

Российская академия наук
Сибирское отделение
Институт вычислительных технологий

"УТВЕРЖДАЮ"
Директор ИВТ СО РАН

академик _____ Ю. И. Шокин

1 августа 2009 года

**«Подготовка цифровых батиметрических данных на регуляр-
ной сетке для Дальневосточных акваторий России»**

ПЕРВЫЙ ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ОТЧЕТ

(контракт № 17/09-1 от 17 июля 2009 г.)

Руководитель работ

г.н.с., д.ф.-м.н., профессор

_____ Л. Б. Чубаров

Новосибирск, 2009 г

Исполнители:

д.ф.-м.н.	В.К.Гусяков
д.ф.-м.н.	Ан.Г.Марчук
к.ф.-м.н.	А.Ю.Бежаев

Введение	3
Основные цели и задачи выполнения работ.....	3
Содержание работ первого этапа.	3
1. Об источниках создания батиметрии.....	4
2. Об извлечению данных и линейной интерполяции	4
3. Особенности интерполяции батиметрии на хаотических сетках.....	4
4. Поиск точек для интерполяции	5
5. Базовый алгоритм интерполяции	5
6. Иллюстрация данных и алгоритма на примере острова Кодиак.....	6
7. Библиография	8

Введение

Основные цели и задачи выполнения работ.

Целью создания батиметрических данных для акваторий, прилегающих к побережью Камчатки и ряда Курильских островов, является обеспечение необходимой точности входных данных для проведения численного моделирования трансформации волн цунами в рассматриваемых акваториях.

Качество батиметрической информации определяет уровень достоверности воспроизведения основных характеристик проявления волн цунами у побережья и, таким образом, определяет уровень достоверности прогнозных параметров, вырабатываемых на основе результатов такого численного моделирования. Справедливость этого утверждения доказана как теоретическими исследованиями, так и практикой модельных и производственных расчетов.

Существующие батиметрические базы на регулярной сетке не способны обеспечить необходимую точность воспроизведения геометрических характеристик береговой линии и распределения глубин вблизи берега. Использование недостоверных входных данных приводит к понижению достоверности результатов вычислительных работ.

Содержание работ первого этапа.

В соответствии со Спецификацией к Контракту задача первого этапа, завершившегося 1 августа 2009 года, формулировалась следующим образом: «Разработать вычислительный алгоритм для пересчета значений глубины с хаотически распределенных данных в числовые массивы с заданными пространственными интервалами между соседними точками».

Поставленная задача выполнена. При этом были модифицированы созданные ранее алгоритмы, созданы новые оригинальные компоненты алгоритмического инструментария, обеспечивающего пересчет значений глубины с хаотически распределённых данных в числовые массивы с заданными пространственными интервалами между соседними точками. Исходными данными для такого пересчёта являются цифровые данные эхолотации в виде XYZ (долгота, широта и измеренная глубина) или батиметрические и навигационные карты с изолиниями глубины (предпочтение должно отдаваться векторизованным картам в электронном формате).

Упомянутые выше алгоритмы основаны на современных методах интерполяции значений глубин в точки регулярной сетки с помощью специальных кубических сплайнов с использованием в нескольких ближайших точках значений глубин из исходного набора хаотически распределённых данных. Алгоритм является локально-глобальным и пространственно инвариантным.

Проведены пробные расчеты, показавшие высокие эксплуатационные качества созданных алгоритмов.

1. Об источниках создания батиметрии

На батиметрических картах данные о глубинах содержатся в виде изолиний глубины и точечных данных эхолотации. Большое количество данных эхолотации собрано в цифровом виде в базах данных "Marine Trackline Data" (Marine Geological and Geophysical Data from NGDC) [1] и "Hydrographic Survey Data" (Hydrographic Survey Data, CD-ROM data set) [2]. Эти базы содержат данные с большого количества рейсов судов за более чем столетний период времени и с различной плотностью покрывают практически всю акваторию Мирового океана. В некоторых регионах плотность этих промеров глубин достаточна для создания на их основе регулярного массива глубин с достаточно малым пространственным шагом (менее одной географической минуты).

Однако, во многих местах расстояния между точками с промерами настолько велики, что использования только этих данных будет явно недостаточно для создания качественной регулярной батиметрии хорошей детальности. В другой базе данных "GEBCO" (GEBCO-2003) [3] в цифровом виде содержатся изолинии глубин также для всей акватории Мирового океана. Набор изолиний глубины зависит от региона и наряду с областями, где количество уровней достаточно велико (в Средиземном море оно составляет более 40), имеется достаточно мест, где плотность изолиний глубины явно мала. Возможна также другая информация о глубинах, которая пока недоступна для широкого круга пользователей.

Здесь будет кратко описан способ создания регулярной батиметрии, основываясь на промерах глубины, случайно-распределенных в рассматриваемой акватории.

2. Об извлечении данных и линейной интерполяции

Опишем технологию создания цифровой батиметрии на регулярной сетке в случае, когда множество точек с промерами глубины покрывает интересующую нас область с достаточной плотностью. На первом этапе необходимо извлечь из базы данных эхолотации "Marine Trackline Data" все точки с промерами, расположенные в данной области, или ввести цифровые данные с батиметрических карт. Получится файл, каждая строка которого состоит из трех чисел: долгота, широта и измеренная глубина. Затем устанавливаем длину пространственного шага сетки, в узлах которой нами будут найдены значения глубины. На последнем этапе программа пересчитает значения глубин из нерегулярного множества точек с промерами глубины в значения глубины в узлах нашей регулярной сетки.

Сначала скажем несколько слов об алгоритме, использующем линейную интерполяцию. Программа последовательно ищет приближенное значение глубины во всех узлах регулярной сетки. У каждой узловой точки определены ее географические координаты. Далее перебираем все точки с промерами глубины, находя расстояние от каждой из этих точек до рассматриваемого узла сетки. Если среди них оказываются точки, расстояние до которых не превосходит одной двадцатой установленного шага сетки, то глубина в узловой точке принимается равной глубине в самой близкой точке. Если таких близких точек нет, то выбираем из самых близлежащих три точки, образующих треугольник вокруг рассматриваемого узла. Затем, зная координаты вершин треугольника и значения глубины в них, с помощью линейной интерполяции легко найти приближенное значение глубины в рассматриваемой узловой точке. В качестве варианта этого метода для линейной интерполяции могут быть использованы не три, а шесть близлежащих точек, расположенных в различных секторах прямоугольной декартовой системы координат с центром в рассматриваемой узловой точке. Таким образом, рассматривая поочередно все узловые точки регулярной сетки, мы находим значение глубины в каждой из них. Очевидно, что более плотное покрытие рассматриваемой области данными позволяет создавать более качественную цифровую батиметрию для этой области.

3. Особенности интерполяции батиметрии на хаотических сетках

Входные данные при интерполяции батиметрии характеризуются:

- Громадным количеством измерений (десятки-сотни тысяч и более измерений), даже для небольших районов;

- Значительной нерегулярностью;
- Одновременно избыточностью данных и их недостатком;
- Ошибками, возникающими вследствие измерительных погрешностей и из-за человеческого фактора.

Универсальные методы интерполяции данных на хаотических сетках (например, с помощью функций Грина, описанной ниже) являются в общем дорогостоящими $O(n^2)$ и довольно неустойчивыми процедурами. Поэтому, число точек, используемых для интерполяции, не должно быть большим. Как следствие, необходимо использовать локальные методы интерполяции. Локальные аналитические методы интерполяции состоят в разбиении областей на пересекающиеся подмножества, решении задач на подобластях и дальнейшем склейке получившихся решений.

В предлагаемом подходе мы используем неаналитический метод пересчета на регулярную сетку по алгоритму, применяющемуся единым образом для всех расчетных точек. Его суть состоит в следующем. Во-первых, для заданной расчетной сетки мы производим фильтрацию данных, прореживая их, не допуская более одного измерения в расчетной ячейке. Во-вторых, находим точки, которые участвуют в определении глубины в расчетной точке. Самая простейшая процедура – это нахождение одной или нескольких точек, ближайших к расчетной точке. Несмотря на простоту формулировки процедуры, необходимо обеспечить высокую эффективность ее выполнения, так, чтобы ее вычислительная сложность не оказалась на порядок выше, чем собственно интерполяция по найденным узлам.

4. Поиск точек для интерполяции

Характерная ситуация при интерполяции батиметрических данных состоит в том, что расчетная точка лежит в полигоне, чьи стороны с достаточной степенью детализации описаны, то есть в них имеются глубины на частой сетке. На самом деле стороны – это трассы морских судов, производивших наблюдения. В принципе этих точек достаточно для описания детальной батиметрии внутри полигона. Вопрос состоит в том, как их извлечь из всей информации и отфильтровать для уменьшения количества. Другая проблема заключается в обеспечении равномерного распределения отобранных точек (в условиях ограниченности окончательного числа точек для интерполяции). Например, расчетная точка может лежать близко к одной из сторон полигона, тем не менее, данные с дальних сторон полигона должны также присутствовать. Иначе, качество интерполяции не будет высоким.

Все эти проблемы решаются в нашем алгоритме, где пользователь задает ограничение K на число узлов точек интерполяции. Минимальное число точек интерполяции равно 9-ти, но их может оказаться меньше, если с какой-то из сторон данных нет (полигон оказался незамкнутой полилинией). Точки выбираются следующим образом: одна из точек – это ближайшая на всем подмножестве, остальные восемь точек являются ближайшими к расчетной в секторах ограниченных лучами, выпускаемыми из расчетной точки в следующих направлениях N, NE, E, SE, S, SW, W, NW.

Эксперименты показали, что при увеличении точек интерполяции K скорость вычислений падает, однако, качество растет. Если $K > 9$, то в секторах производится поиск нескольких ближайших точек. Поиск ближайших точек может оказаться дорогостоящей процедурой, однако в нашем методе эта процедура оптимизирована: создаются специальные таблицы для быстрого поиска. Отметим, что метод поиска еще быстр потому, что не содержит вещественных операций.

5. Базовый алгоритм интерполяции

Для интерполяции на хаотических сетках мы использовали метод функций Грина, который относится к более широкому подмножеству методов радиальных функций. Отметим, что этот метод точен на линейных функциях. Общая постановка метода радиальных функций состоит в выборе радиальной функции одной переменной $f(R)$ и формировании линейной комбинации

$$S(\vec{P}) = \sum_{i=1}^k \alpha(i) \cdot f(|\vec{P} - \vec{P}(i)|) + ax + by + c \quad (1)$$

представляющей функцию двух переменных. Здесь $\vec{P}=(x,y)$ – произвольная расчетная точка, $\vec{P}(i)=(x(i),y(i))$ – точки интерполяции; коэффициенты $\alpha(i)$, a , b , и c выбираются из условий интерполяции (совпадения функции $S(\vec{P})$ с заданными глубинами $d(j)$ при подстановки вместо $\vec{P}(i)$ интерполяционных узлов):

$$S(\vec{P}(j)) = \sum_{i=1}^k \alpha(i) \cdot f(|\vec{P}(j) - \vec{P}(i)|) + ax + by + c = d(j), \quad j=1,k \quad (2)$$

и условий ортогональности:

$$\sum_{i=1}^k \alpha(i) = 0, \quad \sum_{i=1}^k \alpha(i)x(i) = 0, \quad \sum_{i=1}^k \alpha(i)y(i) = 0. \quad (3)$$

Из систем уравнений (2) и (3) находим коэффициенты $\alpha(i)$, a , b и c , и затем находим из выражения (1) значение глубины в узловой точке. Повторяя эту процедуру последовательно для всех узловых точек, создаем цифровую батиметрию на регулярной сетке с любым заданным пространственным шагом.

6. Иллюстрация данных и алгоритма на примере острова Кодиак

Проиллюстрируем работу предлагаемого метода для создания цифрового массива глубин с пространственным шагом в 30 секунд для небольшой (5x5 географических градусов) области в северной части Тихого океана вокруг острова Кодиак. Доступная батиметрическая информация в виде промеров глубин из баз данных "Marine Trackline Data" и "Hydrographic Survey Data" представлена на рисунке 1 в виде точек разного цвета. Из рисунка видно, что плотность этих данных значительно выше вблизи берега, в сравнении с удаленной от берега акваторией.

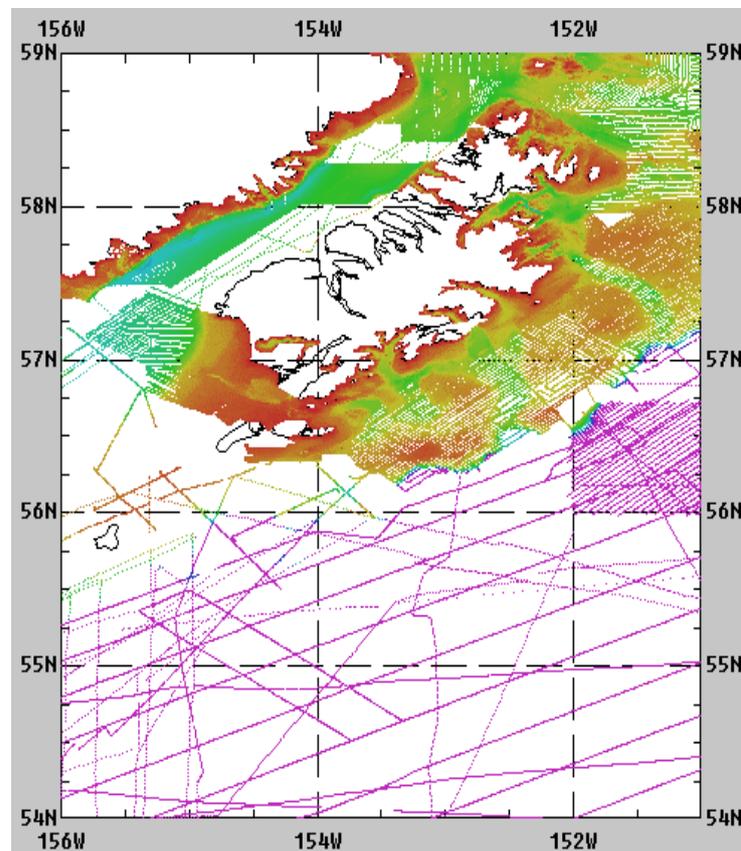


Рис. 1. Расположение данных эхолота из базы данных Marine Trackline Data вокруг острова Кодиак в северной части Тихого океана.

Для этой области были построены два массива глубин размерностью 600 x 600 точек. Один был создан с применением линейной интерполяции, а другой – сплайн-интерполяции. Оба массива визуализированы на рисунке 2 в виде псевдо-трехмерных изображений с боковой подсветкой. Такой способ визуализации позволяет увидеть малейшие неровности рельефа дна (Рис. 2). Здесь вектор подсветки направлен из левого верхнего угла области. В нижней части левого рисунка, соответствующего линейной интерполяции, можно видеть «звездные» структуры на дне глубоководной части акватории, расположенные вокруг некоторых локальных экстремумов. Такой эффект возникает из-за большого расстояния между траекториями движения судна во время эхолотации (Рис. 1). Для сравнения на рисунке 3 представлен рельеф того же участка дна из глобальной базы данных GEBCO-2003, включающей в себя наряду с изолиниями глубины цифровой рельеф дна с детальностью одна географическая минута. Сравнение рисунков 2 и 3 ясно показывает существенно более высокое качество цифровой батиметрии, построенной с использованием разработанного метода. Данные GEBCO (рис. 3) выглядят слишком уж сглаженными и не отражают многих деталей подводного рельефа.

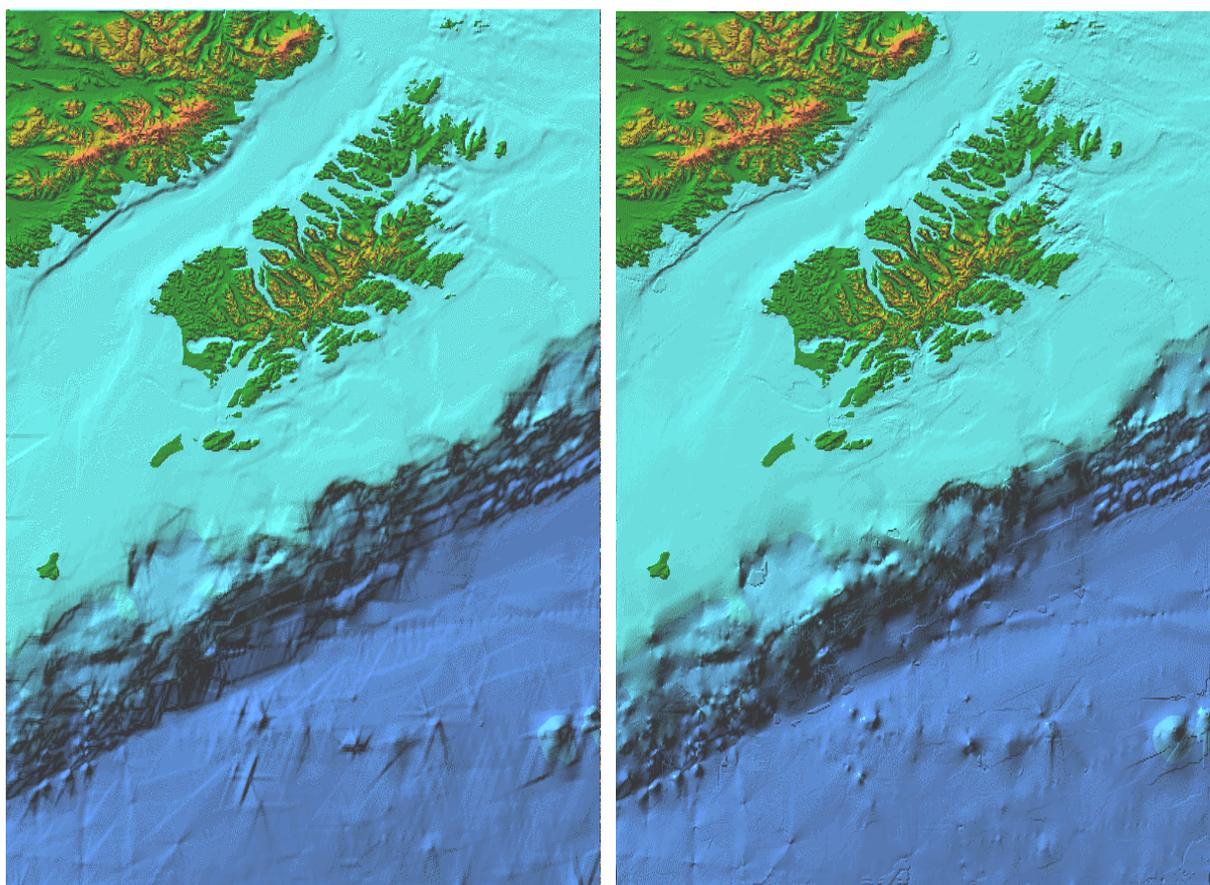


Рис. 2. Псевдо-трехмерные изображения массивов глубин, которые были созданы, используя линейную интерполяцию (слева) и сплайн-интерполяцию (справа).

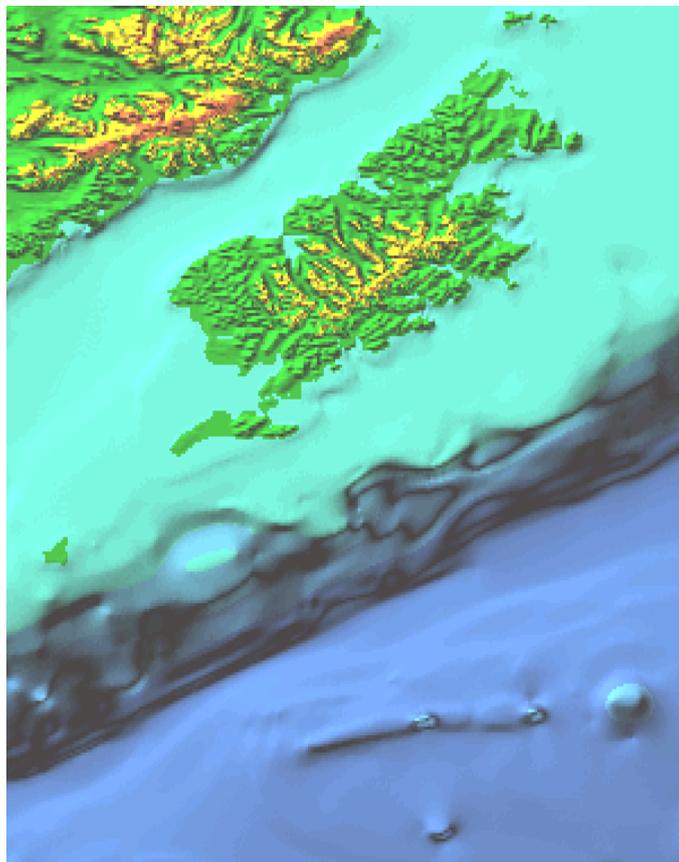


Рис. 3. Визуализация рельефа дна на основе данных GEBCO-2003.

7. Библиография

1. Hydrographic Survey Data, CD-ROM data set, Ver. 3.2, *National Ocean Service, NGDC, NOAA, E/GC3*, 325 Broadway, Boulder, CO.
2. Marine Geological and Geophysical Data from NGDC, Compact disc data set, *National Geophysical Data Center*, Boulder, Colorado, USA.
3. GEBCO Digital Atlas CD-ROMS. 1903-Centenary Edition-2003. *Intergovernmental Oceanographic Commission, International Hydrographic Organization. British Oceanographic Data Centre, Joseph Proudman Building, Brownlow street, Liverpool L3 5DA, United Kingdom.*