

Российская академия наук  
Сибирское отделение  
Институт вычислительных технологий

"УТВЕРЖДАЮ"  
Директор ИВТ СО РАН

академик \_\_\_\_\_ Ю. И. Шокин

30 октября 2009 года

**«Подготовка цифровых батиметрических данных  
на регулярной сетке для Дальневосточных акваторий России»**

ИТОГОВЫЙ 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 .....	4
Основные цели и задачи выполнения работ.....	4
Содержание работ первого этапа.....	4
Содержание работ второго этапа.....	4
Содержание работ третьего этапа.....	5
1. Об источниках батиметрических данных.....	5
2. Об извлечении данных и линейной интерполяции.....	5
3. Особенности интерполяции батиметрии на хаотических сетках.....	6
4. Поиск точек для интерполяции.....	6
5. Базовый алгоритм интерполяции.....	7
6. Иллюстрация данных и работы алгоритма на примере острова Кодиак.....	7
7. Описание общего сплайнового алгоритма.....	9
7.1 Описание примера.....	9
7.2. Локальность.....	10
7.3. Инвариантность.....	10
7.4. Адаптация алгоритма для Курило-Камчатского региона.....	11
8. Форматы входных и выходных данных.....	11
8.1. Хаотические данные по батиметрии.....	11
8.2. Выходные данные.....	12
9. Цифровая батиметрия на регулярной сетке для Курило-Камчатского региона. Общие характеристики результатов работ.....	12
10. Описание форматов данных.....	15
Файл 001.asc (3457200 байт).....	15
Файл 1_U3.bb (1152000 байт).....	15
Файл 002.asc (7259040 байт).....	15
Файл 2_U3.bb (2419200 байт).....	15
Файл 003.asc (5185200 байт).....	15
Файл 3_U3.bb (1728000 байт).....	16
Файл 004.asc (3889200 байт).....	16
Файл 4_U3.bb (1296000 байт).....	16
11. Сравнение созданной цифровой батиметрии с другими сеточными данными.....	16
12. Инструкция пользователю демонстрационной программы BathViewer.....	21
12.1. Системные требования.....	22
12.2. Порядок работы.....	22
13. Содержимое папки BathData.....	26
14. Библиография.....	27
15. Современная зарубежная библиография по теме работы.....	28

## **Введение**

### **Основные цели и задачи выполнения работ.**

Целью работ по созданию цифровых массивов уточненных 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 распределенных данных в числовые массивы с заданными пространственными интервалами между соседними точками. Исходными данными для такого пересчета 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 распределенных данных. Алгоритм является локально-глобальным и пространственно инвариантным.

Проведены пробные расчеты, показавшие высокие эксплуатационные качества созданных алгоритмов.

### **Содержание работ второго этапа.**

В соответствии со Спецификацией к Контракту на **втором** этапе, завершившемся 1 сентября 2009 года, задача этапа формулировалась следующим образом: «Разработать пакет демонстрационных компьютерных программ для создания цифровой батиметрии на регулярных сетках с детальностью до 30 географических секунд и документацию к нему с описанием ввода-вывода, инструкцией для пользователя».

Поставленная задача решена. В настоящем отчете указаны методы программной реализации алгоритма, включая детали его функционирования, а также методики построения сплайнового метода функций Грина, на котором базируется алгоритм. В качестве иллюстрации приводится линейный алгоритм восстановления, который может рассматриваться как частный случай общего подхода.

В дополнение приводится описание структур данных, которые могут быть представлены как входные данные алгоритма. Выходные данные представляются на регулярной сетке с разрешением в 30 секунд, в бинарном и текстовом виде.

## Содержание работ третьего этапа.

В соответствии со Спецификацией к Контракту на **третьем** этапе, завершившемся 1 октября 2009 г., результатом работ являлись «Массивы данных в текстовом и (или) бинарном форматах, содержащие цифровую батиметрию для прибрежных акваторий Курило-Камчатского региона». При этом было предусмотрено подготовить три оцифрованных фрагмента.

Поставленная задача решена в несколько **большем** объеме. Созданы и переданы Заказчику по итогам работ на третьем этапе массивы данных для **четырёх** прибрежных акваторий Курило-Камчатского региона. В настоящем отчету приводятся характеристики переданных файлов – текстовых (001, 002, 003, 004) и бинарных (1\_U3.bb, 2\_U3.bb, 3\_U3.bb, 4\_U3.bb), содержащих предусмотренные заданием батиметрические данные.

### 1. Об источниках батиметрических данных

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, на основе промеров 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 близ-

лежащих 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. Число необходимых арифметических действий имеет величину порядка  $O(n^2)$ , где  $n$  – характерное число узлов по одному из направлений. Соответствующие алгоритмы довольно неустойчивы. 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, одна-

ко 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

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

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

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

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 работы 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 (Рис. 1) в виде точек разного цвета. Из рисунка видно, что плотность этих данных значительно выше вблизи берега, в сравнении с удаленной от берега акваторией.

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 отрисованы на рисунке (Рис. 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 (Рис. 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 (Рис. 2 и Рис. 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.

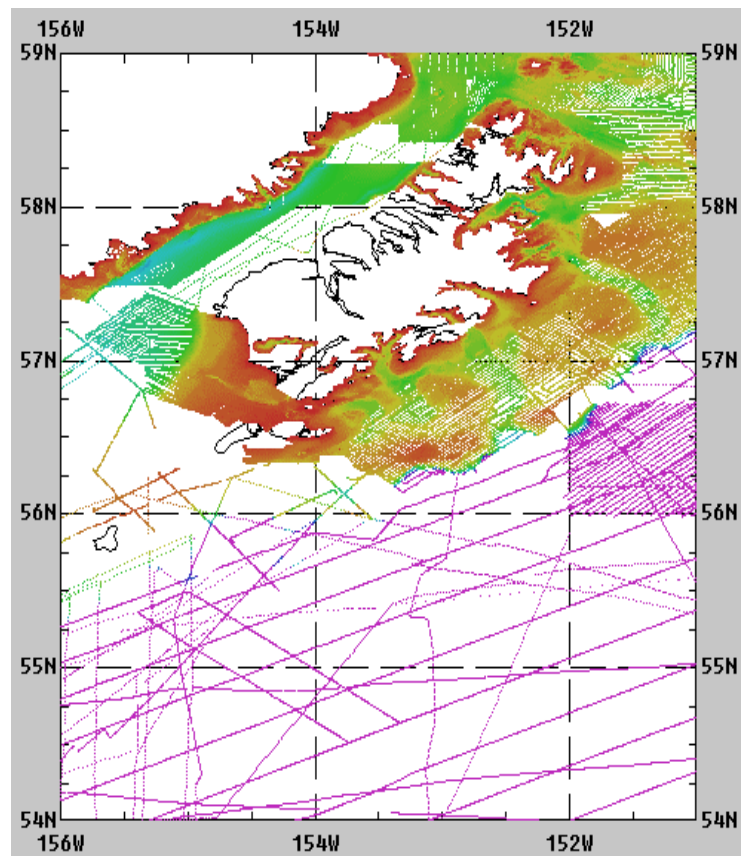


Рис. 1. Расположение данных эхолота из базы данных Marine Trackline Data вокруг острова Кодиак в северной части Тихого океана.

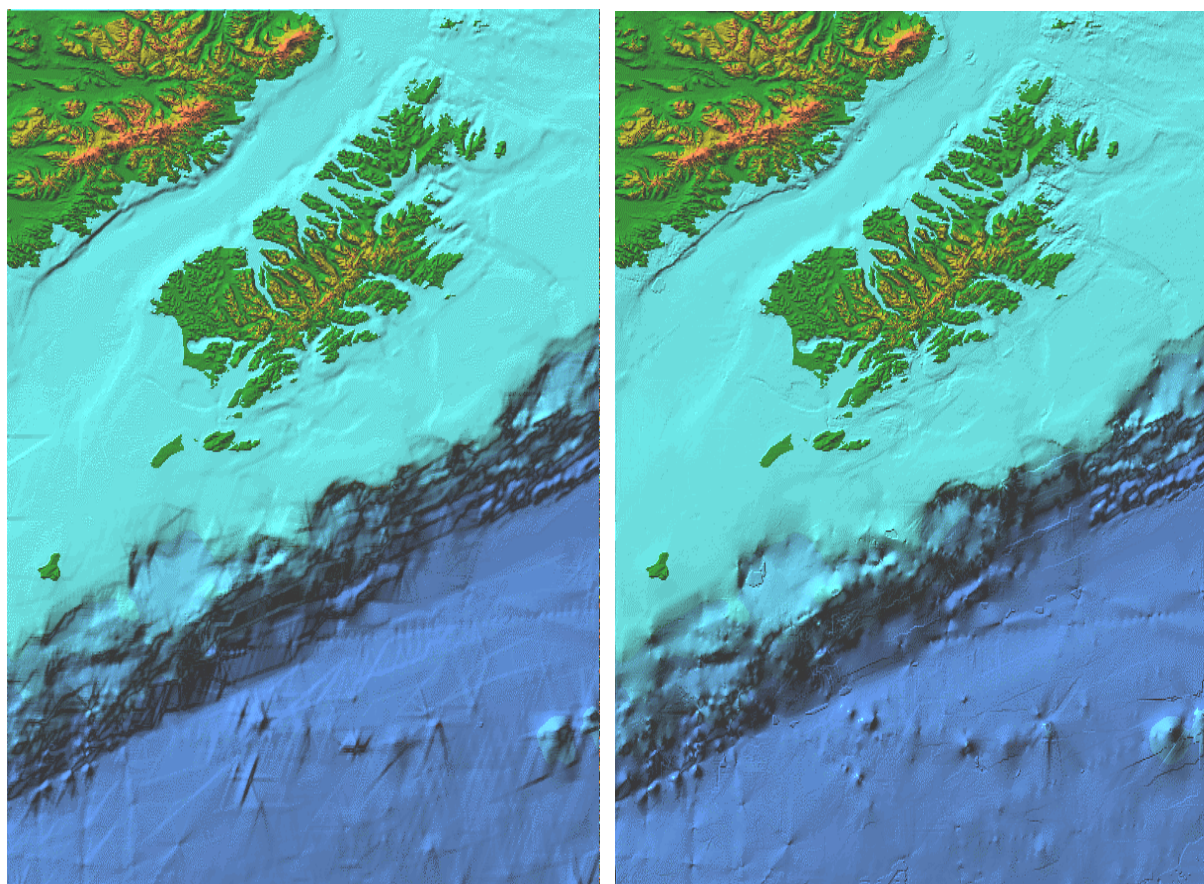


Рис. 2. Псевдо-трехмерные изображения массивов глубин, рассчитанных с использованием линейной интерполяции (слева) и сплайн-интерполяции (справа)



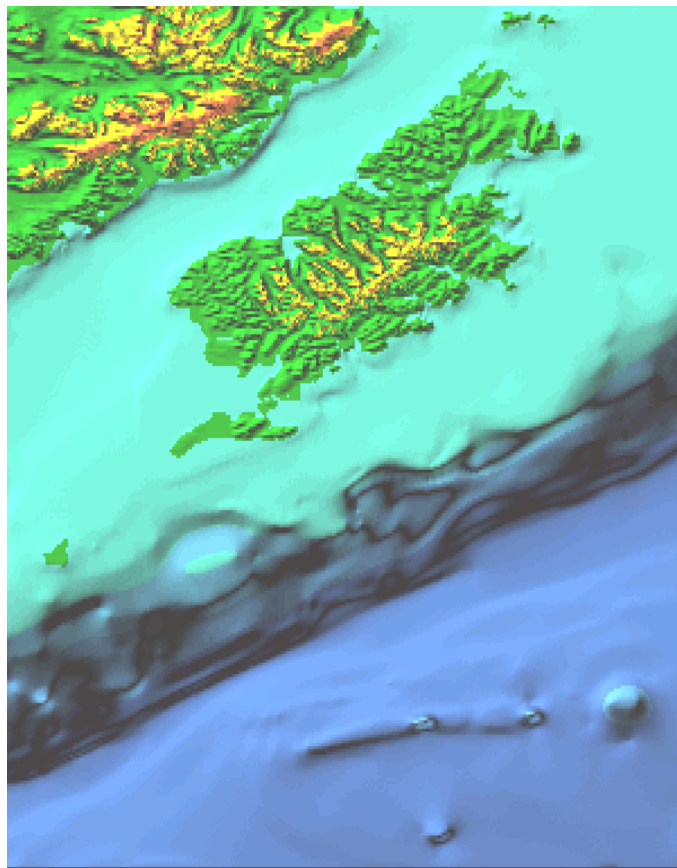


Рис. 3. Визуализация рельефа дна на основе данных GEBCO-2003.

## 7. Описание общего сплайнового алгоритма

Представленный алгоритм использует многие алгоритмы теории сплайнов и ее подходы. В основе лежит теория воспроизводящих отображений для интерполяционных сплайнов, функции Грина [4] и локальные способы интерполяции [5]. Детали алгоритма публиковались ранее в [5-6]. В данном документе мы их излагаем более подробно.

Адаптация алгоритмов для реального региона состоит в специализации алгоритмов и выборе небольшого числа параметров на основе визуального сравнения результатов. В частности, в алгоритмах поиска ближайших точек (для восстановления) делается небольшая коррекция на широту. В других местах производилась коррекция параметров функций Грина, которые трудно интерпретировать физически (логически). Впрочем, кажется, этот выбор не должен сильно влиять на результат использования данных в крупно-масштабных задачах, например, при расчете волн цунами в океане и прибрежных районах.

Комбинирование алгоритмов позволяет сделать алгоритм локально-глобальным и пространственно инвариантным. Локальный подход позволяет улучшить качество интерполяции в областях с плотным расположением данных и исключить влияние дальних данных. Глобальный подход позволяет получить визуально хорошую картинку даже в местах отсутствия данных за счет привлечения пространственно удаленных данных.

Использование подобных (практически идентичных) методов как для локальной, так и для глобальной интерполяции позволяет увидеть их пространственную инвариантность. Такие подходы активно используются в теории фракталов (в применении к сжатию данных). Фракталы еще и аффинно-инвариантны. В предлагаемом алгоритме под пространственной инвариантностью подразумевается инвариантность относительно вращения и однородного (по координатам) растяжения.

### 7.1 Описание примера

На примере следующей схемы (Рис. 4) будут проиллюстрированы важные идеи алгоритма: локальность, инвариантность и пр.

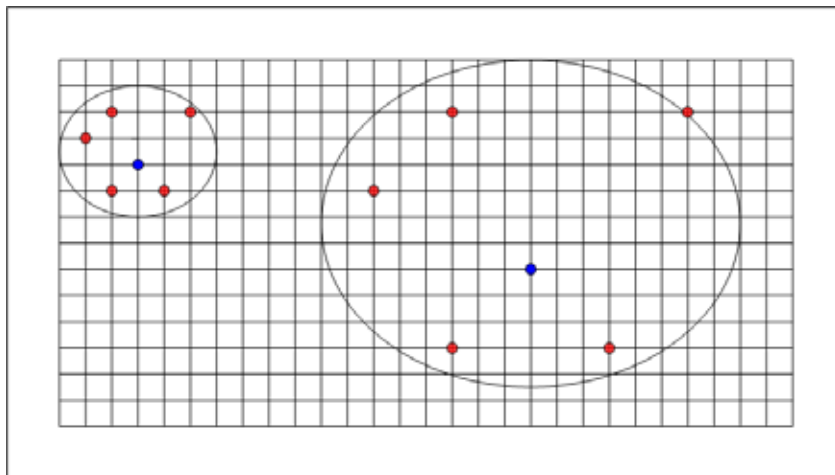


Рис. 4. Иллюстрация алгоритма

На этом рисунке видны:

- Прямоугольная сетка с размерами 29x15. Эта сетка, на которой необходимо построить батиметрию.
- 10 красных точек, представляющих исходные данные. Кроме их геометрического (X,Y) расположения, в них заданы глубины Z. На рисунке эти точки расположены точно в узлах расчетной сетки, но это вовсе необязательно.
- 2 синих точки, в которых необходимо рассчитать батиметрию.
- 2 эллипса, иллюстрирующие два независимых кластера, которые специально выбраны похожими (один получается растяжением другого), чтобы проиллюстрировать несколько деталей алгоритма.

Подобная конфигурация содержит мало входных данных. Она, конечно, недостаточна для получения качественного результата. Исходные данные для Курило-Камчатского региона будут содержать более плотное покрытие, которое будет тщательно отобрано для обеспечения результата в критических прибрежных районах.

Однако, это модельный случай, и можно представить, что имеются другие интерполяционные узлы в регионе, кроме как в этих двух эллипсах.

Расчет значений в каждом узле расчетной сетки 29x15 ведется независимо, сверху вниз и слева направо. В этом случае при расчете первой встретится синяя точка, которая расположена малом эллипсе, и через какое-то время встретится синяя точка, расположенная в большом эллипсе.

Согласно алгоритму для расчета батиметрии в первой точке будут использованы данные (5 точек) из малого эллипса. Для расчета батиметрии во второй точке будут использованы данные из большого эллипса.

## 7.2. Локальность

Это очень важное свойство. Глобальный подход обеспечивает идеальную точность только в случае хорошей гладкости восстанавливаемой функции и хорошего расположения узлов (соотношения минимального и максимального расстояний). На практике это встречается редко, и это ведет к неустойчивости или неробастности алгоритма. Кроме того, глобальные методы неприменимы из-за ограничений по памяти и разрядности.

Локальность данного алгоритма обеспечивается выбором ближайших узлов при интерполяции.

## 7.3. Инвариантность

Данное свойство считается преимуществом алгоритмов интерполяции. Это касается инвариантности относительно растяжения (сжатия) расположения данных и вращения. Инвариантность относительно вращения в условиях дискретности обеспечить невозможно. Однако можно говорить о некоторой инвариантности, которая обеспечена в условиях точности восстановления на сетке.

## 7.4. Адаптация алгоритма для Курило-Камчатского региона

В целях ускорения работоспособности структуры данных оптимизированы под решение задач батиметрии в Курило-Камчатском регионе. Это не означает, что входные данные нельзя поменять. Такая возможность предоставляется для уточнения/исправления неточных (с точки зрения интерпретатора) данных.

## 8. Форматы входных и выходных данных

### 8.1. Хаотические данные по батиметрии

Рассматриваемые данные собраны из различных источников, и представлены для программ в простом формате:

Например, текстовый файл в формате X Y Z:

```
79.79000 51.13500 -3725.0
79.77200 51.13900 -3715.0
79.73500 51.14600 -3770.0
79.71900 51.14900 -3865.0
79.68300 51.15700 -3975.0
79.68300 51.15700 -3975.0
79.67300 51.15600 -4010.0
79.65400 51.15600 -4040.0
79.63200 51.15500 -4005.0
79.62600 51.15400 -3530.0
79.61200 51.15400 -3470.0
79.60100 51.15400 -3285.0
79.59700 51.15300 -3290.0
```

Первая координата X представляет долготу, вторая координата Y представляет широту, третья координата Z представляет глубину океана в точке с координатами (X,Y). Рассматриваемый набор точек покрывает территорию Курило-Камчатского региона [138,170]x[40-65] (в географических градусах) и должны быть предоставлены с достаточной точностью. Такие данные, достаточные для расчета батиметрии на регулярной сетке с точностью до 30 географических секунд, будут представлены для 4-х регионов.

- Координата X должна представлять долготу. Пример: 79.4523. Это значение представляет 79 (и 4523 десятитысячных градуса). Мы отмечаем этот факт, чтобы пользователь не перепутал с координатами 79 градусов 45 минут и 23 секунды.
- Координата Y представляет широту, имеет положительное значение в рамках Курило-Камчатского региона.

Данные должны достаточно плотно покрывать регион. В случае недостаточности данных возможны погрешности в расчетах (в зависимости от плотности).

Предоставленные данные обрабатываются алгоритмом и в случае незначительных изменений (10-20%) дадут практически ту же точность. Этот запас гарантирует возможность перерасчета, если пользователь захочет исключить часть неправильных данных, которые приводят к локальным возмущениям. С другой стороны, пользователь может добавить свои данные, чтобы уточнить локальное поведение батиметрии.

При желании пользователя подключить спутниковые данные по рельефу, их следует представить в виде регулярного массива на сетке с пространственным шагом в 0,5 географической минуты (30 географических секунд), совпадающей с сеткой, на которую должен быть произведен расчет.

Этот массив должен представлять таблицу, записанную в текстовом файле. Строчка представляет данные по одной широте. Количество данных в каждой строчке одинаково.

Следующий пример дает простейший (нереальный) образец 3x4:

```
1 10 10 10 1
1 10 100 10 1
1 10 10 10 1
```

Отметим, что географическая привязка отсутствует и дается во входных параметрах алгоритма.

## 8.2. Выходные данные

Выходные данные представляют глубины (возможно рельеф) в заданном районе с точностью до 1 метра. В текстовом виде они будут выглядеть примерно следующим образом (Рис. 5).

```

Number of columns: 1077
Number of rows   : 995
Left boundary: 151E 53' 30"
Right boundary: 160E 52' 00"
Low latitude: 46N 40' 30"
High latitude: 54N 58' 00"
-355 -358 -359 -359 -357 -354 -351 -348
-354 -356 -357 -357 -356 -353 -350 -347
-353 -355 -356 -356 -354 -352 -349 -346
-352 -354 -354 -354 -353 -350 -347 -345
-351 -353 -353 -353 -351 -349 -346 -344
-351 -352 -352 -351 -350 -348 -345 -343
-351 -351 -351 -350 -348 -346 -344 -342
-350 -351 -350 -349 -347 -345 -344 -342
-350 -350 -349 -348 -347 -345 -343 -341
-350 -350 -349 -348 -346 -345 -343 -342
-350 -350 -349 -348 -346 -345 -343 -342
-350 -349 -349 -348 -346 -345 -343 -343
-350 -350 -349 -348 -346 -345 -343 -343
-351 -350 -349 -348 -346 -345 -344 -343
-351 -351 -349 -348 -346 -345 -344 -343

```

Рис. 5. Текстовое представление выходных данных

В бинарном формате заголовок отсутствует, а данные представляются слитно и последовательно по 2 байта на отсчет.

## 9. Цифровая батиметрия на регулярной сетке для Курило-Камчатского региона. Общие характеристики результатов работ

Представленная исполнителями цифровая батиметрия привязана к географическим координатам и соответствует части акватории Тихого океана, омывающей побережье Камчатки и Курильских островов. Используемые в качестве входных данные эхолокации пересчитывались в цифровую батиметрию на регулярной сетке в четырёх прямоугольных областях, расположение которых показано на рисунке (Рис. 6). Прямоугольники пронумерованы цифрами от 1 до 4.

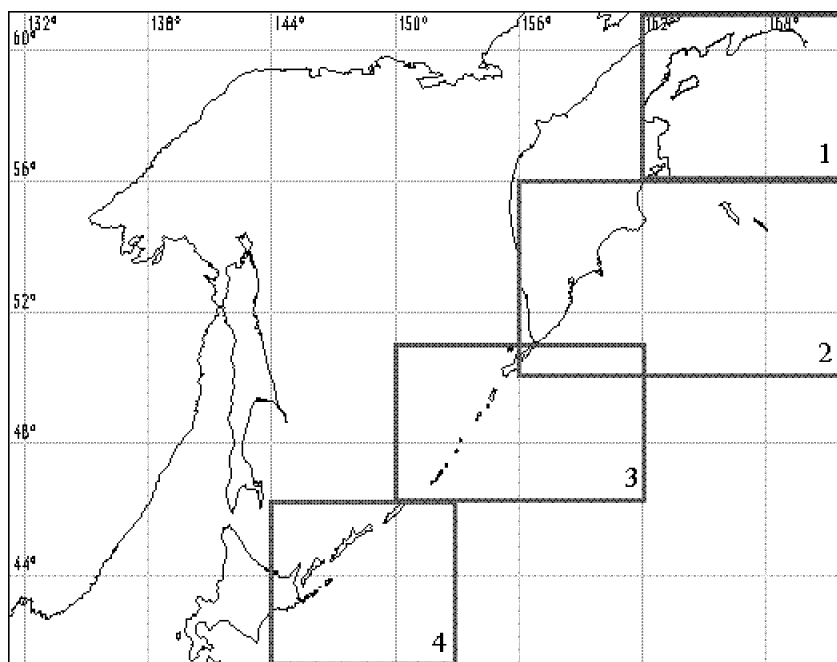
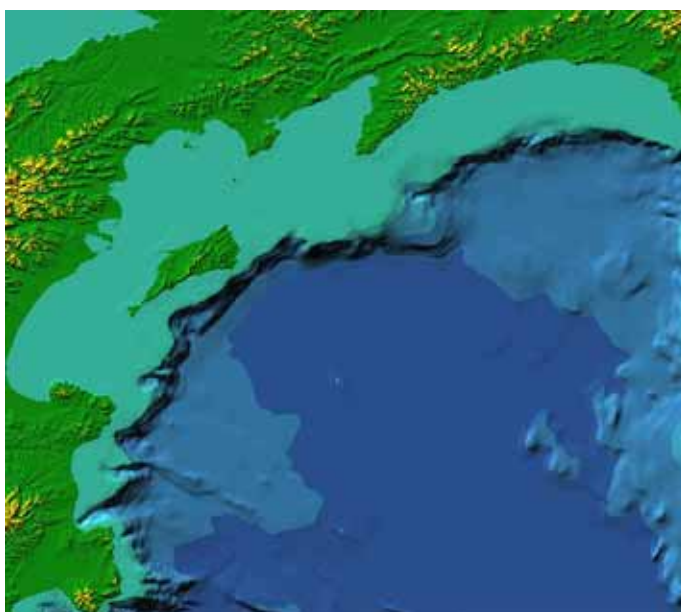


Рис. 6. Расположение прямоугольных областей (сегментов), в которых производился пересчет хаотически распределённых значений глубины на прямоугольную сетку

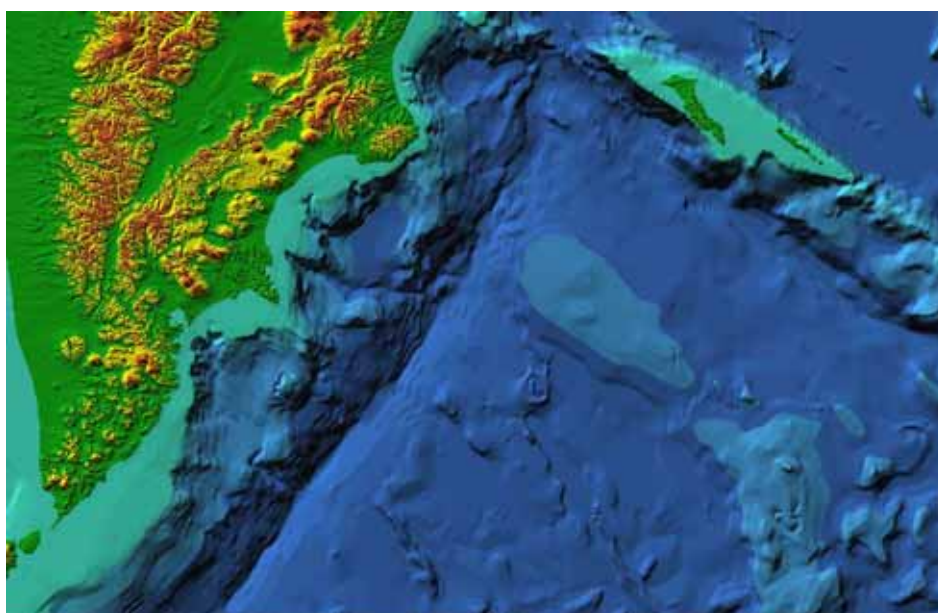
Предварительно в память компьютера были введены имевшиеся данные промеров глубины в каждой из этих областей, которые, в основном, были собраны во время многочисленных рейсов научно-исследовательского судна «Вулканолог». Часть данных была преобразована в изолинии глубин. Затем с помощью разработанного исполнителями оригинального алгоритма случайно распределённые данные промеров глубин пересчитывались в регулярный массив с пространственным шагом в 0,5 географической минуты (примерно 1 км) в каждой из четырёх областей. В результате были получены 4 массива значений глубин на сетках единой детальности, но различной размерности: (960x600), (1680x720), (1440x600), (1080x600).

Общая протяженность региона, покрываемого новой батиметрией, составляет 21 градус с севера на юг и 26 градусов с запада на восток.

Следующая серия рисунков (Рис. 7 – Рис. 10) представляет пространственные изображения рельефов дна во всех четырех областях, полученные с использованием созданной цифровой батиметрии с пространственным шагом 30 географических секунд. Здесь рельеф визуализируется в виде псевдо-трёхмерных изображений, а вектор подсветки направлен слева-сверху. Такой выбор позволяет чётко видеть все детали рельефа.



**Рис. 7. Рельеф дна области 1**



**Рис. 8. Рельеф дна области 2**

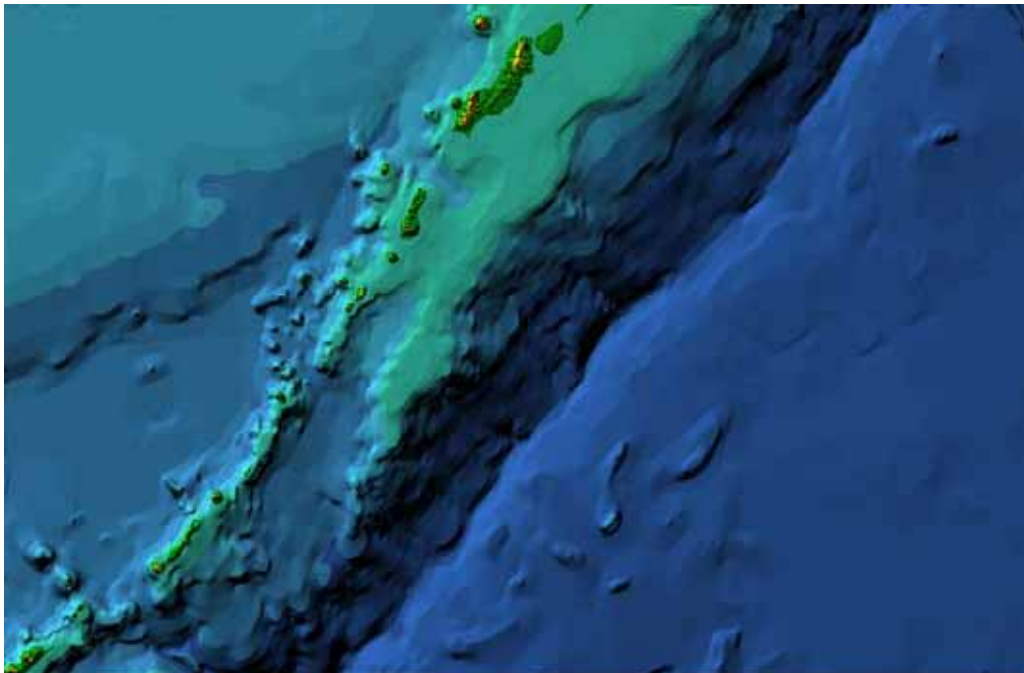


Рис. 9. Рельеф дна области 3 (Средние Курилы)

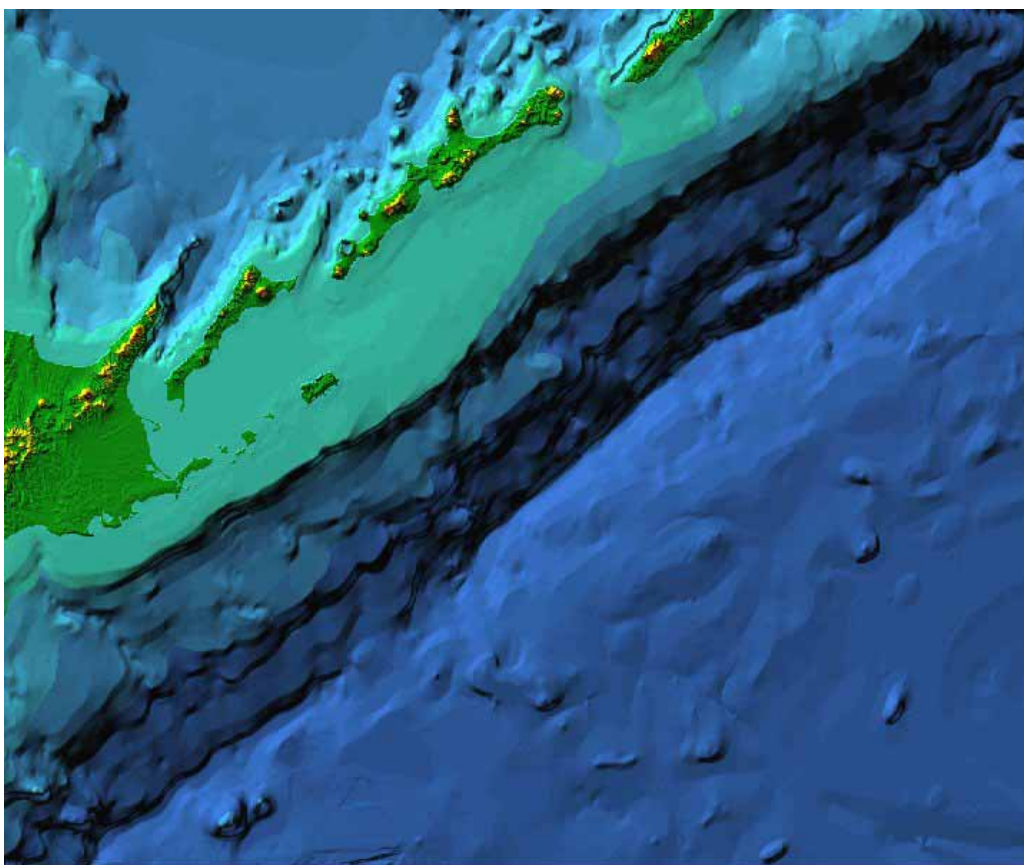


Рис. 10. Рельеф дна 4 (Южные Курилы)

Для оценки качества созданной батиметрии на рисунке (Рис. 11) приведены изображения рельефов одного и того же участка (область 2), полученных на основе данных из базы GEBCO, созданной с использованием линейной интерполяции значений глубин между имеющимися в базе изолиниями глубин (слева), и с использованием данных, рассчитанных исполнителями настоящего контракта (справа).

С целью сравнительного анализа созданной батиметрии с имеющимися на сегодняшний день аналогами создано несколько программ, объединённых пользовательским интерфейсом.

Функциональные характеристики этих программ и возможности пользовательского интерфейса будут рассмотрены в одном из последующих разделов.

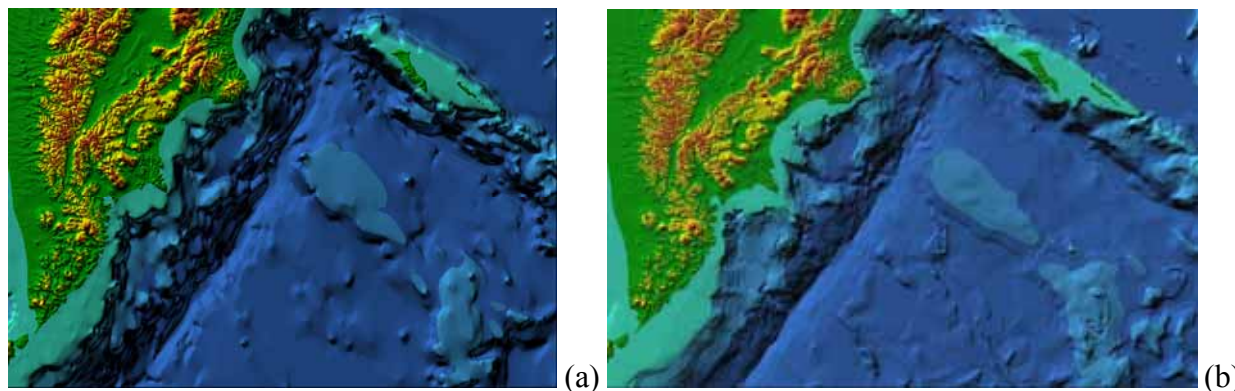


Рис. 11. Визуализация рельефа дна для фрагмента 2. (а) – с использованием данных из глобальной базы GEBCO-2003, (b) – с использованием рассчитанных исполнителями Контракта данных

## 10. Описание форматов данных

Созданные батиметрические данные представлены в виде восьми файлов: по 2 (бинарный и текстовый-ascii) для каждой из четырех областей, обозначенных на рисунке (Рис. 6).

### Файл 001.asc (3457200 байт)

Значения рельефа в форме целых чисел (знак плюс – выше уровня моря, минус – ниже)

Координаты левого верхнего угла: 62.00° С.Ш., 162.00° В.Д.

Число столбцов: 960

Число строк: 720

Величина шага по широте: 0.008333° (00°00'30")

Величина шага по долготе: 0.008333° (00°00'30")

Координаты правого нижнего угла: 56.0083° С.Ш., 169.99167° В.Д.

### Файл 1\_U3.bb (1152000 байт)

содержит те же данные, что и файл 001.asc, но в бинарном формате целых чисел (младший байт впереди).

### Файл 002.asc (7259040 байт)

Значения рельефа в форме целых чисел (знак плюс – выше уровня моря, минус – ниже)

Координаты левого верхнего угла: 56.00° С.Ш., 156.00° В.Д.

Число столбцов: 1680

Число строк: 720

Величина шага по широте: 0.008333° (00°00'30")

Величина шага по долготе: 0.008333° (00°00'30")

Координаты правого нижнего угла: 50.0083° С.Ш., 169.99167° В.Д.

### Файл 2\_U3.bb (2419200 байт)

содержит те же данные, что и файл 002.asc, но в бинарном формате целых чисел (младший байт впереди).

### Файл 003.asc (5185200 байт)

Значения рельефа в форме целых чисел (знак плюс - выше уровня моря, минус – ниже)

Координаты левого верхнего угла: 51.00° С.Ш., 150.00° В.Д.

Число столбцов: 1440

Число строк: 600

Величина шага по широте: 0.008333° (00°00'30")

Величина шага по долготе: 0.008333° (00°00'30")  
Координаты правого нижнего угла: 46.0083° С.Ш., 161.99167° В.Д.

**Файл 3\_U3.bb (1728000 байт)**

содержит те же данные, что и файл 003.asc, но в бинарном формате целых чисел (младший байт впереди).

**Файл 004.asc (3889200 байт)**

Значения рельефа в форме целых чисел (знак плюс – выше уровня моря, минус – ниже)

Координаты левого верхнего угла: 46.00° С.Ш., 144.00° В.Д.  
Число столбцов: 1080  
Число строк: 600  
Величина шага по широте: 0.008333° (00°00'30")  
Величина шага по долготе: 0.008333° (00°00'30")  
Координаты правого нижнего угла: 41.0083° С.Ш., 152.99167° В.Д.

**Файл 4\_U3.bb (1296000 байт)**

содержит те же данные, что и файл 004.asc, но в бинарном формате целых чисел (младший байт впереди).

## **11. Сравнение созданной цифровой батиметрии с другими сеточными данными**

На основе собранных за долгий период (более 100 лет) эхолокационных данных были созданы несколько глобальных батиметрических баз данных на регулярных сетках. Это, прежде всего, базы ЕТОРО-5, имеющая детальность 5 географических минут, и GEBCO-2003 (Рис. 12), где детальность составляет одну географическую минуту (порядка 2 км).

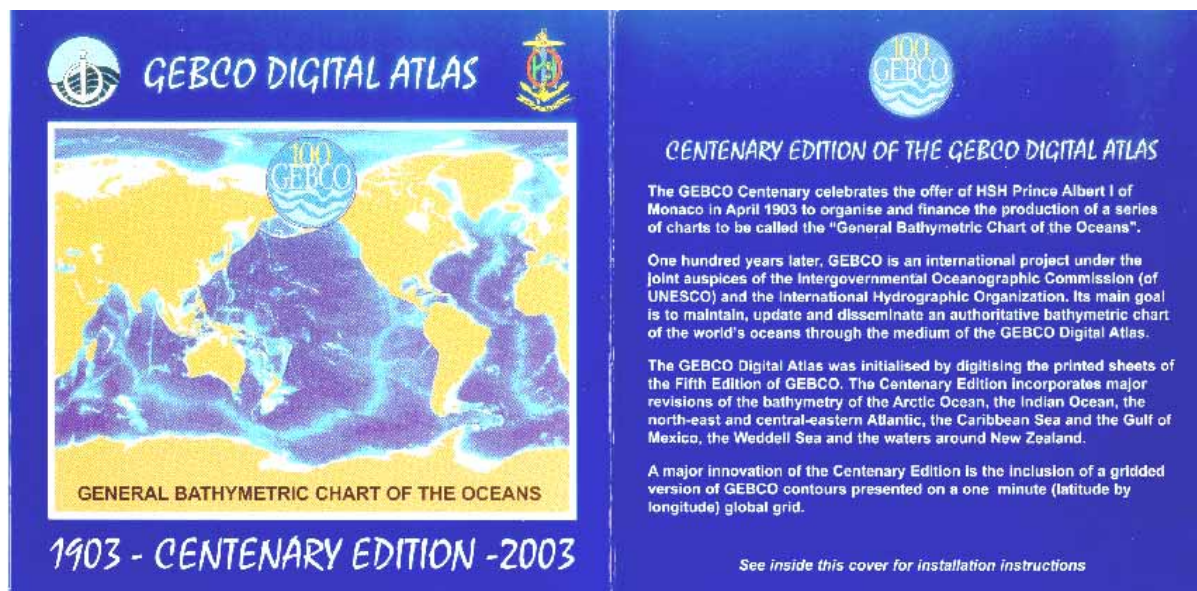


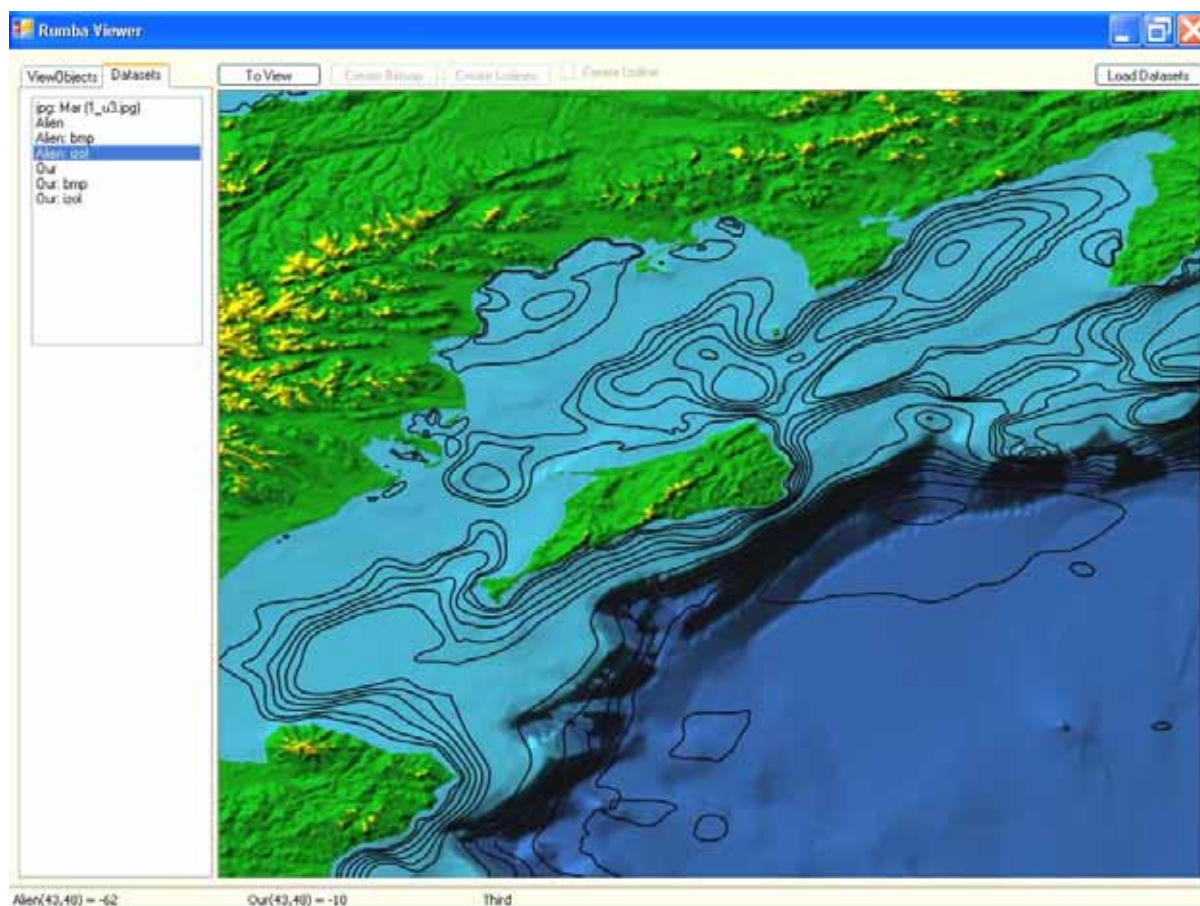
Рис. 12. Обложка CDROM с векторными и сеточными батиметрическими данными.

Есть ещё одна глобальная цифровая батиметрия на регулярной сетке, созданная Смитом и Сандвелом [7]. При её создании были использованы спутниковые измерения гравитационного поля Земли. Привязка данных к глубине океана происходила в тех узлах сетки, в окрестности которых имелись данные эхолокации. Эти данные изначально имели разрешение 2 географических минуты, но впоследствии путём интерполяции их детальность была улучшена до 0.5 географической минуты (примерно 1 км). Имеются ещё и региональные батиметрические базы (на регулярных сетках). В качестве примера можно упомянуть “NGDC Costal Relief Model”, со-



стоящую из прямоугольных массивов глубин на регулярной сетке детальностью 3 географических секунды (порядка 100 метров) и покрывающую прилегающие к США акватории.

Для сравнения рассчитанных исполнителями данных с уже существующими рассматривается один из созданных массивов глубин (содержащийся в файле 001.asc) и вырезанный из глобальной батиметрической базы Смита-Сандвелла массив, соответствующий этой же акватории. Изображения донного рельефа, построенные с использованием этих двух массивов глубин, представлены на рисунках (Рис. 13, Рис. 14). Для выявления существенных различий между двумя этими массивами изолинии глубины, соответствующие цифровой батиметрии Смита-Сандвелла, визуализированы на фоне созданной в рамках данного проекта батиметрии (Рис. 13). И наоборот, на рисунке (Рис. 14) изолинии, соответствующие рассчитанным исполнителями данным, нарисованы черным цветом на фоне батиметрических данных Смита-Сандвелла. При этом ближайšie к береговой линии изобаты соответствуют следующим значениям глубины: 50, 100, 200, 300, 400, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000 метров. Цветовая палитра меняет цвет со светло-голубого на темно-голубой, когда глубины превышают 500 м. Сразу бросается в глаза существенная разница глубин в шельфовой зоне. Вместо значений 50-100 м, что следует из данных эхолокации, Смит и Сандвелл дают значения до 850 м, что, естественно, может привести к неправильным результатам при численных расчётах распространения цунами.



**Рис. 13. Изолинии «по Смиуту-Сандвеллу» на фоне рельефа, построенного по данным, рассчитанным исполнителями**

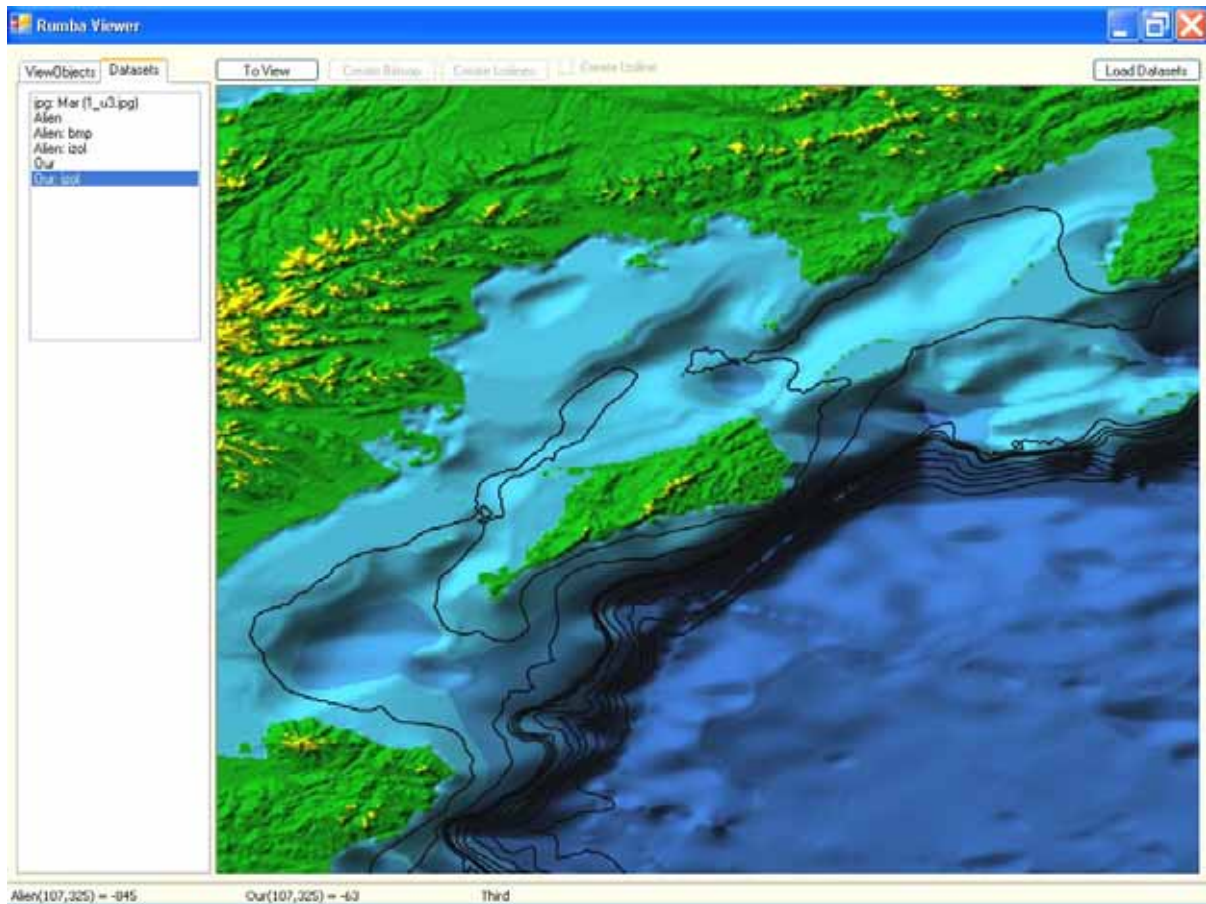


Рис. 14. Изолинии, рассчитанные исполнителями, на фоне рельефа, построенного «по Смит-Сандвеллу»

Для того чтобы понять, где и на сколько разнятся глубины, построен массив разностей между значениями глубины из обеих баз данных (рассчитанная исполнителями и Смита-Сандвелла). На рисунке (Рис. 15) этот массив визуализирован вместе с изолиниями.

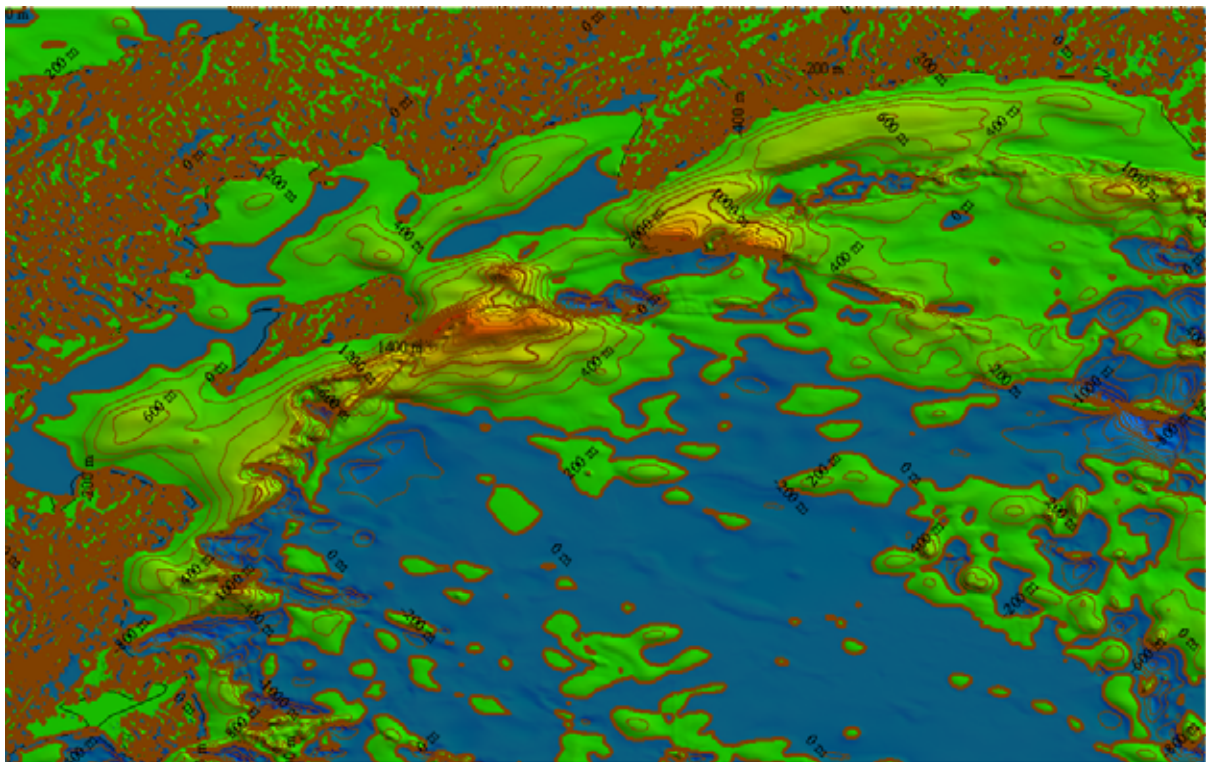
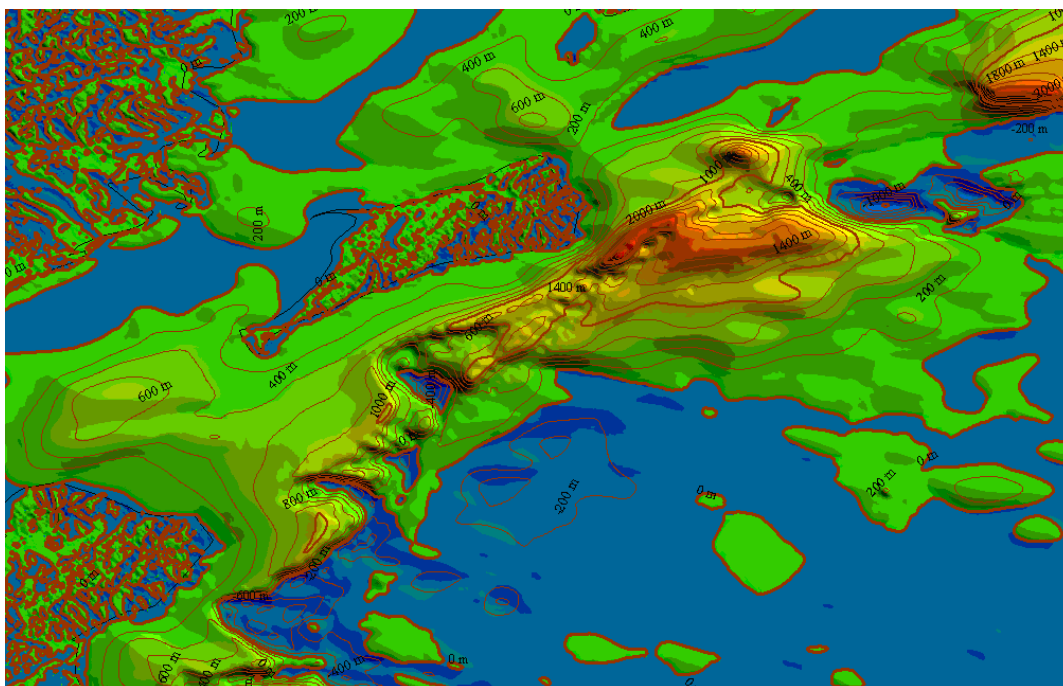


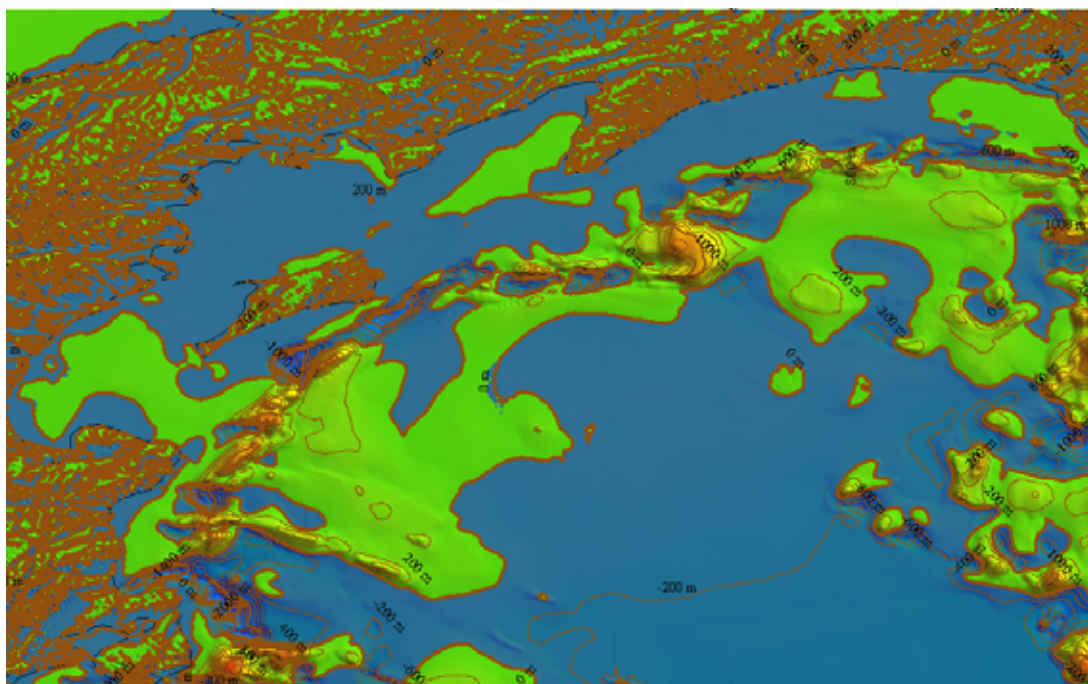
Рис. 15. Иллюстрация различий между рельефом, рассчитанным исполнителями, и рельефом «по Смит-Сандвеллу»

Видно, что в районе самой котловины, где глубины большие, разница не так велика. Но в зоне шельфа и на его крае значения сильно различаются. На рисунке (Рис. 16) этот район показан более подробно. Данные Смита-Сандвелла дают в основном завышенные глубины.

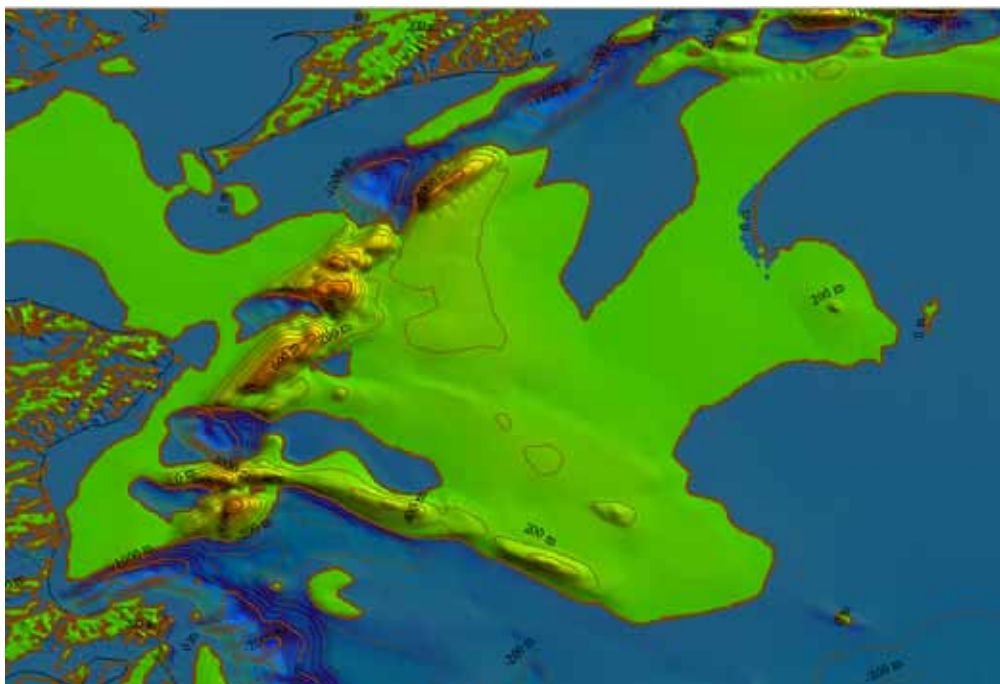


**Рис. 16. Фрагмент наиболее значительных различий**

Аналогичное сравнение может быть проведено между рассчитанными исполнителями данными для этой же области и данными GEBCO-2003. Ввиду того, что данные GEBCO имеют в два раза меньшее разрешение (1 минута), их пришлось интерполировать на сетку с шагом 30 секунд. Также был построен массив разностей между сравниваемыми данными в каждом узле сетки. Целиком массив разностей показан на рисунке (Рис. 17).

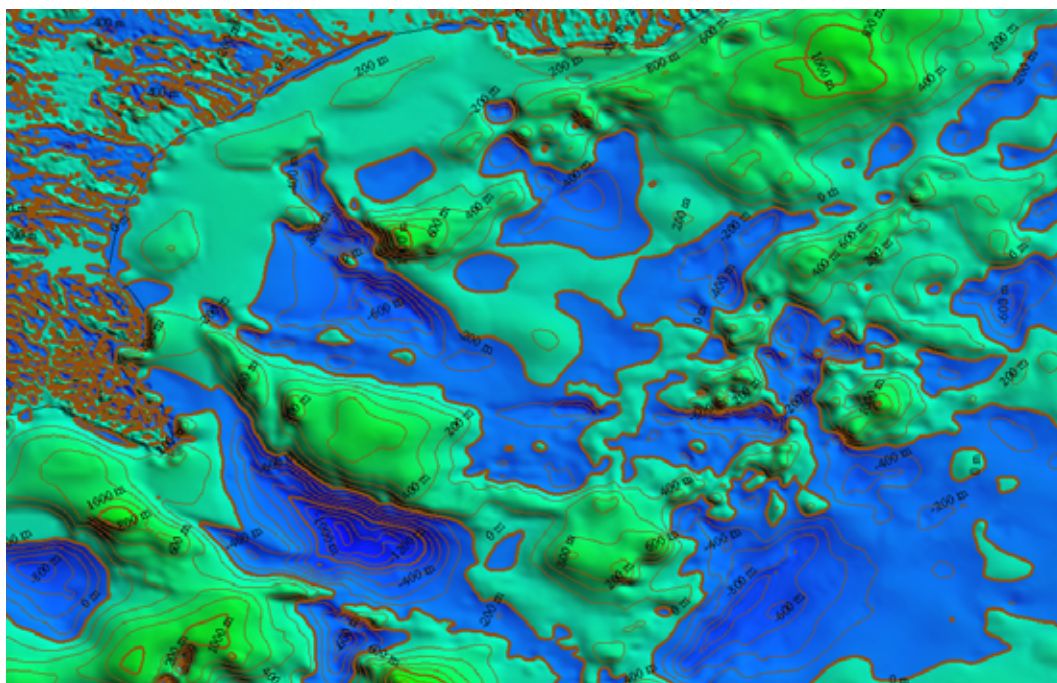


**Рис. 17. Различия между рассчитанной исполнителями батиметрией и данными GEBCO-2003 в области 1**



**Рис. 18. Увеличенное изображение различий между рассчитанной исполнителями батиметрией и данными GEBCO-2003 в области 1**

Изображение показывает, что сильнее всего данные разнятся вблизи границы шельфовой зоны. Эта разница в некоторых местах варьируется от -2000 м до +1600 м. Такое несоответствие объясняется неточным положением границы шельфа, что произошло из-за недостаточного количества и качества эхолокационных данных для этого закрытого для международного судоходства региона. Массивы разностей для некоторых участков оставшихся трёх областей (002, 003, 004) показаны на рисунках (Рис. 19 – Рис. 21).



**Рис. 19. Разница в значениях глубины между рассчитанными исполнителями данными и данными «по Смит-Сандвеллу» у побережья Камчатки (область 2)**

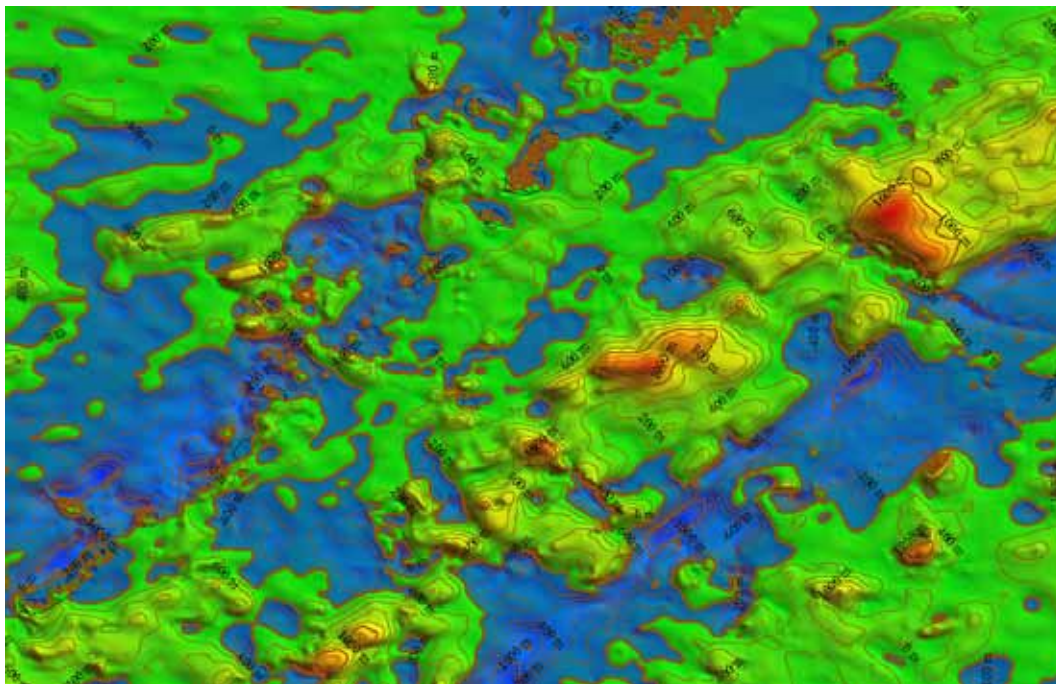


Рис. 20. Разница в значениях глубины между рассчитанными исполнителями данными и данными «по Смигу-Сандвеллу» в районе Северных Курил (область 3)

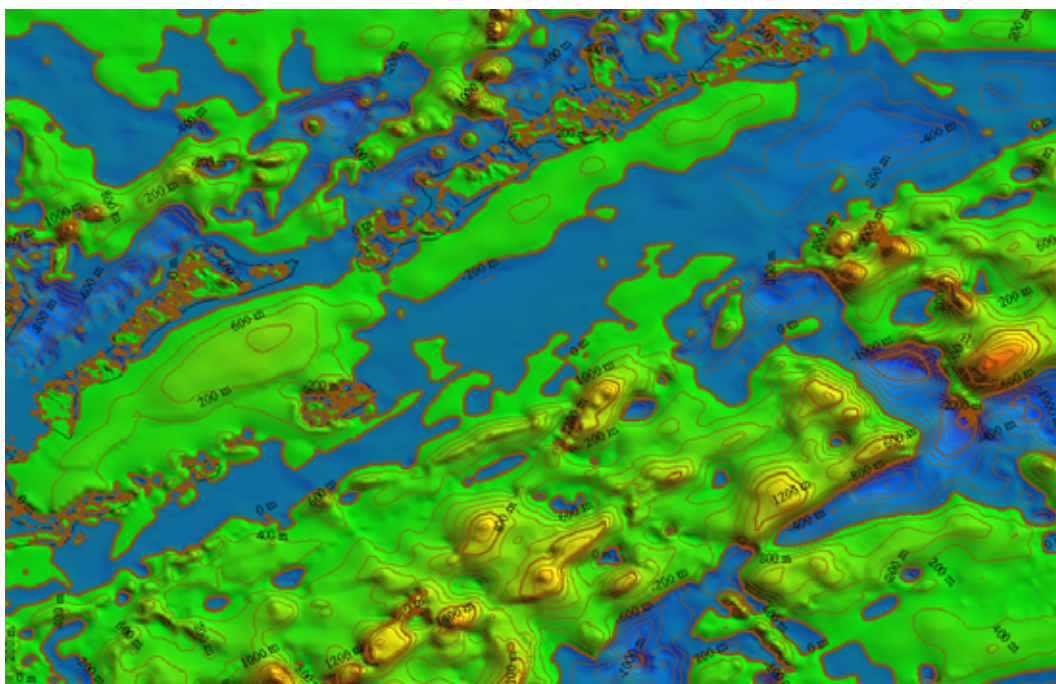


Рис. 21. Разница в значениях глубины между рассчитанными исполнителями данными и данными «по Смигу-Сандвеллу» в районе Южных Курильских островов (область 4)

Приведённые рисунки позволяют сделать вывод о наличии значительных погрешностей (местами превышающих две тысячи метров в ту и в другую стороны) в цифровых данных Смита-Сандвелла и GEBCO-2003. Это можно объяснить недостатком реальных измерений глубины в исследуемом регионе у разработчиков соответствующих батиметрических баз данных.

## **12. Инструкция пользователю демонстрационной программы BathViewer**

Передаваемая Заказчику демонстрационная программа предназначена для создания цифровой батиметрии на регулярной сетке для участка акватории вблизи побережья Камчатки с использованием хаотически распределённых данных промеров глубин.

## 12.1. Системные требования

Операционная система Windows XP с установленной Windows Net Framework 2.0. Оперативная память не менее 500 Мб.

## 12.2. Порядок работы

Файлы с демонстрационной программой надо установить в директорию BathData на диске C: (C:\BathData\). В противном случае потребуется изменить прописанный в файле Demo.xml путь к рабочей директории.

Запуск демонстрационной программы осуществляется открытием файла BathViewer.exe. В результате откроется окно интерфейса. Нажатием кнопки <Load Datasets> открывается рабочая папка, откуда выбирается XML файл. В данном случае файл Demo.xml. В левом окне появляется список рабочих файлов: LandKAM2 (массив рельефа суши детальностью 30 сек), Old Result (обзорная растровая картинка с построенным ранее рельефом), TracksKAM2 (точечные данные о промерах глубины).

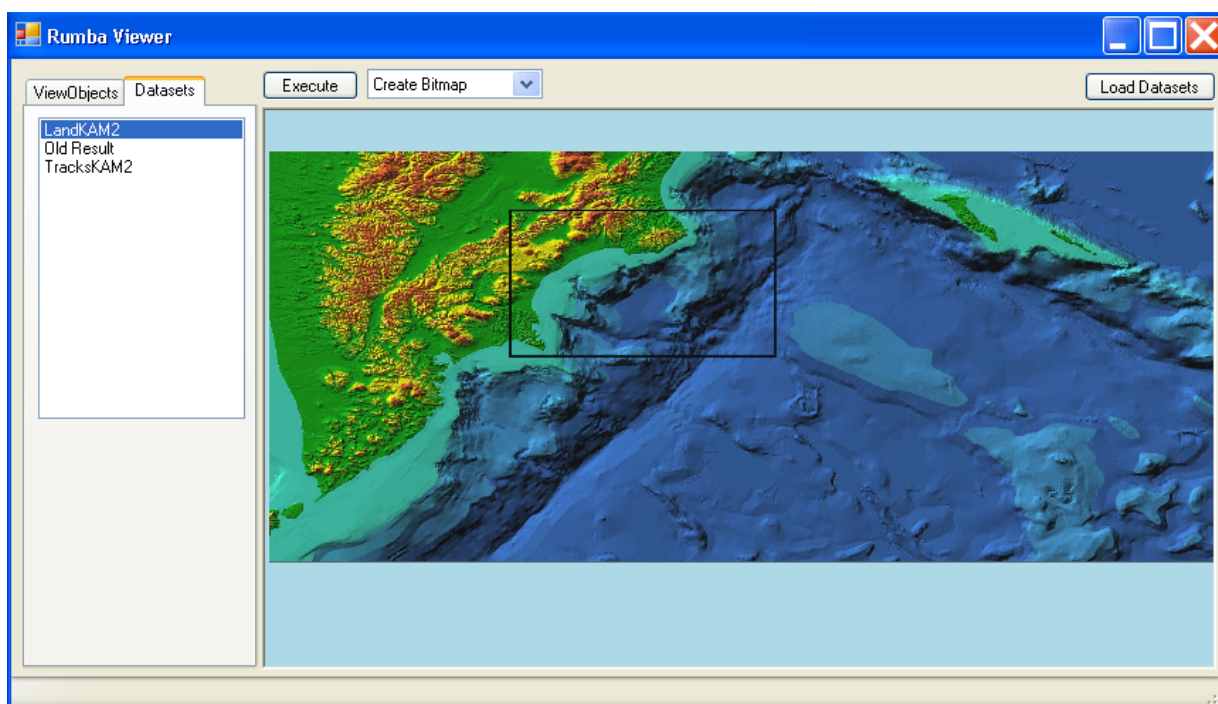


Рис. 22.

Сеточные и точечные данные могут быть визуализированы с помощью меню <Create Bitmap><Execute>, либо <ToView><Execute> с опциями выбора визуализации. В частности, таким способом можно посмотреть пространственное распределение промеров глубины в этой области.

В ходе дальнейшей работы можно убирать с экрана визуализацию некоторых объектов с помощью меню <View Objects> путём постановки или снятия галочки в соответствующем месте. Зуммирование картинок производится вращением колеса скроллинга на мыши.

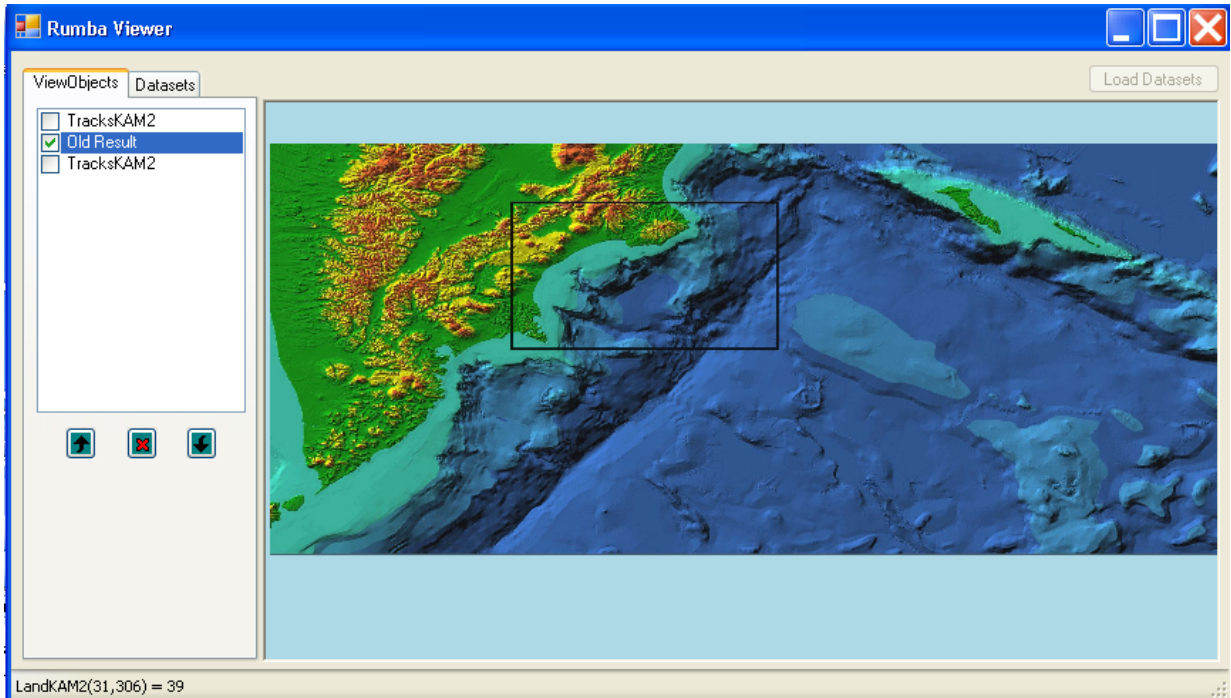


Рис. 23.

Для создания массива цифровой батиметрии на регулярной сетке надо в окне <Data-sets> выбрать объект TracksKAM2. Затем в окошке рядом с кнопкой <Execute> выбрать <Spline Interpolation>.

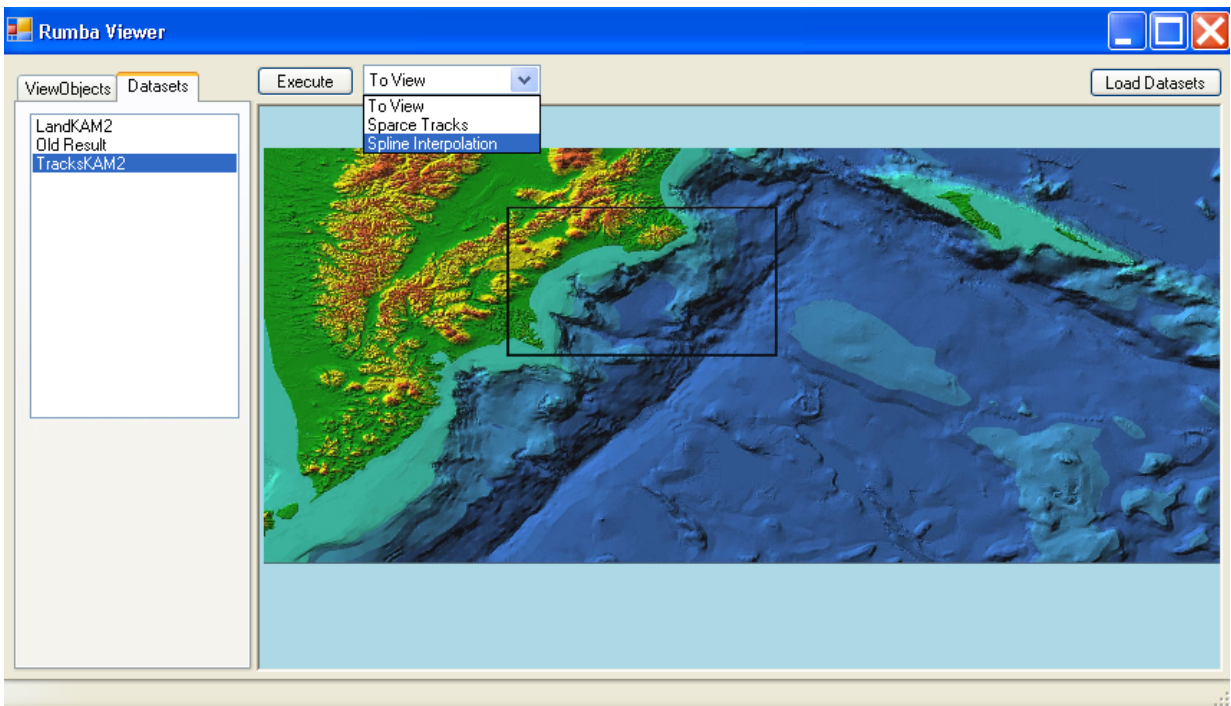


Рис. 24.

В появившемся рядом окошке выбираем требуемую детальность создаваемой сеточной батиметрии (шаг сетки). Выберем, например, 00°02'00" (2 географических минуты).

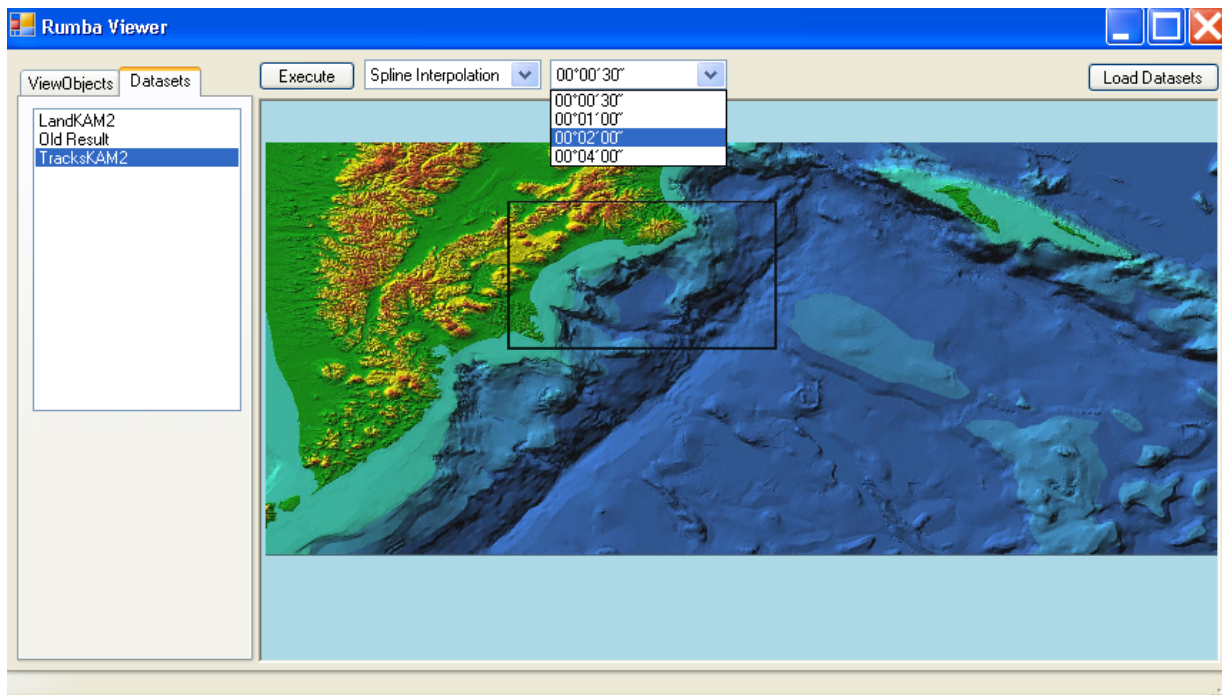


Рис. 25.

После выбора шага нажимаем кнопку <Execute>, которая и запускает программу пересчёта значений глубины с хаотической на регулярную прямоугольную сетку. Через несколько секунд (для шага сетки в 30 секунд это может занять пару минут) созданная сеточная батиметрия будет визуализирована на фоне изображения, бывшего до этого в окне визуализации. В верхней строке списка загруженных объектов появится название созданных сеточных данных: **TracksKAM2:bin** и их визуализация **TracksKAM2:bin:bmp**. Зуммирование, как обычно, производится поворотом колёсика для скроллинга на мыши.

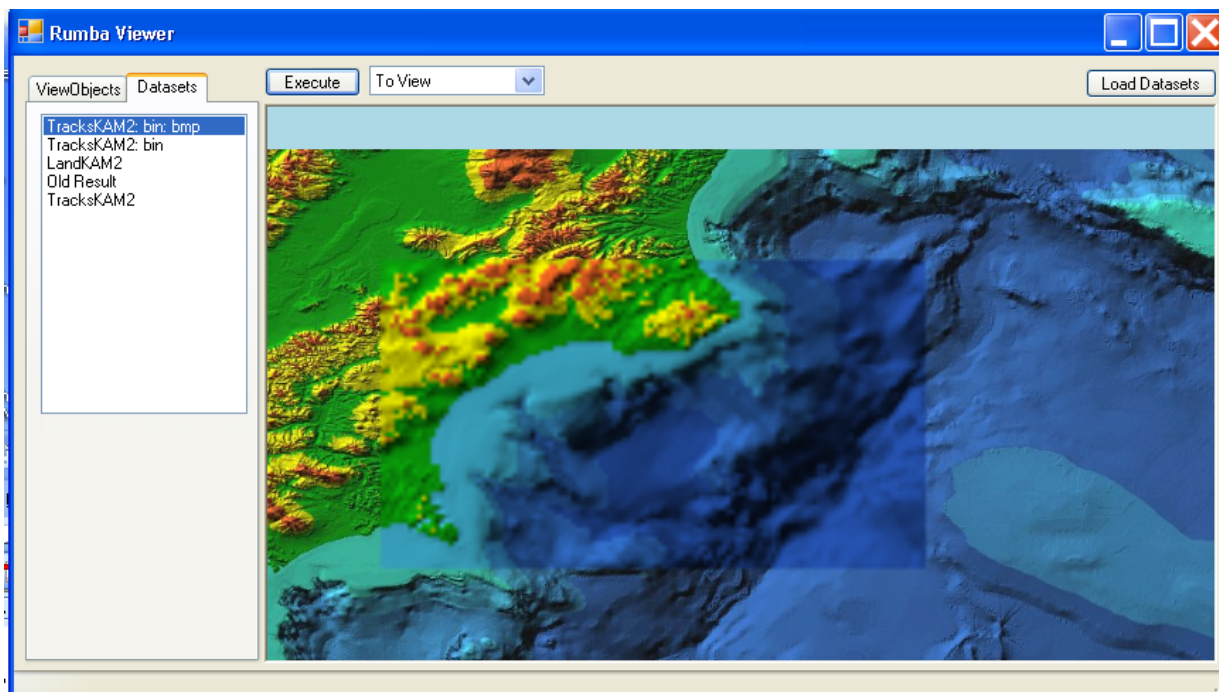


Рис. 26.

Двигая курсор по картинке, можно видеть сеточные значения глубины, которые высвечиваются в информационном окне в нижней части графического интерфейса.



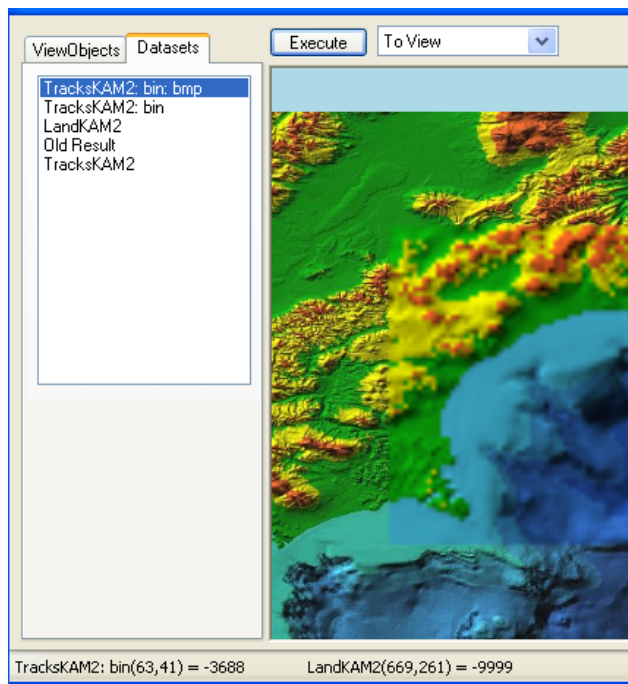


Рис. 27.

При желании пользователь может создать сеточные батиметрические данные с другим шагом сетки. Можно также создать батиметрию на регулярной сетке, предварительно проредив данные промеров глубины <Sparse Tracks>.

Для оценки качества созданных данных можно визуализировать сразу все изолинии глубины в соответствии со списком.

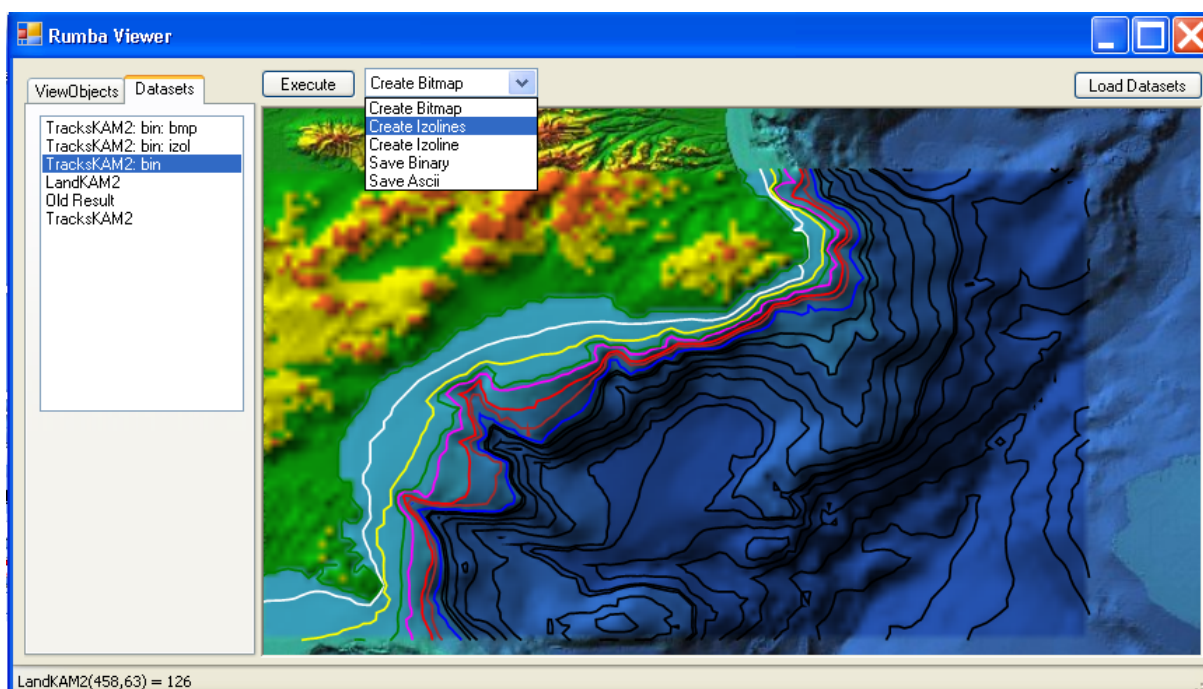


Рис. 28.

Можно нарисовать заданным цветом какую-либо одну изолинию из списка соответствующих глубин, который открывается для выбора.

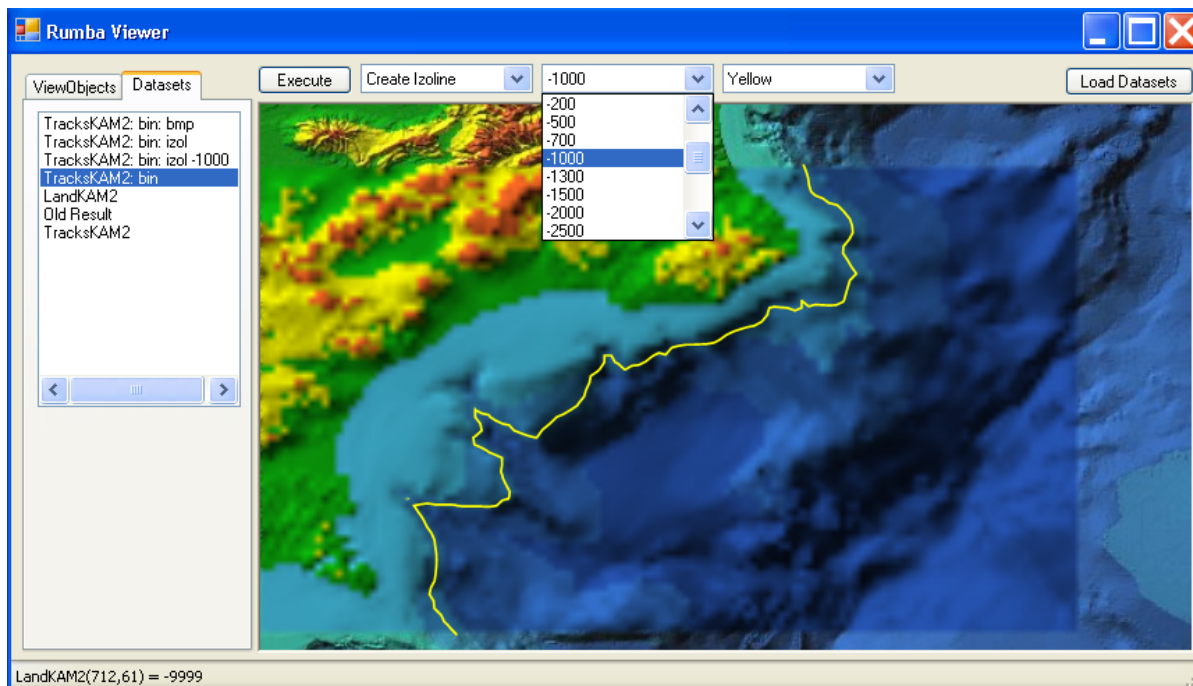


Рис. 29.

В конце концов, если качество созданной сеточной батиметрии устраивает пользователя, то нажатием кнопки рабочего меню <Save Ascii><Execute> созданный цифровой массив сохранится в Текстовом формате (файл KAM2\_TRK.dat.asc) в папку C:\BathData\Demo.

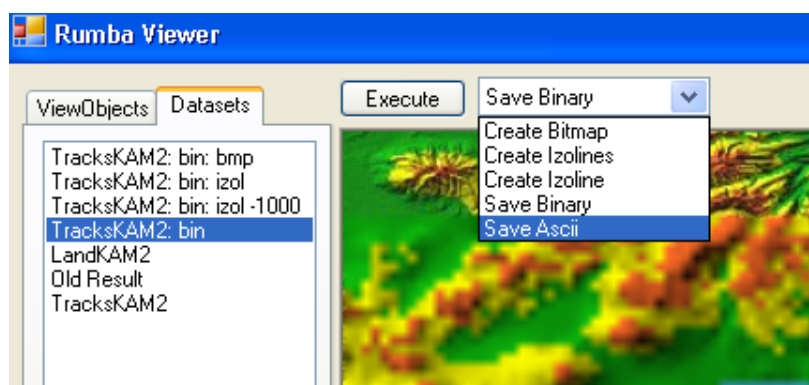


Рис. 30.

В заголовке файла будет указана его размерность (количество столбцов и строк). Если для дальнейшей работы требуется файл в бинарном виде (целые двухбайтовые числа), то данные могут быть сохранены и в бинарном виде <Save Binary><Execute>. Это будет файл KAM2\_TRK.dat.bb. Однако, в этом случае размерность файла можно узнать только из файла в формате Ascii.

Как обычно, выход из программы осуществляется закрытием окна интерфейса.

### 13. Содержимое папки BathData

Тип	размер	Имя
Файл	90 112	BathViewer.exe
Файл	419	Demo.xml
Папка		Demo
Файл	322 834	Demo_Area.jpg
Файл	1 030 059	kam.jpg
Файл	2 419 200	kam2.bb
Файл	2 419 200	KAM2_LND.DAT
Файл	1 989 180	KAM2_TRK.DAT

## **14. 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.
4. Bezhaev A.Yu., Vasilenko V.A. Variational Theory of Splines. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001, 280 pp.
5. Bezhaev A.Yu. Spline interpolation of huge multivariate data. Сибирский журнал вычислительной математики. РАН, Сиб. отд., Новосибирск, 2003, Т. 6, № 3. с.249-261.
6. Бежаев А.Ю., Марчук А.Г. Метод создания цифровых массивов глубин океана на регулярных сетках. Труды Международной конференции Математические Методы в Геофизике. ММГ-2003, Новосибирск 2003., ИВМиМГ (ВЦ) СО РАН, г. Новосибирск, 2003, ч.2, с.561-567.
7. J.J. Becker, D.T. Sandwell, W.H.F. Smith, J. Braud, B. Binder, J. Depner, D. Fabre, J. Factor, S. Ingalls, S.-H. Kim, R. Ladner, K. Marks, S. Nelson, A. Pharaoh, G. Sharman, R. Trimmer, J. VonRosenburg, G. Wallace, P. Weatherall, Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30\_PLUS, ([http://topex.ucsd.edu/WWW\\_html/srtm30\\_plus.html](http://topex.ucsd.edu/WWW_html/srtm30_plus.html)) Marine Geodesy, In Press, 2009.

## **15. Современная зарубежная библиография по теме работы**

- Baudry, N. and Calmant, S., 1991. 3-D Modeling of Seamount Topography from Satellite Altimetry. *Geophysical Research Letters*, 18(6): 1143-1146.
- Becker, J., 2008. Satellite Geodesy, IGPP, SIO, UCSD | Global Topography | SRTM30, Multi-beam, & Predicted.
- J.J. Becker, D.T. Sandwell, W.H.F. Smith, J. Braud, B. Binder, J. Depner, D. Fabre, J. Factor, S. Ingalls, S.-H. Kim, R. Ladner, K. Marks, S. Nelson, A. Pharaoh, G. Sharman, R. Trimmer, J. Von-Rosenburg, G. Wallace, P. Weatherall, Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30\_PLUS, ([http://topex.ucsd.edu/WWW\\_html/srtm30\\_plus.html](http://topex.ucsd.edu/WWW_html/srtm30_plus.html)) Marine Geodesy, In Press, 2009.
- Brown, J. et al., 1998. *The Ocean Basins: Their Structure and Evolution*. The Open University. Pergamon Press, Oxford, 171 pp.
- Carron, M.J., Vogt, P.R. and Jung, W.-Y., 2001. A proposed international long-term project to systematically map the world's ocean floors from beach to trench: GOMaP (Global Ocean Mapping Program). *Inter. Hydr. Rev.*, 2(3): 49-50.
- Cazenave, A. et al., 1996. High-resolution mean sea surface computed with altimeter data of ERS-1 (geodetic mission) and Topex-Poseidon. *Geophysical Journal International*, 125(3): 696-704.
- CCOM, 2008. Law of the Sea : Center for Coastal and Ocean Mapping/Joint Hydrographic Center - CCOM/JHC : Law of the Sea Data, UNCLOS, Article 76, extended continental shelf, foot of the slope, multibeam bathymetry, seafloor mapping, University of New Hampshire, UNH.
- DiMarzio, J.P. et al., 2007. GLAS/ICESat 500 m Laser Altimetry Digital Elevation Model of Antarctica. National Snow and Ice Data Center (NSIDC).
- Dixon, T.H., Naraghi, M., McNutt, M.K. and Smith, S.M., 1983. Bathymetric prediction from Seasat altimeter data. *J. Geophys. Res.*, 88: 1563-1571.
- Fairhead, J.D., Green, C.M. and Odegard, M.E., 2001. Satellite-derived gravity having an impact on marine exploration, *The Leading Edge*, pp. 873-876.
- Farr, T.G. et al., 2007. The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45(RG2004).
- GEBCO, 2008. General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) Hom., [http://www.bodc.ac.uk/data/online\\_delivery/gebco/](http://www.bodc.ac.uk/data/online_delivery/gebco/)
- Jakobsson, M., R. Macnab, L. Mayer, R. Anderson, M. Edwards, J. Hatzky, H. W. Schenke, and P. Johnson (2008), An improved bathymetric portrayal of the Arctic Ocean: Implications for ocean modeling and geological, geophysical and oceanographic analyses, *Geophysical Research Letters*, DOI: doi: 10.1029/2008gl033520
- JAMSTEC, 2008. JAMSTEC Data Site for Research Cruises, <http://www.jamstec.go.jp/cruisedata/e>
- Jung, W.Y. and Vogt, P.R., 1992. Predicting bathymetry from Geosat-ERM and shipborne profiles in the South Atlantic ocean. *Tectonophysics*, 210: 235-253.
- Koslow, J.A., 1997. Seamounts and the ecology of deep-sea fisheries. *American Scientist*, 85(2): 168-176.
- Kunze, E. and Llewellyn Smith, S.G., 2004. The Role of Small-Scale Topography in Turbulent Mixing of the Global Ocean. *OCEANOGRAPHY*, 17(1): 55.
- Marks, K. M. and W. H. F. Smith, 2009, An uncertainty model for deep ocean single beam and multibeam echo sounder data, *Mar. Geophys. Res.*, doi 10.1007/s11001-008-9060-y.
- Marine Geoscience Data System, 2008. DMS:Ridge Bathymetry.
- MathWorks, T., 2007. MATLAB. The MathWorks, Natick, MA.
- Medea, 1995. Scientific Utility of Naval Environmental Data. MEDEA Office, McClean Virginia, 52 pp.
- Miller, S.P., 2008. SIOExplorer. <http://nsdl.sdsc.edu/>
- Mofjeld, H.O., Massell-Symons, C., Lonsdale, P., Gonzalez, F.I. and Titov, V.V., 2004. Tsunami scattering and earthquake faults in the deep Pacific Ocean. *Oceanography*, 17(1): 38-46.

- Muller, R.D., Roest, W.R., Royer, J.Y., Gahagan, L.M. and Slater, J.G., 1997. Digital isochrons of the world's ocean floor. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 102(B2): 3211-3214.
- Munk, W. and Wunsch, C., 1998. Abyssal recipes II: energetics of tidal and wind mixing. *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers*, 45(12): 1977-2010.
- NGDC, 2006. GEODAS Search Criteria Selection. NOAA NGDC. <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/geodas/geodas.html>
- Ramillien, G. and Cazenave, A., 1997. Global bathymetry derived from altimeter data of the ERS-1 Geodetic Mission. *Journal of Geodynamics*, 23(2): 129-149.
- Rosen, P.A., S. Hensley, I.R. Joughin, F.K. Li, S.N. Madsen, E. Rodriguez, R.M. Goldstein, 2000, Synthetic aperture radar interferometry, *Proc. IEEE*, v. 88, p. 333-382.
- Sandwell, D. and Smith, W.H.F., 2001. Bathymetric estimation. In: L.-L. Fu and A. Cazenave (Editors), *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications*. Academic Press, San Diego, pp. 441-457.
- Sandwell, D.T. and Smith, W.H.F., 1997. Marine gravity anomaly from Geosat and ERS 1 satellite altimetry. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 102(B5): 10039-10054.
- Sandwell, D.T. and Smith, W.H.F., 2008. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate. Manuscript in preparation.
- Smith, W.H.F., 1993. On the Accuracy of Digital Bathymetric Data. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 98(B6): 9591-9603.
- Smith, W.H.F., 1998. Seafloor Tectonic Fabric From Satellite Altimetry. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26(1): 697-747.
- Smith, W.H.F. and Sandwell, D.T., 1994. Bathymetric Prediction from Dense Satellite Altimetry and Sparse Shipboard Bathymetry. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 99(B11): 21803-21824.
- Smith, W.H.F. and Sandwell, D.T., 1997. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, 277(5334): 1956-1962.
- Smith, W.H.F. and Sandwell, D.T., 2008. Global Bathymetry at 1 Minute Resolution from Satellite Gravity and ship Soundings, Manuscript in preparation.
- Smith, W. H. F., and P. Wessel (1990), Gridding with continuous curvature splines in tension, *Geophysics*, 55(3), 293-305.
- Tapley, B.D. and Kim, M.C., 2001. Applications to Geodesy. In: b.L.-L.F.a.A. Cazenave (Editor), *Satellite Altimetry and Earth Sciences*. Academic Press, New York, pp. 371-403.
- USGS, 1997. USGS (U.S. Geological Survey) EROS, Sioux Falls, SD USGS.
- Wessel, P. and Chandler, M.T., 2007. The mgd77 supplement to the generic mapping tools. *Computers & Geosciences*, 33(1): 62-75.
- Wessel, P. and Smith, W.H.F., 1995. New Version of the Generic Mapping Tools Released, *EOS. AGU*, pp. 329.
- Wessel, P. and Smith, W.H.F., 1998. New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS. AGU*, pp. 579.