до 173 градусов В.Д. и от 47 до 62 градусов С.Ш. Отметим, что $\tilde{H}(\lambda_i, \varphi_j)$ совпадает с $H(\lambda_i, \varphi_j)$ – глубиной невозмущенного слоя жидкости – в “водных” точках области $\bar{\Omega}$. Значения высот используются при определении заплеска на сухой берег.

Начальное возмущение свободной поверхности океана, порожденного модельным цунамигенным землетрясением, обеспечивается специальным модулем расчета. Для Камчатского региона, например, определены параметры наиболее вероятных катастрофических землетрясений для расчёта начальных возмущений свободной поверхности η_0 по модели Подъяпольского-Гусякова-Окады. Начальные u_0 и v_0 скорости

полагаются нулевыми. Для расчета по описанному выше алгоритму необходимо задать значения физических параметров (R, ω, g, k), а также шаг по времени разностной схемы. Последний не является постоянным, а на каждом шаге вычисляется из условия устойчивости:

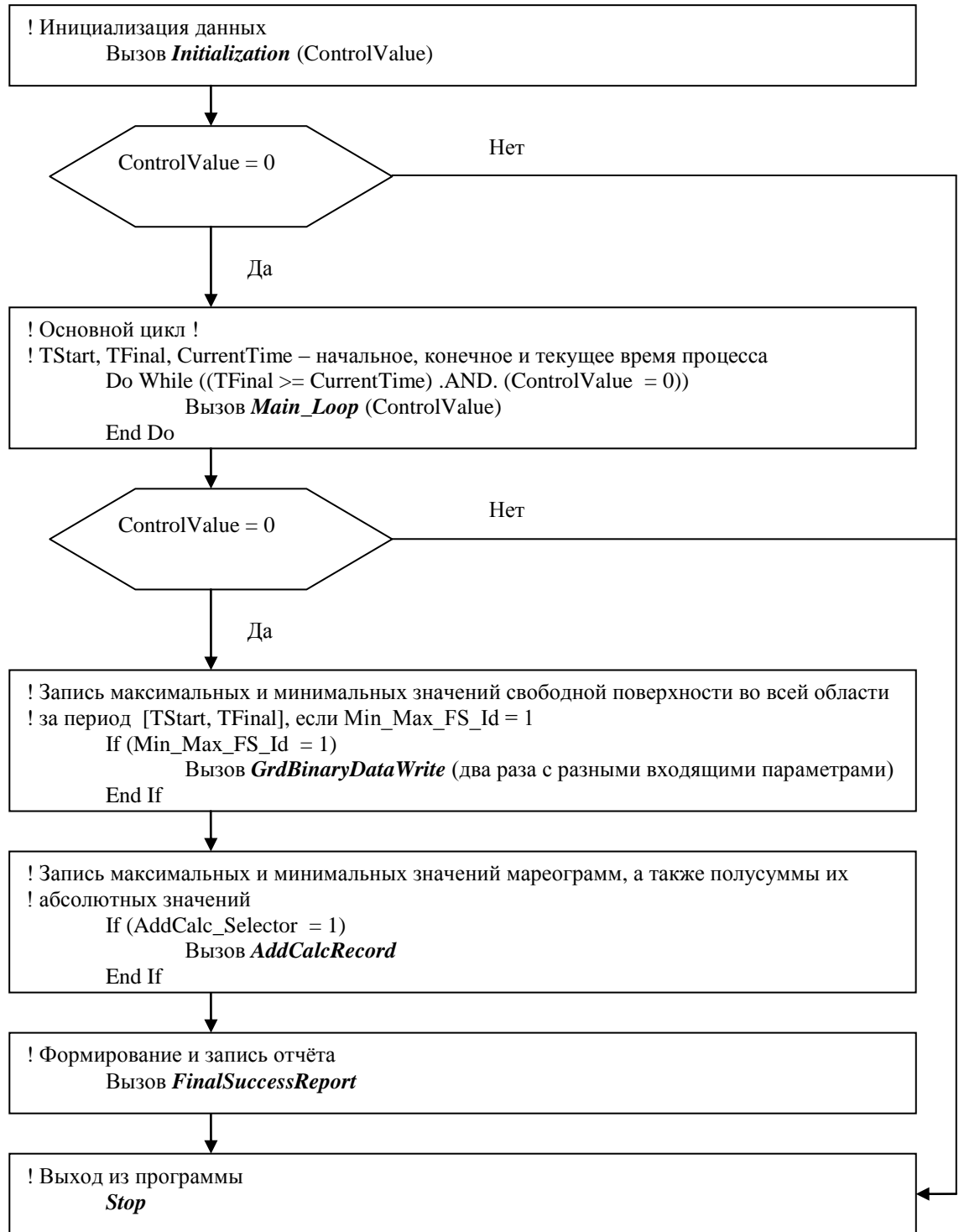
$$K = \frac{\tau^{n+1}}{R} \left(\max_{\bar{\Omega}} (u_{ij}^n) / (\Delta \lambda \min(\cos \varphi_1, \cos \varphi_2)) + \right. \\ \left. + \max_{\bar{\Omega}} (v_{ij}^n) / \Delta \varphi + \sqrt{g \left(1 / (\Delta \lambda \min(\cos \varphi_1, \cos \varphi_2))^2 + 1 / (\Delta \varphi)^2 \right) \max_{\bar{\Omega}} (h_{ij}^n)} \right).$$

Здесь K – число Куранта. Теоретически $K = 1$, но в расчетах предусматривался некоторый запас устойчивости, поэтому принималось $K = 0.9$.

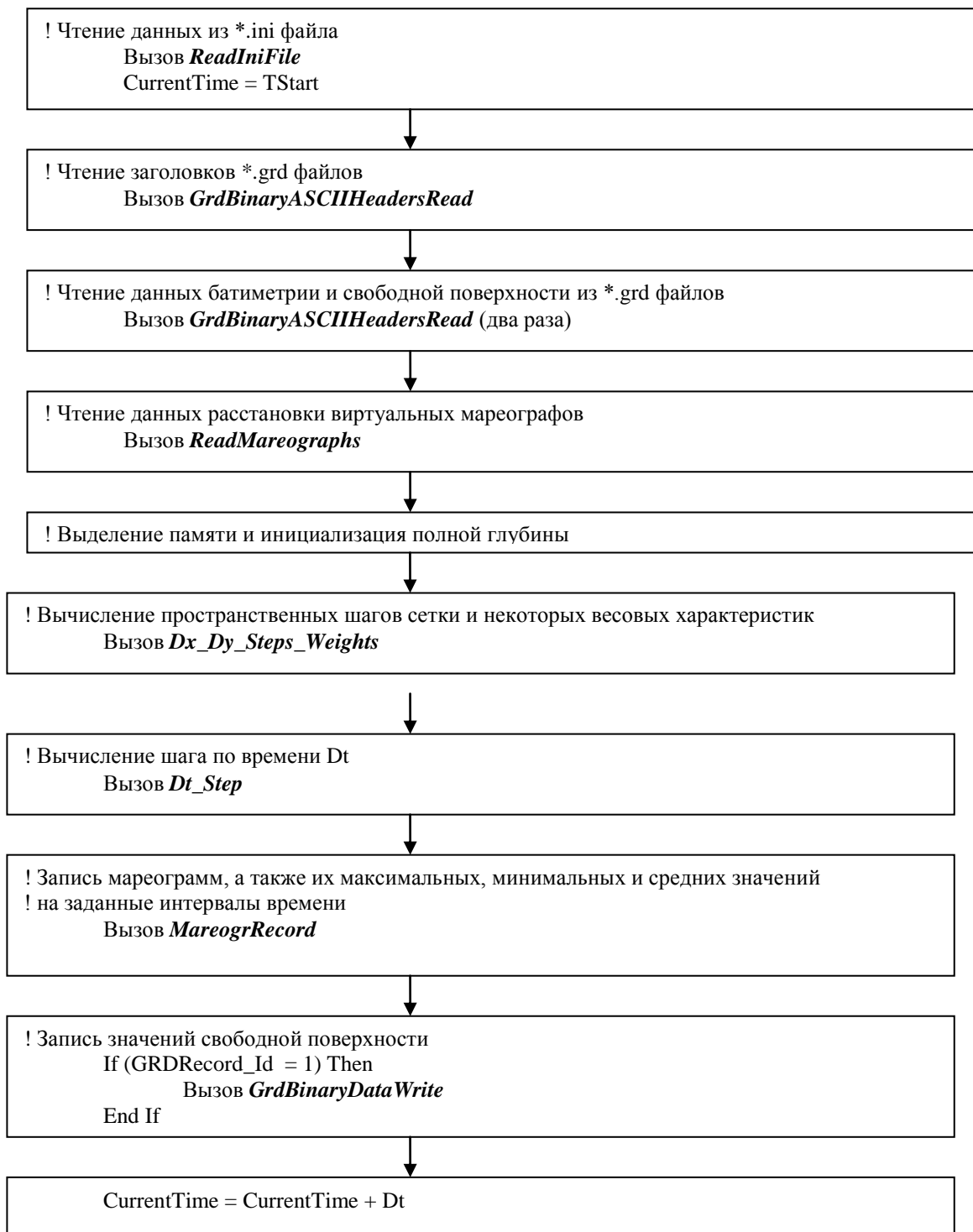
Для стабилизации решения в случае возникновения разного рода вычислительной неустойчивости использовались следующие вспомогательные методы:

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

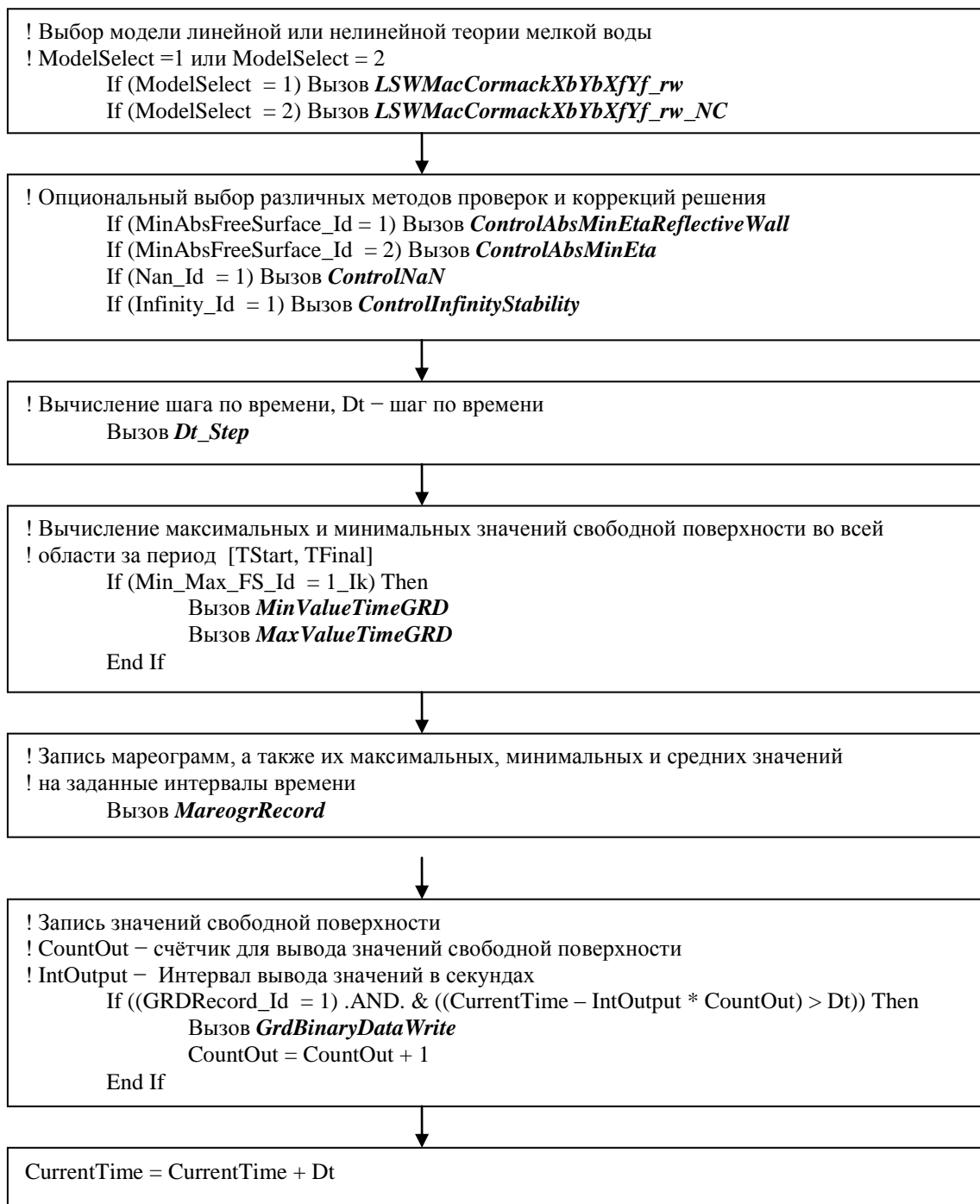
3.4. Структура программы



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



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



Упрощённая 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**

Опишем их функциональное назначение.

| 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 " ∞/∞ ") |
| | <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 |

3.5. Руководство по использованию программного компонента

1. Описание *.ini:

В директории, содержащей исполнительный программный компонент (далее *.exe), требуется обязательное задание файла инициализации начальных данных MassGlobalCalcul.ini (далее *.ini) формата ASCII. Файл *.ini должен быть сформирован по правилам задания файлов инициализации данных, используемым в среде Windows. Имена всех переменных в *.ini файле пишутся заглавными буквами. Не обязательно заносить в файл все переменные: если переменная не задана, то в программе для нее используется значение “по умолчанию”. Для удобства описания начальных данных составлена таблица 1. В ней использованы специальные обозначения и сокращения. Там, где потребуется, будем использовать введенные выше обозначения для гидродинамических переменных: t ($t_0 \leq t \leq T$) – время, $h = H + \eta$ – полная глубина, H – глубина невозмущенного слоя жидкости, η – смещение свободной поверхности. Несмотря на достаточно высокий уровень абстракции в формировании данных в ASCII-файлах, в таблице для наглядности приводится указание следующих типов данных:

- *String* – строка (состоит из символов "длины" в 1 байт общим количеством не более 1000)
- *Real* – вещественное число ("длина" числа 8 байт)
- *Integer* – целое число ("длина" числа 4 байта)

Для единиц измерения величин использованы следующие сокращения:

- [s.] – секунда
- [m.] – метр
- [meg.] – мегабайт
- [rad.] – радиан
- [–] – безразмерный параметр или имя файла

Таблица 1.

| Имя переменной в *.ini | Тип данных | Описание данных | [–] | Принимаемые значения | Значение по умолчанию |
|------------------------|------------|---|-------|--|-----------------------|
| FILENAME_BUG | String | Полное название файла-отчёта об ошибке | [–] | Имя файла должно содержать не менее пяти символов, пригодных для задания (полного или сокращённого) имени файла в операционной системе Windows | Bug.txt |
| FILENAME_WARNING | String | Полное название файла, содержащего предупреждения о выполнении коррекции в расчётах (к файлу имеет доступ на чтение любой другой процесс) | [–] | То же правило | Warning.txt |
| FILENAME_SUCCESS | String | Полное название файла-отчёта об успешном завершении расчёта | [–] | То же правило | Success.txt |
| FILENAME_BATH | String | Полное название файла, содержащего рельеф местности (формат представления данных Surfer 6 или ASCII *.GRD (см. пункт | [–] | То же правило | Bathymetry.grd |

| | | | | | |
|----------------------|---------|---|---------------|----------------------------------|-------------------------|
| | | 2.а), глубины заданы положительными числами, суша – отрицательными). | | | |
| FILENAME_SURF | String | Полное название файла, содержащего начальное смещение η (формат представления данных Surfer 6 или ASCII *.GRD (см. пункт 2.а); первые четыре строки файла должны совпадать с аналогичными строками файла FILENAME_BATH) | [-] | То же правило | FreeSurface.grd |
| FILENAME_MAREOGRAPHS | String | Полное название файла, содержащего номера узлов сетки, в которых установлены виртуальные мареографы (формат представления данных – в пункте 2.б, см. также MAREOGRAPHS_ID) | [-] | То же правило | Mareographs.dat |
| FILENAME_MAREOGRAMS | String | Полное название файла, в который во время расчёта записываются мареограммы η (формат представления данных – в пункте 2.с, см. также MAREOGRAMS_ID); к файлу имеет доступ на чтение любой другой процесс. | [-] | То же правило | Mareograms.dat |
| FILENAME_ADDCALCUL | String | Полное название файла, содержащего для каждой мареограммы: а) минимальные и максимальные значения; б) времена, когда достигаются эти значения из (а); в) полусумма абсолютных величин из (а) (формат представления данных – в пункте 2.д, см. также ADDCALC_ID, ADDCALCSELECT_ID) | [-] | То же правило | MareogramsAddCalcul.dat |
| FILENAME_MINFS | String | Полное название файла формата Surfer 6, см. пункт 2.а, содержащего минимальные значения η в каждом узле сетки за все время расчёта | [-] | То же правило | Min_FreeSurface.grd |
| FILENAME_MAXFS | String | Полное название файла формата Surfer 6, см. пункт 2.а., содержащего максимальные значения η в каждом узле сетки за все время расчёта | [-] | То же правило | Max_FreeSurface.grd |
| G | Real | Ускорение свободного падения | [m.]/[s.^2] | Больше 0.0, меньше 10.0 | 9.81 |
| R_EARTH | Integer | Радиус Земли | [m.] | Больше 0.0 | 6371109.7 |
| OMEGA_EARTH | Real | Угловая скорость вращения Земли | [rad.]/[s.^2] | Больше или равно 0.0 | 7.292115E-05 |
| K_FRICTION | Real | Коэффициент трения | [-] | Больше или равно 0.0, меньше 1.0 | 0.0 |
| INITIAL_TIME | Real | Начальное время расчёта t_0 | [s.] | Меньше чем FINAL_TIME | 0.0 |
| FINAL_TIME | Real | Конечное время расчёта T | [s.] | Больше чем INITIAL_TIME | 7200.0 |
| CFL_PARAMETER | Real | Параметр Куранта (в условии устойчивости алгоритма) | [-] | Больше 0.3, меньше 0.999 | 0.9 |
| MIN_DEPTH | Real | Минимальная глубина, при которой происходит коррекция батиметрии | [m.] | Больше 0.0 | 5.0 |
| MIN_FULLDEPTH | Real | Минимальная полная глубина, допускаемая в расчёте (параметр алгоритма) | [m.] | Больше 0.0 | 0.001 |
| MIN_DT | Real | Минимально возможный шаг по времени | [s.] | Больше 0.0 | 0.1 |
| MINABSFREESURFACE | Real | Минимальное по модулю значение η , отличное от 0.0, меньше которого решение | [m.] | Больше или равно 0.0 | 0.0 |

| | | | | | |
|-----------------------|---------|--|--------|--|-------|
| | | считается нулевым | | | |
| DTOUTPUT | Real | Интервал времени записи в файл η в формате Surfer 6 (параметр является существенным, если GRDRECORD_ID = 1) | [s.] | Больше 5.0 | 100.0 |
| SMOOTH_PARAM | Real | Параметр в процедуре сглаживания решения (если SMOOTH_PARAM = 0.0, то сглаживание не происходит) | [-] | Больше или равно 0.0, меньше или равно 1.0 | 0.0 |
| SMOOTH_STEP | Integer | Интервал (число шагов) сглаживания (влияет на расчет, если отлочно от 0.0 значение SMOOTH_PARAM) | [-] | Больше или равно 1 | 1 |
| MAX_SIZE_WARNING_FILE | Real | Максимально возможный размер файла указанного в FILENAME_WARNINIG | [meg.] | Больше 0.0 | 1.0 |
| MINABSFREESURFACE_ID | Integer | Селектор коррекции решения по устранению мелких возмущений η ("1" – коррекция η на границе береговой линии, "2" – коррекция η происходит, "3" – не происходит) | [-] | Значение "1", "2" или "3" | 3 |
| NAN_ID | Integer | Селектор проверки численного решения на NAN ("1" – проверка выполняется, "2" – не выполняется) | [-] | Значение "1" или "2" | 2 |
| INFINITY_ID | Integer | Селектор проверки и коррекции вычислений на "бесконечность" ("1" – решение проверяется и при необходимости корректируется, "2" – не проверяется и не корректируется) | [-] | Значение "1" или "2" | 1 |
| MODELSELECT_ID | Integer | Селектор выбора модели расчёта (задаётся целое число: "1" – линейная модель, "2" – нелинейная модель в недивергентном виде) | [-] | Значение "1" или "2" | 1 |
| ADDCALCSELECT_ID | Integer | Селектор вычисления и записи данных, описанных в поле FILENAME_ADDCALCUL ("1" – вычисляются и записываются в файл, имя которого задаётся через FILENAME_ADDCALCUL, "2" – не вычисляются и не записываются) | [-] | Значение "1" или "2" | 1 |
| GRDRECORD_ID | Integer | Селектор вывода значений η в формате Surfer 6 через время DTOUTPUT (интервал вывода). "1" – вывод значений η происходит, "2" – вывод η не происходит | [-] | Значение "1" или "2" | 2 |
| SMOOTH_CONDITION | Real | Условие сглаживания решения в точке: сглаживание происходит, если $abs(\eta/H)$ больше значения SMOOTH_CONDITION (влияет на расчет, если SMOOTH_PARAM не равен 0.0) | [-] | Больше или равно 0.0 | 0.01 |
| MAX_MIN_FS_ID | Integer | Селектор вычисления и записи данных, описанных в полях FILENAME_MINFS и FILENAME_MAXFS ("1" – вычисляются и записываются в файлы с именами, заданными через FILENAME_MINFS и FILENAME_MAXFS, "2" – не вычисляются и не записываются) | [-] | Значение "1" или "2" | 1 |
| MAREOGRAPHS_ID | Integer | Селектор формата данных | [-] | Значение "1" или "2" | 2 |

| | | | | | |
|---------------|---------|---|-------|---|----|
| | | формирования файла, задаваемого через FILENAME_MAREOGRAPHS ("1" – бинарный, "1" – ASCII, см. пункт 2b) | | "2" | |
| MAREOGRAMS_ID | Integer | Селектор формата данных формирования файла задаваемого через FILENAME_MAREOGRAMS ("1" – бинарный, "1" – ASCII, см. пункт 2c) | [–] | Значение "1" или "2" | 2 |
| ADDCALC_ID | Integer | Селектор формата данных формирования файла, задаваемого через FILENAME_ADDCALCUL ("1" – бинарный, "1" – ASCII, см. пункт 2d) | [–] | Значение "1" или "2" | 2 |
| FM1 | Integer | "(f"/"FM1"/"."/"FM2"/")". Если значение FM1 указывается явно, то значение FM2 должно быть указано, иначе FM1 и FM2 принимают значения по умолчанию (независимо от корректности задания значения FM1). | [–] | (FM1 - FM2) больше 3. Больше или равно 5. Менше или равно 20. | 13 |
| FM2 | Integer | "(f"/"FM1"/"."/"FM2"/")". Если значение FM2 указано явно, то значение FM1 должно быть указано, иначе FM1 и FM2 принимают значения по умолчанию (независимо от корректности задания FM2). | [–] | (FM1 – FM2) больше 3. Больше или равно 1. Менше или равно 10. | 5 |

2. Описание форматов представления данных:

В таблице 2 указаны используемые ниже сокращения.

Таблица 2.

| Тип данных | Описание |
|------------|---------------------------------------|
| Char | Символ "длиной" в один байт |
| Short | Целое число "длиной" в 16 бит |
| Float | Вещественное число "длиной" в 32 бита |
| Double | Вещественное число "длиной" в 64 бита |

2.a) Описание форматов представления данных, содержащих батиметрию и возмущение свободной поверхности.

Форматы представления данных Surfer 6. Послойно файл имеет следующее представление:

| Данные | Тип данных | Описание данных |
|--------|------------|---|
| Id | 4*Char | Строка идентификатор "DSBB" для определения типа файла |
| Nx | Short | Число строк |
| Ny | Short | Число столбцов |
| Xlo | Double | Минимальное значение по первой вещественной координате |
| Xhi | Double | Максимальное значение по первой вещественной координате |
| Ylo | Double | Минимальное значение по второй вещественной координате |
| Yhi | Double | Максимальное значение по второй вещественной координате |
| Zlo | Double | Минимальное значение из всех данных |
| Zhi | Double | Максимальное значение из всех данных |
| Z11 | Float | Значение в узле (1, 1) |
| Z12 | Float | Значение в узле (1, 2) |
| ... | Float | ... |
| Z1Nx | Float | Значение в узле (1, Nx) |
| Z21 | Float | Значение в узле (2, 1) |
| Z22 | Float | Значение в узле (2, 2) |

| | | |
|-------|-------|--------------------------|
| ... | Float | ... |
| Z2Nx | Float | Значение в узле (2, Nx) |
| ZNy1 | Float | Значение в узле (Ny, 1) |
| ZNy2 | Float | Значение в узле (Ny, 2) |
| ... | Float | ... |
| ZNyNx | Float | Значение в узле (Ny, Nx) |

Формат представления данных ASCII *.GRD. Послойно/построчно файл имеет следующее представление:

```

DSAA
Nx Ny
Xlo Xhi
Ylo Yhi
Zlo Zhi
Z11 Z12 ... Z1Nx
Z21 Z22 ... Z2Nx
.....
ZNy1 ZNy2 ... ZNyNx

```

Формальный пример записи данных в ASCII *.GRD формате:

```

DSAA
4 3
10.0 30.0
40.0 50.0
1.0 9.0
2.0 3.0 1.0 2.0
1.0 2.0 3.0 4.0
1.0 8.0 9.0 5.0

```

2.b) Описание форматов данных файла, содержащего узлы-координаты мареографов.

Бинарный формат записи данных. Послойно файл имеет следующее представление:

| Данные | Тип данных | Описание данных |
|--------|------------|--|
| X1 | short | 1-ая компонента координаты-узла 1-го датчика |
| Y1 | short | 2-ая компонента координаты-узла 1-го датчика |
| X2 | short | 1-ая компонента координаты-узла 2-го датчика |
| Y2 | short | 2-ая компонента координаты-узла 2-го датчика |
| ... | short | ... |
| XN | short | 1-ая компонента координаты-узла N-го датчика |
| YN | short | 2-ая компонента координаты-узла N-го датчика |

Формат записи данных ASCII. Построчно файл имеет следующее представление:

```

X1 Y1
X2 Y2
...
XN YN

```

Пример записи данных в ASCII формате (8 мареографов):

348 312
349 312
350 313
350 314
351 314
374 340
375 339
384 338

2.c) Описание форматов данных файла, в который происходит запись мареограмм.

Бинарный формат записи данных. Послойно файл имеет следующее представление:

| Данные | Тип данных | Описание данных |
|------------------|------------|--|
| t1 | float | 1-ый (начальный) момент времени |
| Eta (X1, Y1, t1) | float | Значение возмущения свободной поверхности в 1-ой мареографной точке в момент времени t1 |
| Eta (X2, Y2, t1) | float | Значение возмущения свободной поверхности во 2-ой мареографной точке в момент времени t1 |
| | float | ... |
| Eta (XN, YN, t1) | float | Значение возмущения свободной поверхности в N-ой мареографной точке в момент времени t1 |
| t2 | float | 2-ой момент времени |
| Eta (X1, Y1, t2) | float | Значение возмущения свободной поверхности в 1-ой мареографной точке в момент времени t2 |
| Eta (X2, Y2, t2) | float | Значение возмущения свободной поверхности во 2-ой мареографной точке в момент времени t2 |
| | float | ... |
| Eta (XN, YN, t2) | float | Значение возмущения свободной поверхности в N-ой мареографной точке в момент времени t2 |
| t3 | float | 3-ий момент времени |
| Eta (X1, Y1, t3) | float | Значение возмущения свободной поверхности в N-ой мареографной точке в момент времени t3 |
| Eta (X2, Y2, t3) | float | Значение возмущения свободной поверхности во 2-ой мареографной точке в момент времени t3 |
| | float | ... |
| Eta (XN, YN, t3) | float | Значение возмущения свободной поверхности в N-ой мареографной точке в момент времени t3 |
| | float | ... |

Формат записи данных ASCII. Построчно файл имеет следующее представление:

Time _1_ _2_ _3_ _N_
t1 Eta (X1, Y1, t1) Eta (X2, Y2, t1) Eta (X3, Y3, t1) Eta (XN, YN, t1)
t2 Eta (X1, Y1, t2) Eta (X2, Y2, t2) Eta (X3, Y3, t2) Eta (XN, YN, t2)
t3 Eta (X1, Y1, t3) Eta (X2, Y2, t3) Eta (X3, Y3, t3) Eta (XN, YN, t3)

Пример записи данных в ASCII формате (9 мареографов):

Time _1_ _2_ _3_ _4_ _5_ _6_ _7_ _8_ _9_
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
2.30609 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
4.61213 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
6.91813 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
9.22409 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000

2.d) Описание форматов данных файла, содержащего для каждой марегораммы:

- a1) минимальное и максимальное значения;
- b1) времена, соответствующие достижению значений из (a1);

c1) полусумма абсолютных величин из (a1).

Бинарный формат. Послойно файл имеет следующее представление:

| Данные | Тип данных | Описание данных |
|---------------------|------------|--|
| A1=Min (X1, Y1, ti) | float | Минимальное значение из всех, зафиксированных 1-м мареографом |
| ti_A1 | float | Время, когда A1 было зафиксировано |
| B1=Max (X1, Y1, ti) | float | Максимальное значение из всех, зафиксированных 1-м мареографом |
| ti_B1 | float | Время, когда B1 было зафиксировано |
| 0.5*(A1 + B1) | float | Половина суммы абсолютных значений A1 и B1 |
| A2=Min (X2, Y2, ti) | float | Минимальное значение из всех, зафиксированных 2-м мареографом |
| ti_A2 | float | Время, когда A2 было зафиксировано |
| B2=Max (X2, Y2, ti) | float | Максимальное значение из всех, зафиксированных 2-м мареографом |
| ti_B2 | float | Время, когда B2 было зафиксировано |
| 0.5*(A2 + B2) | float | Половина суммы абсолютных значений A2 и B2 |
| ... | float | ... |
| AN=Min (XN, YN, ti) | float | Минимальное значение из всех, зафиксированных N-м мареографом |
| ti_AN | float | Время, когда AN было зафиксировано |
| BN=Max (XN, YN, ti) | float | Максимальное значение из всех, зафиксированных N-м мареографом |
| ti_BN | float | Время, когда BN было зафиксировано |
| 0.5*(AN + BN) | float | Половина суммы абсолютных значений AN и BN |

Формат записи данных ASCII. Послойно файл имеет следующее представление:

```

A1      ti_A1   B1      ti_B1   0.5*(|A1|+|B1|)
A2      ti_A2   B2      ti_B2   0.5*(|A2|+|B2|)
A3      ti_A3   B3      ti_B3   0.5*(|A3|+|B3|)
...
AN      ti_AN   BN      ti_BN   0.5*(|AN|+|BN|)

```

Пример записи данных в ASCII формате (3 мареографа):

```

0.0    0.0    2.0    10.0   1.0
0.0    0.0    0.0    0.0    0.0
-1.0   10.0    0.0    0.0    1.0

```

3. Краткое описание процесса работы *.exe:

Исполняемый файл *.exe. можно отправлять на счет только после подготовки начальных данных и задания *.ini файла с соблюдением правил инструкции. Для удобства опишем процесс работы исполняемого файла в виде последовательных этапов.

1. Управляющий программный компонент запускает исполняемый файл *.exe. Через некоторое время (как правило, это происходит очень быстро) создаётся файл, в который в течение всего процесса работы *.exe происходит запись мареограмм (см. описание FILENAME_MAREOGRAMS).

2. Если GRDRECORD_ID=1, то через временной интервал DTOUTPUT происходит вывод значений свободной поверхности в формате Surfer 6.

Имя файла имеет следующий вид: FreeSurface_N_S.T.grd. Здесь N – поле длины в девять символов, далее записывается номер слоя по времени, на котором и происходит вывод значений свободной поверхности η в каждом узле сетки. Далее, S – поле неограниченной длины, в которое записывается целая часть текущего времени вычислительного процесса t (в секундах), соответствующего производимой записи. А поле T (длины 3 символа) содержит доли секунды.

Примеры имён файлов:

FreeSurface_00000000_0.000.grd (0-ой шаг по времени, $t= 0.000$ секунд).

FreeSurface_000000006_14.694.grd (6-ой шаг по времени, $t=14.694$ секунд).

FreeSurface_000000014_34.286.grd (14-ый шаг по времени, $t=34.286$ секунд).

3. Если в ADDCALCSELECT_ID=1, то перед окончанием расчёта создаётся файл, содержащий для каждой записи мареограммы минимальное и максимальное значения; времена, соответствующие достижению этих значений; полусумму абсолютных минимального и максимального значений. Если в ADDCALCSELECT_ID=2, то перед окончанием расчёта такой файл не создается и указанные значения не вычисляются.

4. Если MAX_MIN_FS_ID=1, то перед окончанием расчёта создаются файлы, содержащие максимальные и минимальные значения свободной поверхности во всей расчетной области за время T . Если в MAX_MIN_FS_ID=2, то указанные значения не вычисляются и файлы не создаются.

5. Если NAN_ID=1, то в случае выполнения в процессе вычислений коррекций решения будет создан файл FILENAME_WARNINIG, содержащего сообщения о коррекции.

6. В конце расчёта исполняемый файл *.exe возвращает "1" (*return 1*) и создаёт файл-отчет, содержащий информацию о проведённых вычислениях. В случае неправильного задания данных или внутреннего сбоя работы расчётного модуля, *.exe корректно завершает работу и возвращает "0" (*return 0*), при этом формируется файл-отчёт, содержащий причину завершения работы *.exe. При правильном задании начальных данных, при наличии достаточной оперативной памяти, при наличии требуемого доступа к нужным файлам и возможности их создания, возникновение ошибки исключено.

4. Классификация переменных из *.ini – файлов.

В заключение приведем классификацию переменных, разделив их по степени важности.

Параметры-имена файлов. В случае если исполняемый файл *.exe является частью программной системы, указанные ниже параметры и их значения нужны только для синхронизации работы различных компонент этой системы:

1. FILENAME_BUG
2. FILENAME_WARNINIG
3. FILENAME_SUCCESS
4. FILENAME_BATH
5. FILENAME_SURF
6. FILENAME_MAREOGRAPHS
7. FILENAME_MAREOGRAMS
8. FILENAME_ADDCALCUL
9. FILENAME_MINFS
10. FILENAME_MAXFS

Важные. Параметры, требующие обязательного задания пользователем и не требующие от него специальных знаний.

1. FINAL_TIME
2. MODELSELECT_ID

Второстепенные. Параметры, значение которых лучше оставить без изменения. Допускается изменение этих параметров только пользователями-разработчиками системы и пользователями, прошедшими специальную (персональную, расширенную и углубленную) подготовку у разработчиков по пользованию системой. Параметры, помеченные (*), лучше не менять (это физические константы). Значения приведённых ниже параметров по умолчанию обеспечивают в подавляющем большинстве случаев корректные вычисления в задачах предварительного моделирования распространения волн цунами:

1. G (*)
2. R_EARTH (*)
3. OMEGA_EARTH (*)
4. K_FRICTION (*)
5. INITIAL_TIME
6. CFL_PARAMETER
7. MIN_DEPTH
8. MIN_FULLDEPTH
9. MIN_DT
10. MINABSFREESURFACE
11. SMOOTH_PARAM
12. SMOOTH_STEP
13. MAX_SIZE_WARNING_FILE
14. MINABSFREESURFACE_ID
15. NAN_ID
16. INFINITY_ID
17. SMOOTH_CONDITION
18. MAREOGRAPHS_ID
19. MAREOGRAMS_ID
20. ADDCALC_ID
21. FM1
22. FM2
23. DTOUTPUT
24. ADDCALCSELECT_ID
25. GRDRECORD_ID
26. MAX_MIN_FS_ID

4. Информационное обеспечение проекта

Методология выполнения работ включала следующие технологические этапы.

1. Исполнителями определена акватория, прилегающая к п-ву Камчатка, и, содержащая зоны возможных цунамигенных землетрясений. Утверждена расчетная область «Камчатка».
2. Утвержден перечень защищаемых пунктов.
3. Определены точки установки расчетных мареографов, отождествляемые с каждым из защищаемых пунктов. Эти мареографы установлены в ближайших к защищаемым пунктам прибрежных точках. Определены

глубины в точках установки мареографов, оценены отклонения их географических координат от координат защищаемых пунктов. Как правило, такие отклонения не превышают 2-3 минут и могут считаться вполне допустимыми. Исключением является защищаемый пункт «Петропавловский маяк», положение которого, указанное в Техническом задании, не позволяет однозначно сопоставить ему расчетный мареограф. Для оценки пространственной устойчивости характеристик проявления волн в окрестности каждого мареографа определены по 4 его соседних (два «слева», два «справа»), Мареограммы определялись в основном мареографе (защищаемый пункт) и в каждом из соседних. Работа в этой части выполняется путем сопоставления экспертных оценок с применением «внешнего» программного обеспечения из класса геоинформационных систем.

4. На основе изучения сейсмотектонической обстановки расчетной области «Камчатка» акватории определена схема возможного размещения модельных землетрясений.
5. Предложена и утверждена совокупность модельных цунамигенных землетрясений, основанная на модели Подъяпольского-Гусякова-Окады. Эта работа также потребовала привлечения дополнительных экспертных оценок.
6. Создана система вычислительных и общесистемных алгоритмов для серийного расчета начальных возмущений свободной поверхности, порожденных модельными землетрясениями. Система предназначена для использования в «исследовательском» режиме.
7. Выполнена модификация вычислительных алгоритмов для расчета трансформации волн цунами от области источника возмущения вплоть до линии берега, эта модификация включала адаптацию к особенностям рельефа дна акватории и к особенностям геометрии береговых границ. Совокупность вычислительных алгоритмов включает различные их версии 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. Создана система управляющих алгоритмов, обеспечивающая организацию и проведения серийных расчетов распространения волны цунами. Вычислительные и управляющие алгоритмы также предназначены для реализации «исследовательского» режима.
9. Реализована 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 максимумов и минимумов амплитуд волн к защищаемым пунктам, а также имена (индексы) защищаемых пунктов, в которых такие значения были определены.

Для источников, размещенных в Карагинском заливе, также были определены распределения («свечения») минимальных и максимальных амплитуд во всей расчетной области.

- **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 имя (индекс) землетрясения, породившего эти экстремальные значения.

В соответствии с Техническим заданием Заказчику передана База данных «Цунамирайонирование Камчатки», предназначенная для хранения информации о проявлениях цунами, вызванных набором модельных цунамигенных землетрясений, в расчетных мареографах, привязанных к набору защищаемых пунктов. К Базе данных приложено программное обеспечение, обеспечивающее доступ к Базе данных для просмотра и экспорта в текстовый формат этой информации.

База данных и поставляемое Программное обеспечение являются фрагментом информационной системы и обеспечивают работу в так называемом «пользовательском» режиме. Этот режим предназначен для просмотра результатов расчетов для конкретного 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.

4.1. Описание системы

Разрабатываемая система имеет две составляющих: «пользовательский» режим и «исследовательский» режим. Эти режимы фактически разделяют функциональность системы в соответствии с потребностями пользователей. «Пользовательский» режим предназначен для просмотра результатов вычислений, информации о расположении модельных источников, защищаемых пунктов и обеспечивает необходимую группировку этой информации. «Исследовательский» режим предназначен для обеспечения необходимых инструментов группе исполнителей проекта. Это функциональность по обеспечению вычислений и наполнению информационной базы данных.

4.1.1. «Пользовательский» режим

В этом режиме пользователю предоставляется структурированное хранилище информации (база данных) о появлении цунами и необходимое для доступа к этой информации программное обеспечение. Хранилище состоит из локальной базы данных, поддерживающей язык доступа к данным посредством SQL-запросов, и локального хранилища файлов.

4.1.2. Локальная база данных

На данный момент локальная база данных представляет собой базу данных MS Access. Выбор именно этого типа баз данных основан на том, что она включает удобную систему администрирования и вполне удовлетворяет требованиям скорости доступа к данным. Эта БД проста в эксплуатации и поддерживает язык SQL-запросов, что позволит в дальнейшем при необходимости легко перейти на другую базу данных SQL. На рисунке 4.1 изображена схема связей таблиц базы данных.

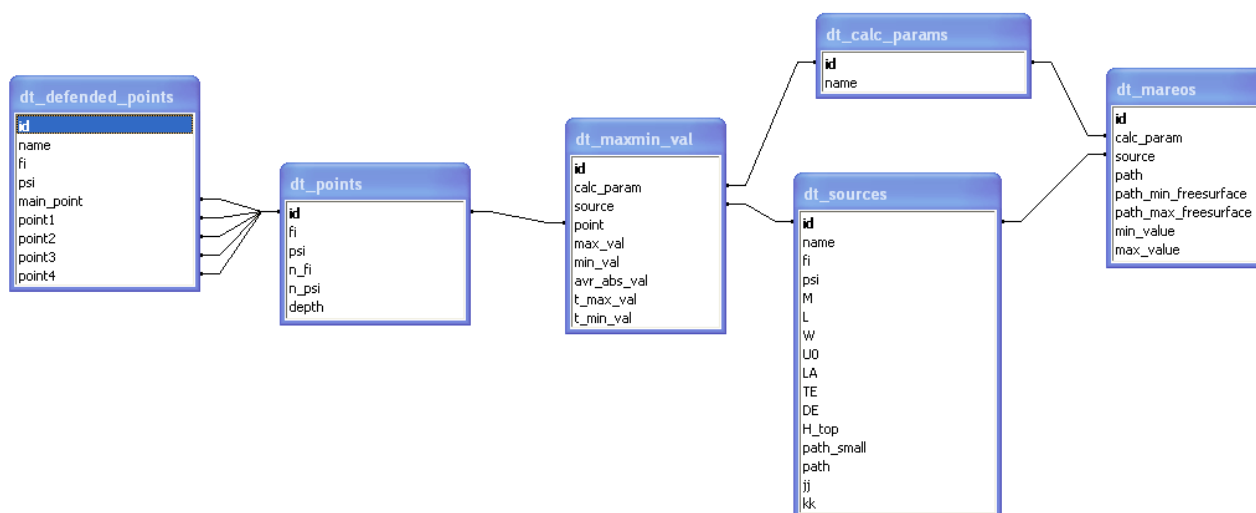


Рисунок 4.1. Схема связей таблиц

Предложенная и реализованная исполнителями структура базы данных позволяет хранить в информации 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). Это позволяет также получить доступ к информации с использованием других «внешних» программных инструментов (Surfer, Grapher и т.п.). Использование доступа к хранимой информации посредством SQL-запросов обеспечивает высокую скорость доступа к хранимой информации.

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

Таблица 3 содержит набор характеристик защищаемых пунктов.

Таблица 3.

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 dt_points |
| point1 | Integer | Крайний левый соседний мареограф. Идентификатор из таблицы dt_points |
| point2 | Integer | Левый соседний мареограф. Идентификатор из таблицы dt_points |
| point3 | Integer | Правый соседний мареограф. Идентификатор из таблицы dt_points |
| point4 | Integer | Крайний правый соседний мареограф. Идентификатор из таблицы dt_points |

| id | name | fi | psi | main_point | point1 | point2 | point3 |
|----|-------------------------|-------|--------|------------|--------|--------|--------|
| 3 | Okeanskij (o. Paramus | 50.2 | 155.8 | 3 | 1 | 2 | |
| 4 | g. Severo-Kuril'sk | 50.68 | 156.2 | 8 | 6 | 7 | |
| 5 | Babushkino (o. Shums | 50.63 | 156.42 | 13 | 11 | 12 | |
| 6 | GMS m. Lopatka | 50.87 | 156.67 | 18 | 16 | 17 | |
| 7 | KNP m. Zheltyj | 51.63 | 157.7 | 23 | 21 | 22 | |
| 8 | ? GMS Vodopadnaja | 51.83 | 158.07 | 28 | 26 | 27 | |
| 9 | RSB buhta Hodutka | 51.77 | 158.08 | 33 | 31 | 32 | |
| 10 | RSB buhta Asacha | 52.13 | 158.3 | 38 | 36 | 37 | |
| 11 | RSB buhta Zhirovaja | 52.6 | 158.43 | 43 | 41 | 42 | |
| 12 | Buhta Russkaja (mys | 52.43 | 158.5 | 48 | 46 | 47 | |
| 14 | RSB buhta Listvinichna | 52.33 | 158.57 | 53 | 51 | 52 | |
| 15 | RSB buhta Bol'shaja S | 52.77 | 158.57 | 58 | 56 | 57 | |
| 16 | g. Petropavlovsk-Kamc | 53.02 | 158.58 | 63 | 61 | 62 | |
| 17 | vhod v Avachin. Buhtu | 52.9 | 158.7 | 68 | 66 | 67 | |
| 18 | Petropavlovskij majak | 53.02 | 158.72 | 73 | 71 | 72 | |
| 19 | byvshee selo Halaktyrk | 53 | 158.87 | 78 | 76 | 77 | |
| 20 | RSB ust'e r. Nalychevo | 53.02 | 159.25 | 83 | 81 | 82 | |
| 21 | RSB ust'e r. Ostrovnaja | 53.25 | 159.55 | 88 | 86 | 87 | |
| 22 | RSB ust'e r. Berezovaja | 53.83 | 159.85 | 93 | 91 | 92 | |
| 23 | RSB ust'e r. Zhupanovc | 53.67 | 159.87 | 98 | 96 | 97 | |
| 24 | RSB ust'e r. Karymska | 53.97 | 159.88 | 103 | 101 | 102 | 1 |

Рисунок 4.1.

Таблица 4 содержит набор характеристик всех мареографов с их координатами.

Таблица 4.

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. |

| | id | fi | psi | n_fi | n_psi | depth |
|---|----|----------|----------|------|-------|----------|
| + | 1 | 50.18333 | 155.7833 | 312 | 348 | 3.994599 |
| + | 2 | 50.18333 | 155.8 | 312 | 349 | 7.976048 |
| + | 3 | 50.2 | 155.8167 | 313 | 350 | 9.725491 |
| + | 4 | 50.21667 | 155.8167 | 314 | 350 | 5.341317 |
| + | 5 | 50.21667 | 155.8333 | 314 | 351 | 9.013619 |
| + | 6 | 50.68333 | 156.1667 | 342 | 371 | 9.760362 |
| + | 7 | 50.66667 | 156.1833 | 341 | 372 | 8.963133 |
| + | 8 | 50.66667 | 156.2 | 341 | 373 | 6.021956 |
| + | 9 | 50.65 | 156.2167 | 340 | 374 | 19.94118 |
| + | 10 | 50.63334 | 156.2333 | 339 | 375 | 22.87366 |
| + | 11 | 50.61666 | 156.3833 | 338 | 384 | 8.147235 |
| + | 12 | 50.63334 | 156.4 | 339 | 385 | 0.96008 |
| + | 13 | 50.63334 | 156.4167 | 339 | 386 | 3.901256 |
| + | 14 | 50.65 | 156.4167 | 340 | 386 | 2.568627 |
| + | 15 | 50.66667 | 156.4333 | 341 | 387 | 3.319714 |
| + | 16 | 50.9 | 156.6667 | 355 | 401 | 9.058824 |
| + | 17 | 50.88334 | 156.65 | 354 | 400 | 9.005988 |
| + | 18 | 50.86666 | 156.6667 | 353 | 401 | 2.141599 |
| + | 19 | 50.86666 | 156.6833 | 353 | 402 | 4.161207 |
| + | 20 | 50.86666 | 156.7 | 353 | 403 | 11.02395 |
| + | 21 | 51.53333 | 157.6667 | 393 | 461 | 5.860749 |

Рисунок 4.2.

Таблица 5 содержит набор характеристик модельных цунамигенных землетрясений с описаниями и ссылками на рассчитанные массивы соответствующих значений смещений свободной поверхности океана.

Таблица 5. 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). |

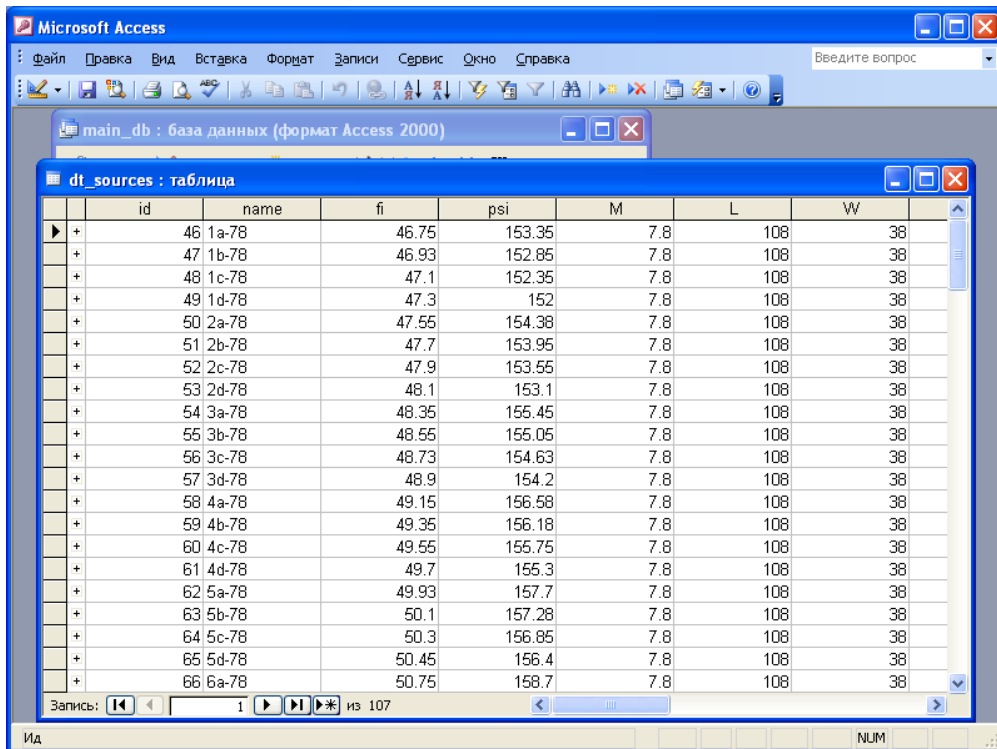


Рисунок 4.3.

Таблица 6 содержит наборы параметров вычислительных расчетных алгоритмов – параметры расчетов. Конструирование и наполнение таблицы не завершены, она будет дополняться полями при доработке исследовательского режима.

Таблица 6.

Таблица параметров расчета: dt_calc_params

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

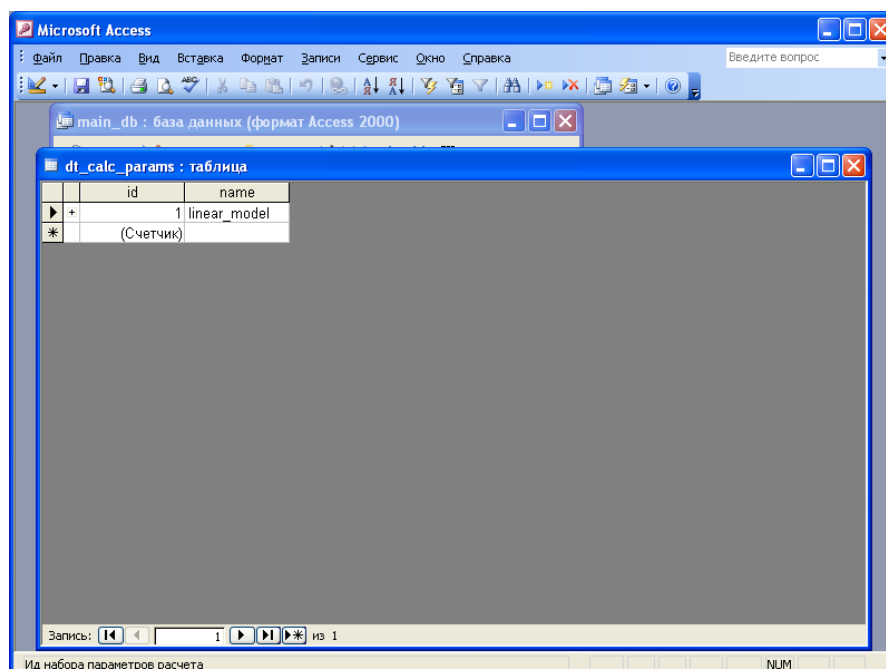


Рисунок 4.4.

Таблица 11 содержит список ссылок на вычисленные мареограммы.

Таблица 7. Таблица полученных мареограмм: dt_mareos

| Название поля | Тип | Описание |
|----------------------|---------|--|
| id | integer | Уникальный идентификатор |
| calc_param | integer | Ссылка на набор параметров расчета. Идентификатор из таблицы dt_calc_params . |
| source | integer | Ссылка на источник. Идентификатор из таблицы dt_sources . |
| 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 |

| id | calc_param | source | path | path_min_frees | path_max_frees | min_value | max_value |
|----|------------|--------|---------------|----------------|----------------|-----------|-----------|
| 79 | 1 | 83 | 10b-78_mareog | | | | |
| 80 | 1 | 84 | 10c-78_mareog | | | | |
| 81 | 1 | 85 | 10d-78_mareog | | | | |
| 82 | 1 | 86 | 11a-78_mareog | 11a-78_Min_Fri | 11a-78_Max_Fri | -2.452883 | 2 |
| 83 | 1 | 87 | 11b-78_mareog | 11b-78_Min_Fri | 11b-78_Max_Fri | -1.952576 | 2 |
| 84 | 1 | 88 | 11c-78_mareog | 11c-78_Min_Fri | 11c-78_Max_Fri | -2.695311 | 2 |
| 85 | 1 | 89 | 11d-78_mareog | 11d-78_Min_Fri | 11d-78_Max_Fri | -2.521865 | 2 |
| 86 | 1 | 90 | 12a-78_mareog | 12a-78_Min_Fri | 12a-78_Max_Fri | -2.861207 | 2 |
| 87 | 1 | 91 | 12b-78_mareog | 12b-78_Min_Fri | 12b-78_Max_Fri | -2.814209 | 2 |
| 88 | 1 | 92 | 12c-78_mareog | 12c-78_Min_Fri | 12c-78_Max_Fri | -2.438977 | 1 |
| 89 | 1 | 93 | 12d-78_mareog | 12d-78_Min_Fri | 12d-78_Max_Fri | -2.328517 | 2 |
| 90 | 1 | 94 | 13d-78_mareog | 13d-78_Min_Fri | 13d-78_Max_Fri | -0.898058 | 1 |
| 91 | 1 | 95 | 14d-78_mareog | 14d-78_Min_Fri | 14d-78_Max_Fri | -1.477429 | 1 |
| 92 | 1 | 96 | 15d-78_mareog | | | | |
| 93 | 1 | 97 | 16d-78_mareog | | | | |
| 94 | 1 | 98 | 17d-78_mareog | | | | |
| 95 | 1 | 99 | 18d-78_mareog | | | | |
| 96 | 1 | 100 | 19d-78_mareog | | | | |
| 97 | 1 | 101 | 20d-78_mareog | | | | |
| 98 | 1 | 102 | 21c-78_mareog | 21c-78_Min_Fri | 21c-78_Max_Fri | -2.749515 | 2 |
| 99 | 1 | 103 | 21d-78_mareog | 21d-78_Min_Fri | 21d-78_Max_Fri | -4.984937 | 6 |

Рисунок 4.5.

Таблица 8 содержит характеристики проявления волн цунами в защищаемых пунктах. Ее содержание обновляется после каждого серийного расчета.

Таблица 8. 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 dt_calc_params . |
| source | integer | Ссылка на источник. Идентификатор из таблицы dt_sources . |
| point | integer | Ссылка на мареограф. Идентификатор из таблицы dt_points . |
| max_val | real | Максимальная высота волны в мареографе при данных параметрах расчета и источнике. |
| min_val | real | Минимальная высота волны в мареографе при данных параметрах расчета и источнике. |
| t_max_val | real | Время, когда достигнут максимум. |
| t_min_val | real | Время, когда достигнут минимум. |

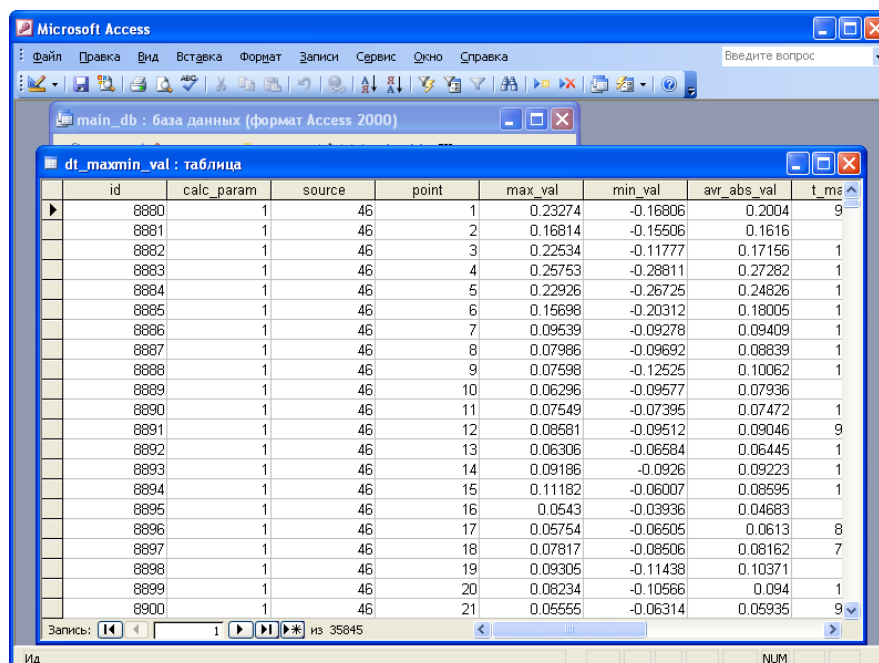


Рисунок 4.6.

4.1.3. Организация локального хранилища файлов

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, полученные в «исследовательском» режиме. Эта папка содержит файлы:

<name>_Max_FreeSurface.grd - свечения максимумов

<name>_Min_FreeSurface.grd - свечения минимумов ¹

Mareograms - папка, в которой хранятся файлы с массивами мареограмм. Эта папка содержит файлы:

<name>_Mareograms.dat - файл со всеми мареограммами полученными от источника <name>.

Modules - в этой папке в будущем планируется размещать вычислительные модули, которые входят в состав исследовательского режима.

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.

Kamchka.exe - исполняемый файл программы для доступа к данным в пользовательском режиме.

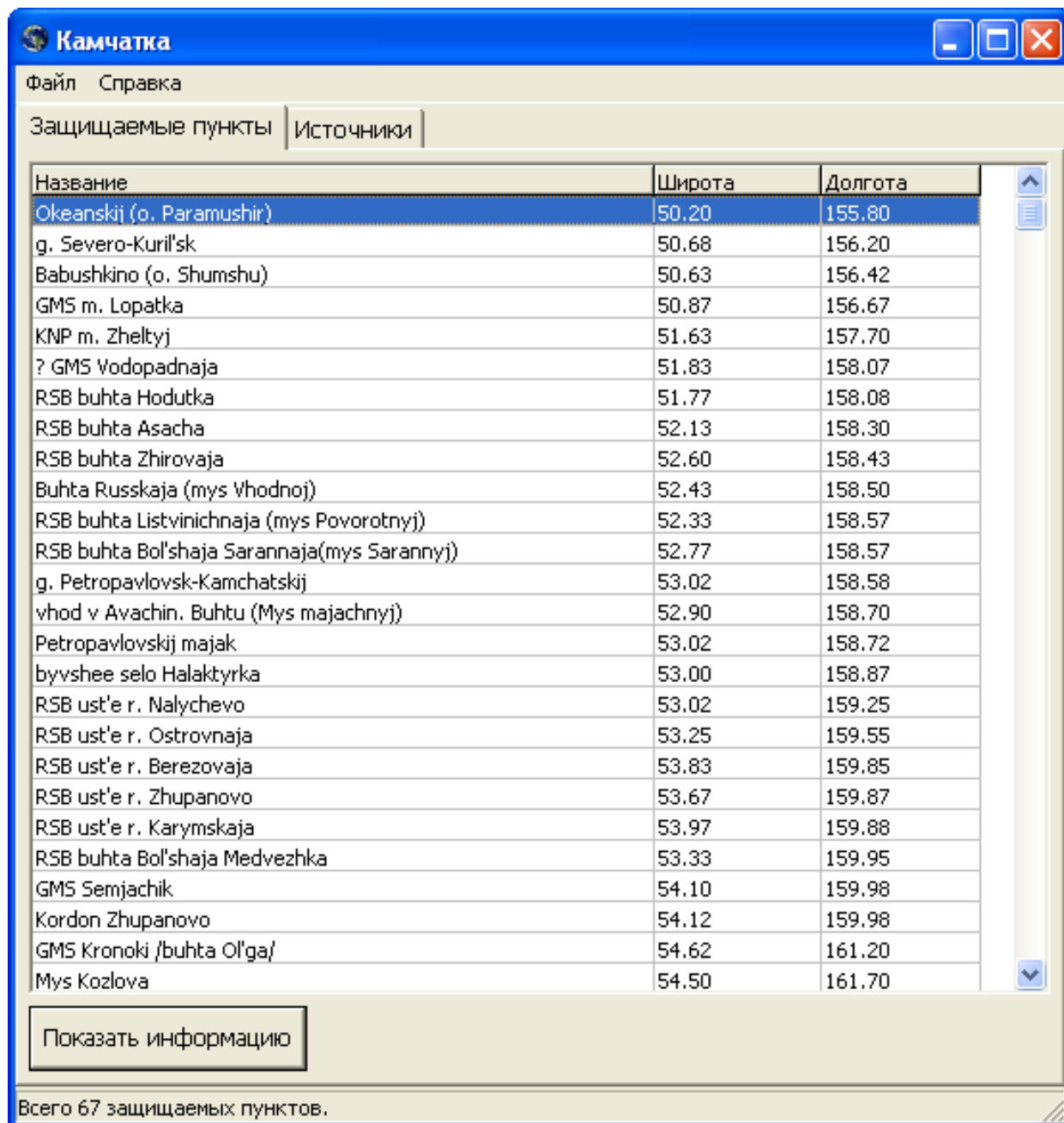
¹ <name> - название источника.

4.1.4. Программное обеспечение

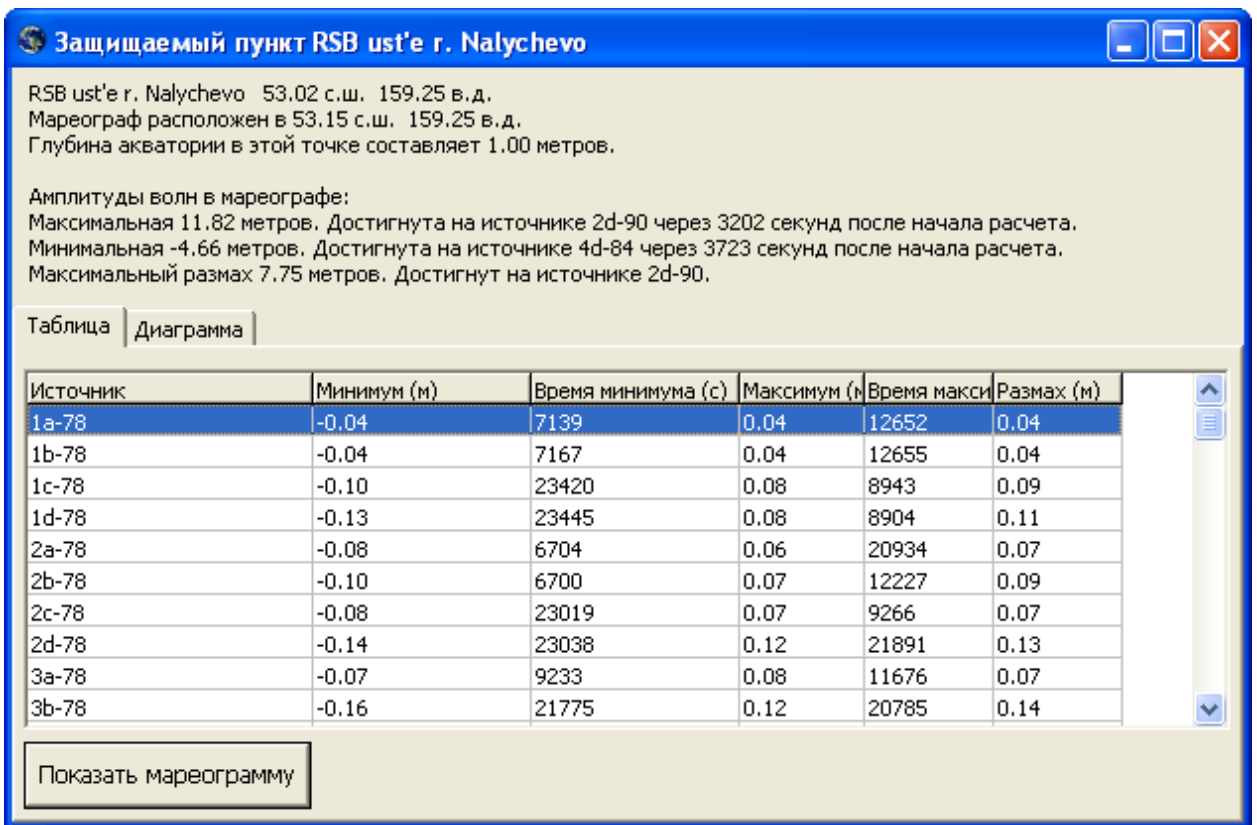
Программа для доступа к информации, хранимой в базе данных, представляет собой оконное приложение Win32, и запускается исполняемым файлом Kamchatka.exe.

Пользовательский интерфейс

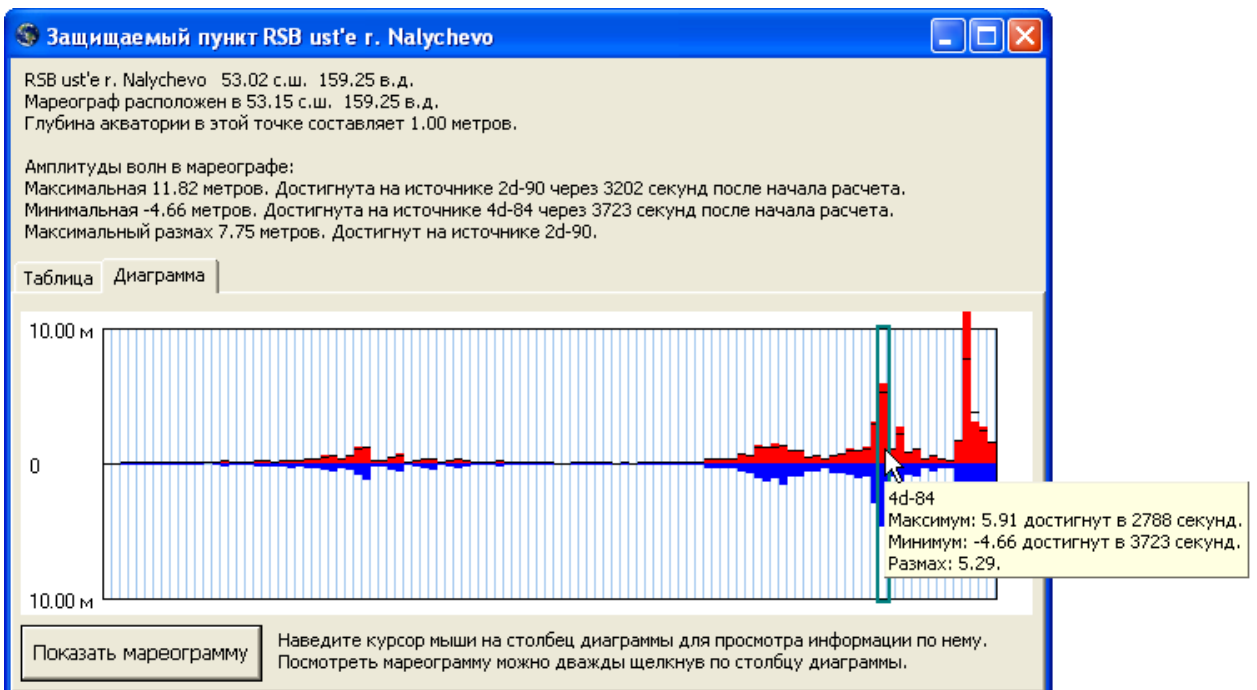
В главном окне программе имеются две таблицы: защищаемые пункты и источники. Каждая из этих таблиц помимо названий пунктов и источников содержит основные характеристики этих объектов.

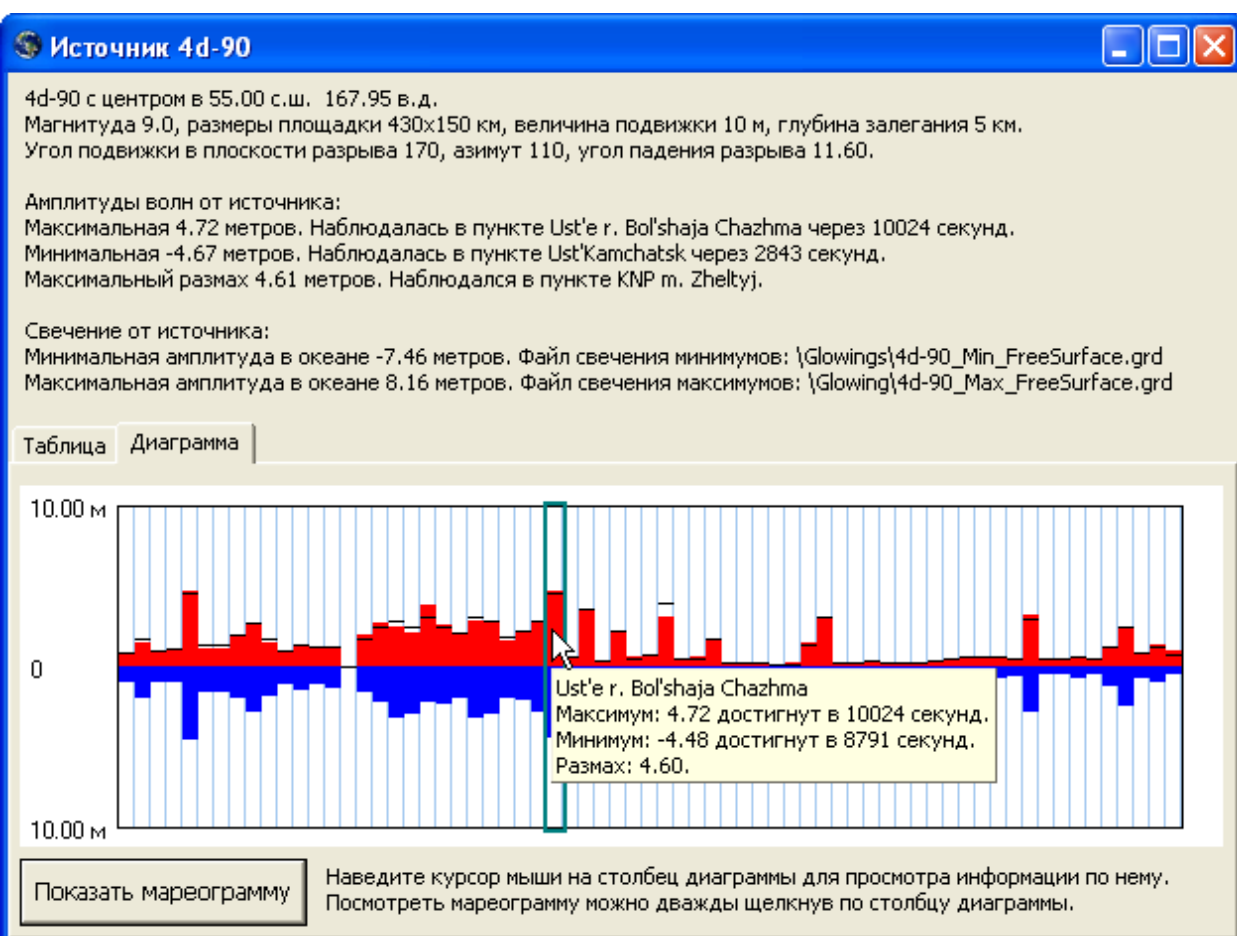
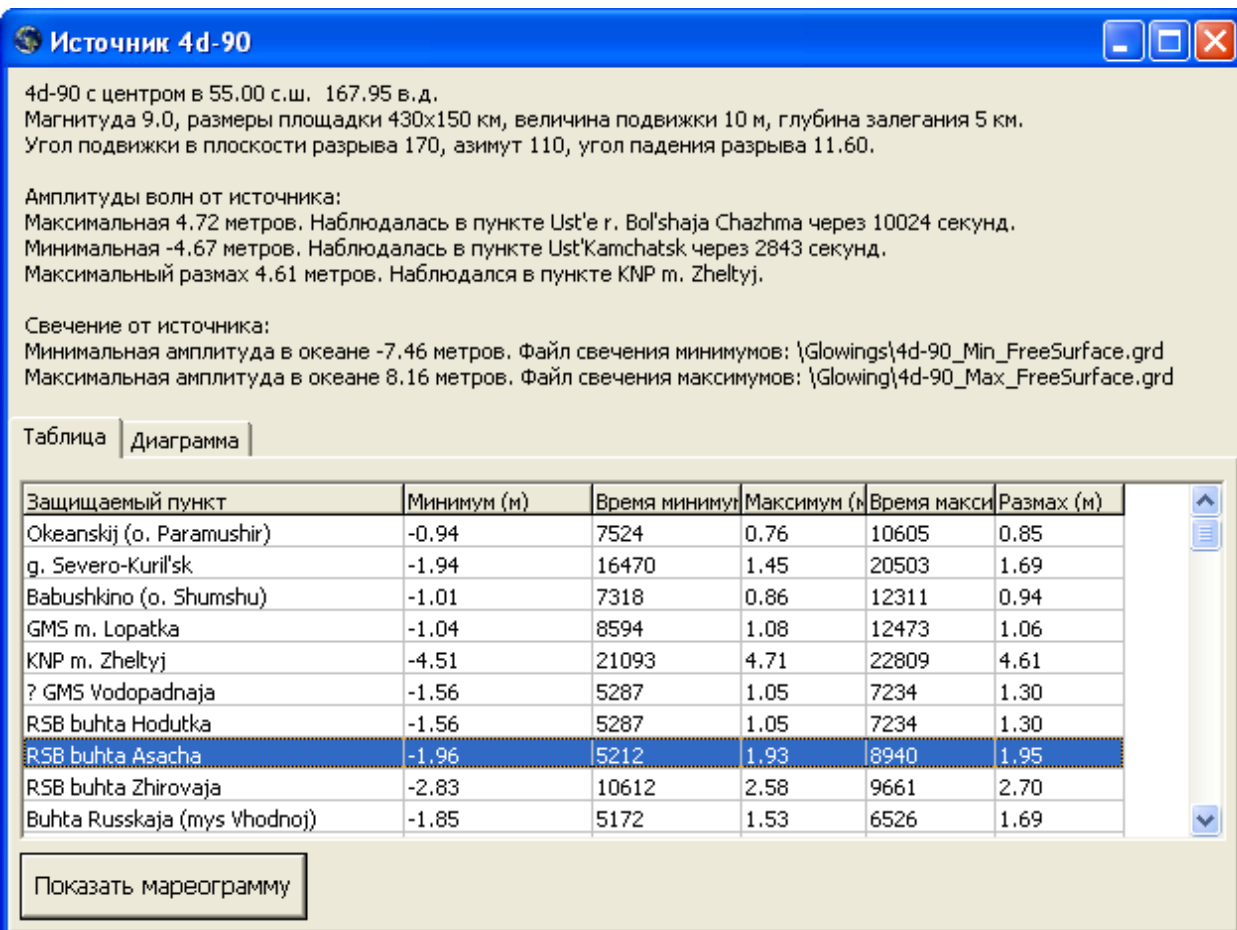


Кнопка «Показать информацию» открывает окно, в котором отображается информация, связанная с выбранным объектом.



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 сумм абсолютных значений минимума и максимума).





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



Камчатка
Защищаемые пункты

| Название | Широта | Долгота | Магнитуда | Длина (км) | Ширина (км) |
|----------|--------|---------|-----------|------------|-------------|
| 6e-81 | 53.05 | 162.95 | 8.1 | 150.0 | 52.0 |
| 6f-81 | 53.25 | 162.25 | 8.1 | 150.0 | 52.0 |
| 7e-81 | 54.30 | 164.18 | 8.1 | 150.0 | 52.0 |
| 7f-81 | 54.50 | 163.45 | 8.1 | 150.0 | 52.0 |
| 1b-84 | 47.33 | 153.45 | 8.4 | 215.0 | 75.0 |
| 1d-84 | 47.68 | 152.55 | 8.4 | 215.0 | 75.0 |
| 2b-84 | 48.95 | 155.58 | 8.4 | 215.0 | 75.0 |
| 2d-84 | 49.30 | 154.75 | 8.4 | 215.0 | 75.0 |
| 3b-84 | 50.50 | 157.75 | 8.4 | 215.0 | 75.0 |

Защищаемый пункт RSB ust'e г. Nalychevo
RSB ust'e г. Nalychevo 53.02 с.ш. 159.25 в.д.
Мареограф расположен в 53.15 с.ш. 159.25 в.д.
Глубина акватории в этой точке составляет 1.00 метров.

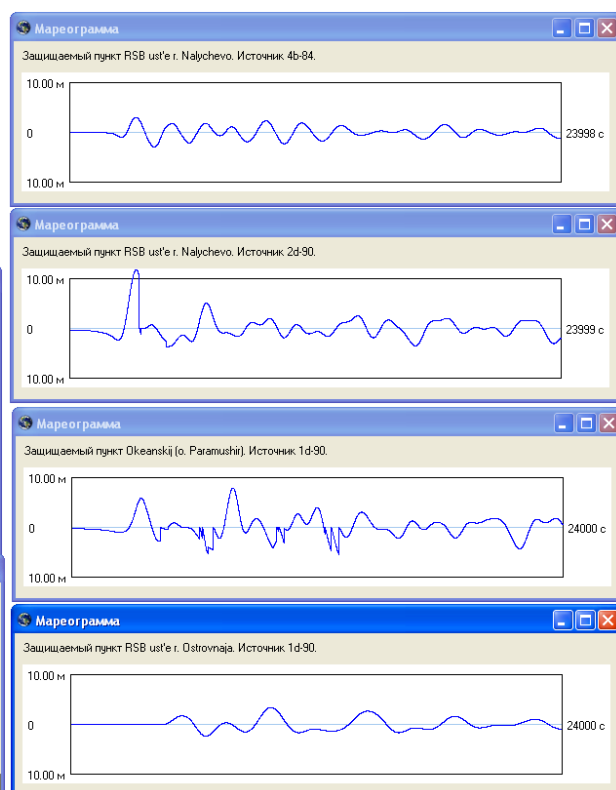
Амплитуды волн в мареографе:
Максимальная 11.82 метров. Достигнута на источнике 2d-90 через 3202 секунд после начала расчета.
Минимальная -4.66 метров. Достигнута на источнике 4f-84 через 3723 секунд после начала расчета.
Максимальный размах 7.75 метров. Достигнут на источнике 2d-90.

Источник: 1d-90
1d-90 с центром в 48.50 с.ш. 153.65 в.д.
Магнитуда 9.0, размеры площадки 430x150 км, величина подвижки 15 м, глубина залегания 5 км.
Угол подвижки в плоскости разрыва 90, азимут 58, угол падения разрыва 11.60.

Амплитуды волн от источника:
Максимальная 7.92 метров. Наблюдалась в пункте Okeanskij (о. Paramushir) через 7843 секунд.
Минимальная -5.43 метров. Наблюдалась в пункте Okeanskij (о. Paramushir) через 13032 секунд.
Максимальный размах 6.68 метров. Наблюдалась в пункте Okeanskij (о. Paramushir).

Свечение от источника:
Информация о свечении отсутствует.

Показать мареограмму



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).

4.1.5. О внутреннем устройстве приложения

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

Так, например, все данные для источника 1d-90 получены из запросов к таблицам **dt_sources**, **dt_maxmin_val**, **dt_defended_points**, **dt_mareos** с учетом их связей (см. рисунок 4.1).

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.

4.1.6. «Исследовательский» режим

«Исследовательский» режим представляет собой совокупность реализованных вычислительных алгоритмов, утилит по управлению ими, правила и форматы по обмену информацией между модулями и утилитой импорта данных в БД.

В этот режим входят:

`source.exe` - утилита для вычисления начального возмущения свободной поверхности в локальных декартовых координатах и сферических. Начальные данные для этой утилиты задаются в файле `source.ini`, 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 и 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.

Порядок работы с утилитой `Serial_calc.exe`:

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

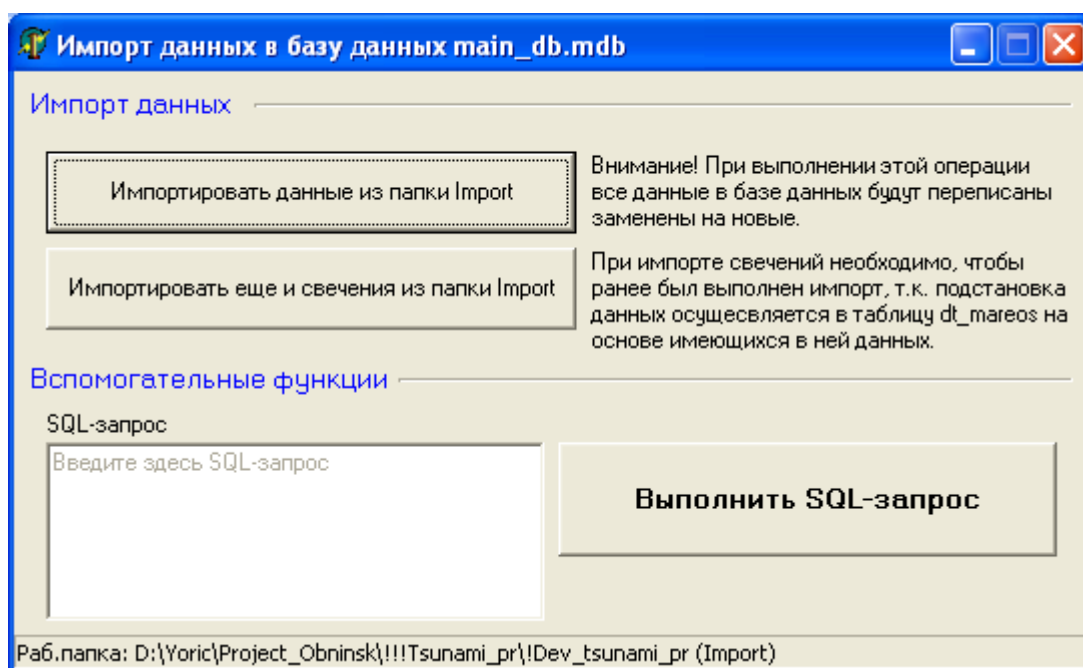
В файле `serial.ini` задаются параметры для управления расчетом **SOURCES** - определяет, вычислять источники или использовать вычисленные ранее; **MAREOS** - определяет, производить расчеты свободной поверхности или только вычислять источники

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** (или в других терминах **U0**), **H_top, JJ, KK**.

- 1) 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>`.
- 2) 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*.
- 3) Запустить `Serial_calc.exe`.

Утилита 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`.



Для осуществления импорта в БД необходимо поместить эту утилиту в папку программы для «пользовательского» режима (`Kamchatka.exe`), в которой создана вышеописанная структура папок.

В папку `Import` помещается папка `Calculations` вместе со всеми расчетами выполненными утилитой `serial_calc.exe`. Также в папку `Import` помещается папка `Input` (со всем ее содержимым), используемая утилитой `serial_calc.exe`. После этого следует запустить утилиту `Import.exe` 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 – она 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`.
- 3) Скопировать все файлы вида `xxx_z.grd` и `xxx_etta.grd` в папку **Sources**, `xxx_mareograms.dat` в папку **Mareograms**.

4.2. Форматы данных

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

4.2.1. Бинарный формат `grd`-файла

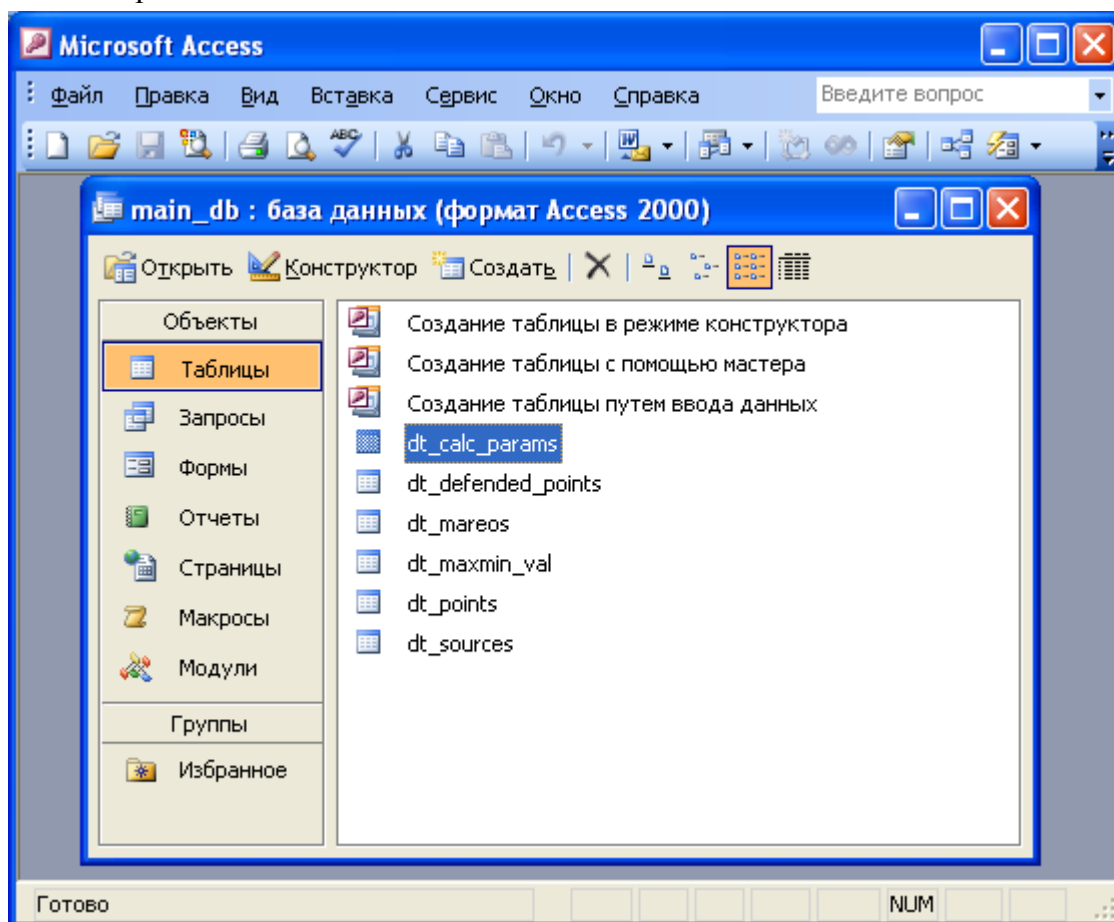
| Type | Description |
|--------|--|
| char | single byte |
| short | 16 bit signed integer |
| float | 32 bit single precision floating point value |
| double | 64 bit double precision floating point value |

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

| Element | Type | Description |
|---------------|--------|--|
| id | char | 4 byte identification string 'DSBB' which identifies the file as a Surfer 6 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 |

4.2.2. База данных main_db.mdb

Стандартная база данных MS Access 2000.



4.2.3. Текстовый формат dat-файла для экспорта распределений

Файлы с таким форматом имеют 6 столбцов. В первом перечислены индексы защищаемых пунктов или источников, по которым выполнено распределение. Во втором столбце содержатся соответствующие минимальные значения в мареографе, в третьем - время достижения этого минимального значения, в четвертом - максимальное значение, в пятом - время максимума, в шестом - размах.

4.2.4. Файлы настроек утилит (ini-файлы)

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.

4.2.5. Файл мареограмм (dat-файл)

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 соответствующих мареографах. Первая строка этого файла имеет особенный вид. Она фактически является заголовком:

Time _1_ _2_ _3_ ... _N_

4.3. Реализация проекта

Предложенная реализация проекта позволила 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 отвязанности их от управляющей утилиты (serial_calc.exe) была обеспечена раздельность кода, обеспечивающая функциональность системы и, как следствие, простота отладки модулей по отдельности.

Разделение системы на два режима призвано, во-первых, разделить функциональность по потребностям пользователей, т.е. заказчикам предоставляется только необходимая им информация о распределениях высот, а исследователям функциональность по организации и проведению расчетов. Во-вторых, разделение на режимы позволяет не нагружать пользовательский интерфейс программы, что несомненно сказывается на ее простоте и понятности и, как следствие, на удобстве работы с ней. В-третьих, организация системы предложенным выше образом позволила существенно снизить количество ошибок на этапе разработки и тестирования.

Разработанная система выполнена не для решения единственной задачи, а адаптирована для легкости ее использования для других регионов.

4.4. Планы развития системы

Несмотря на все плюсы разработанной системы, она требует доработки. Развитие системы нам видится по следующим направлениям. Для «пользовательского» режима необходимо дополнить инструменты визуализации. Это отображения трехмерных поверхностей и карты региона. Также необходимо визуально отображать на карте схему источников, набор защищаемых пунктов. Были бы полезны средства по обработке и фильтрации отображаемой информации. Дальнейшие работы также могут быть направлены на оптимизацию представления информации и увеличение скорости работы пользователя с системой, что является крайне важным, если система будет использоваться для оперативного прогноза цунами. Собственно, для обеспечения оперативного прогноза цунами в «пользовательский» режим должна быть частично внесена функциональность исследовательского режима, необходимая для быстрого проведения единичных расчетов.

Для «исследовательского» режима планируется выполнить создание единого центра управления системой. Сюда должна быть включена функциональность по управлению серийными расчетами, выбор батиметрии из имеющихся и создание модельных рельефов, расстановка мареографов на карте региона, выбор моделей и вычислительных алгоритмов, а также их добавление в систему. Также «исследовательский» режим должен включать в себя формирование набора источников, проведение серийных расчетов. Его развитие возможно также в направлении дополнения инструментария по обработке батиметрии, результатов расчета, расширению процедур импорта и экспорта данных. И всё это на наш взгляд должно быть объединено гибким

наполняемым каркасом с интуитивно понятным графическим пользовательским интерфейсом.

Существующая система реализована в виде рабочего места с локальным хранилищем. В этом плане система может быть модифицирована для работы в удаленном режиме, как в локальной сети, так и через Internet. Эта модификация может привести к созданию WEB-интерфейса доступа к единой базе данных о прогнозе цунами для всех регионов страны.

Для осуществления этих планов развития нам представляется работа в несколько этапов:

- Провести аналогичную работу на основе имеющейся системы для другого региона. Это позволит сразу выявить слабые места системы и определить первоочередные направления по доработке.
- Стандартизовать обмен данными между модулями системы и хранения информации, где это еще не сделано, и изменить используемые на основе полученного опыта проектирования системы. Таким образом, будет подготовлена база для развития системы.
- На основе опыта перевести систему на более новую платформу (язык программирования, БД и средства ее администрирования).
- Провести работу по частичной доработке инструментов системы и дополнить самыми необходимыми.
- Подобрать более оптимальные для системы стандарты.
- Развивать систему в направлении дополнения необходимой функциональностью.

5. Литература

1. Abe K. (1978) A dislocation model of the 1933 Sanriku earthquake consistent with tsunami waves // *J. Phys. Earth*, V.26, № 4, P.381-396.
2. Abe K. (1979) Tsunami propagation on a seismological fault model of the 1952 Kamchatka earthquake // *Bull. Nippon Dental Univ.*, № 8, P.3-11.
3. Aida I. (1974) Numerical computation of a tsunami based on a fault origin model of an earthquake // *J. Seism. Soc. Japan*, V.27, № 2, P.141-154.
4. Aida I. (1978) Reliability of a tsunami source model derived from fault parameters // *J. Phys. Earth*, V.26, P.57-73.
5. Aki K. (1972) Earthquake mechanism // *Tectonophysics*, V.13, № 1-4, P.423-446.
6. Ando M. (1982) A fault model of the 1946 Nankaido earthquake derived from tsunami data // *Phys. Earth Planet. Int.*, V.28, № 4, P.320-336.
7. Minoura K., Nakaya S. (1991) Traces of tsunami preserved in inter-tidal lakustrine and marsh deposits: some examples from northeast Japan // *J. of Geology*. V.99, № 2, P.265-287.
8. Chinnery M. (1951) The deformation of the ground around surface faults // *Bull. Seis. Soc. Am.*, V.51, P.355-372.
9. Comer R.P. (1984) Tsunami generation: a comparison of traditional and normal mode approaches // *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, V.77, № 1, P.29-41.
10. Geist E. (1998) Local tsunamis and earthquake source parameters. In: *Tsunamigenic Earthquakes and Their Consequence* (R.Dmowska and B.Saltzman, Editors) // *Advances in Geophysics.*, V.39, P.117-209.
11. Hammack J.L. (1972) Tsunamis: a model of generation and propagation // *W.M. Keck Laboratory Hydraulic and Water Resources, Calif. Inst. Techn. Report KH-R-28*, 261 pp.
12. Hammack J.L. (1973) A note on tsunamis: their generation and propagation in an ocean of uniform depth // *J.Fluid Mech.*, V.60, part 4, P.769-799.
13. Hwang L.-S., Divoky D. (1970) Tsunami generation // *J.Geophys.Res.*, V.75, № 33, P.6802-6817.
14. Kajiura K. (1981) Tsunami energy in relation to parameters of the earthquake fault model // *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ.*, V.56, № 3, P.415-440.
15. Maruyama T. (1964) Statistical elastic dislocation in an infinite and semi-infinite medium // *Bull. Earthq. Res. Inst.*, V.42, № 2, P.289-368.
16. Matsu'ura M., Sato R. (1975) Displacement fields due to the fault. // *J. Seism. Soc. Of Japan (Zizin)*, V.28, № 4, P.429-434.
17. Okada Y. (1985) Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // *Bull. Seis. Soc. Am.*, V.75, № 4, P.1135-1154.
18. Press F. (1965) Displacements, strains and tilts at teleseismic distances // *J. Geoph. Res.*, V.70, № 10, P.2395-2412.
19. Sato R., Matsu'ura M. (1974) Strains and titles on the surface of a semi-infinite medium. // *J. Geoph. Earth*, V.22, № 2, P.213-221.
20. Аверьянова В.Н. (1968) Детальная характеристика сейсмических очагов Дальнего Востока, М.: Наука, 192 с.

21. Атлас максимальных заплесков цунами. (1978) Отв.ред. С.Л.Соловьев, Владивосток: МГИ АН УССР, ДВНИГМИ, 61с.
22. Балакина Л.М. (1979) Ориентация разрывов и подвижек в очагах сильных землетрясений северной и северо-западной части Тихого океана. // Физика Земли, № 4, С.43-52.
23. Балакина Л.М. (1972) Цунами и механизм очага землетрясений северо-западной части Тихого океана. // В кн.: Волны цунами: Труды СахКНИИ, вып. 29, Южно-Сахалинск, С.48-72.
24. Введенская А.В. (1959) О поле смещений при разрывах сплошности упругой среды // Изв. АН СССР, серия геофизич., №4, С.516-526.
25. Введенская А.В. (1956) Определение полей смещения при землетрясениях с помощью теории дислокации // Изв. АН СССР, серия геофизич., №3, С.277-284.
26. Викулин А.В. (1998) Природный риск северной Камчатки // Тихоокеанская геология, 17, № 2, 85-92
27. Викулин А.В. (1990) Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // ДАН, 310, № 4, 821-824.
28. Гнибиденко Г.С., Быков Т.Г., Веселов С.В. и др. (1980) Тектоника Курило-Камчатского глубоководного желоба // М.: Наука, 178с.
29. Го Ч.Н., Кайстренко В.М., Пелиновский Е.Н., Симонов К.В. (1986) Прогноз цунамиопасности для побережья Камчатки // Метеорология и гидрология, № 7, С.74-81.
30. Го Ч.Н., Кайстренко В.М., Симонов К.В., Пелиновский Е.Н., Плинк Н.А, Сладкевич М.С., Соловьев С.Л. (1984) Методы расчета цунамиопасности побережья // Землетрясения и предупреждение стихийных бедствий. Труды 27-го Геологического конгресса, Москва, 4-14 августа 1984г., Т.6, С.133-139.
31. Гусяков В.К. (1974) О связи волны цунами с параметрами очага подводного землетрясения // Математические проблемы геофизики, Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, вып.5, ч.1, С.118-140.
32. Гусяков В.К. (1978) Остаточные смещения на поверхности упругого полупространства // Условно-корректные задачи математической физики в интерпретации геофизических наблюдений, Новосибирск: ВЦ СО РАН, С.23-51.
33. Костров Б.В. (1975) Механика очага тектонического землетрясения, М.: Наука, 176с.
34. 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, С.7-17.
35. 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, С.7-17.
36. Лобковский Л.И., Сорохтин О.Г. (1979) Деформация литосферных плит в зонах поддвига // В кн.: Океанология. Геофизика океана, Т.2, Геодинамика, М.: Наука, С.194-203.
37. Лобковский Л.И., Сорохтин О.Г. (1980) Тектоника литосферных плит и происхождение цунамигенных землетрясений. // ДАН СССР, 251, № 5. С.1092-1095.
38. Лурье А.И. (1955) Пространственные задачи теории упругости, М.: ГИТТЛ, 491с.

39. Ляв А. (1935) Математическая теория упругости, М.-Л., ОНТИ, 674с.
40. Мелекесцев И.В., Курбатов А.В. (1993). Оценка палеосейсмичности КАО по результатам исследований 1992-1993 гг. // Отчет о работе в 1993 г. по х/д 2-93 "Уточнение карты общего сейсмического районирования КАО. Этап накопления и обработки полученных данных", Петропавловск-Камчатский: ОМСП ИВ ДВО РАН
41. Мелекесцев И.В., Курбатов А.В. (1994). Частота проявления крупнейших палеосейсмических событий // Отчет о работе в 1994 г. по х/д 1-94 "Уточнение карты общего сейсмического районирования КАО", Петропавловск-Камчатский: ОМСП ИВ ДВО РАН.
42. Пелиновский Е.Н., Плинк Н.Л. (1980) Предварительная схема цунамирайонирования побережья Курило-Камчатской зоны на основе одномерных расчетов (модельный очаг) // Препринт ИПФ АН СССР, Горький, № 5, 18с.
43. Подъяпольский Г. С. (1978) Возбуждение цунами землетрясением. // В кн.: Методы расчета возникновения и распространения цунами, М.: Наука, С.30 - 87.
44. Подъяпольский Г.С. (1968) Возбуждение длинной гравитационной волны в океане сейсмическим источником в коре // Физика Земли, №1, С.7-24.
45. Саваренский Е.Ф. (1972) Сейсмические волны, М.: Недра, 194 с.
46. Снеддон И., Бэрри Д. (1961) Классическая теория упругости, М.: Физматгиз, 220с.
47. 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, С.31-39.
48. Удинцев Г.Б. (1962) Рельеф дна и вопросы тектоники // Труды океанограф. комиссии АН СССР, Т.10, № 3.
49. 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.
50. Федотов С.А. (1968) О сейсмическом цикле, возможности количественного районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР, С.121-150.