

Метод создания цифровых массивов глубин океана на регулярных сетках

Марчук, Ан.Г.; Бежаев, А.Ю
mag@omzg.sccc.ru

Институт Вычислительной Математики и Математической Геофизики СО РАН,
г.Новосибирск, Россия

В работе предлагаются алгоритмы для построения детальной цифровой батиметрии на регулярных сетках, используя данные эхолотации и другие данные. Возможности предлагаемой методики демонстрируются на примерах создания массива глубин в нескольких районах Тихого океана. Для вычисления значения глубины в каждой точке регулярного массива глубин алгоритм использует до 9 значений глубины из исходного набора данных. Эти точки выбираются по двум критериям: точки должны располагаться в разных секторах (по 45°) прямоугольной декартовой системы координат и быть ближайшими к рассматриваемой узловой точке из всех дочек в данном секторе. Затем с помощью сплайн-интерполяции находится значение глубины в узловой точке. Аналогично может быть использована линейная интерполяция. С помощью данного метода создана цифровая батиметрия Курило-Камчатского региона на регулярной прямоугольной сетке с детальностью 1 и 0.5 минут. Она состоит из четырех прямоугольных массивов глубин, покрывающих двухсоткилометровую зону вокруг Курильских островов и Камчатки от 41.00 до 61.00 градусов северной широты.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для исследования стихийных бедствий в океане широко используется численное моделирование. Для такого моделирования (в частности, расчета распространения волн цунами) требуется цифровая батиметрия на регулярных сетках. Сейчас пользователю доступны лишь данные с детальностью не лучше, чем 5 географических минут. Таким образом, для численного моделирования региональных и локальных цунами необходимо создать детальную цифровую батиметрию для исследуемого региона.

ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ СОЗДАНИЯ БАТИМЕТРИИ НА РЕГУЛЯРНЫХ СЕТКАХ

Сначала определим, какого рода исходная информация о глубинах может быть использована для создания цифровой батиметрии на регулярных сетках. 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” [1] и “Hydrographic Survey Data” [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" [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.

ПЕРЕСЧЕТ ХАОТИЧЕСКОГО НАБОРА ПРОМЕРОВ ГЛУБИН В РЕГУЛЯРНЫЙ МАССИВ

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 эхолокации "Marine Trackline Data" все точки с промерами, расположенные в данной области. 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 пересчитывает 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.

Другой алгоритм основан на интерполяции более сложного типа с использованием радиальных функций. 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 8 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. 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 $f(R)$. Тогда линейная комбинация

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

представляет 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):

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

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.

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА

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 серых точек. Из рисунка видно, что плотность этих данных значительно выше вблизи берега, в сравнении с удаленной от берега акваторией.

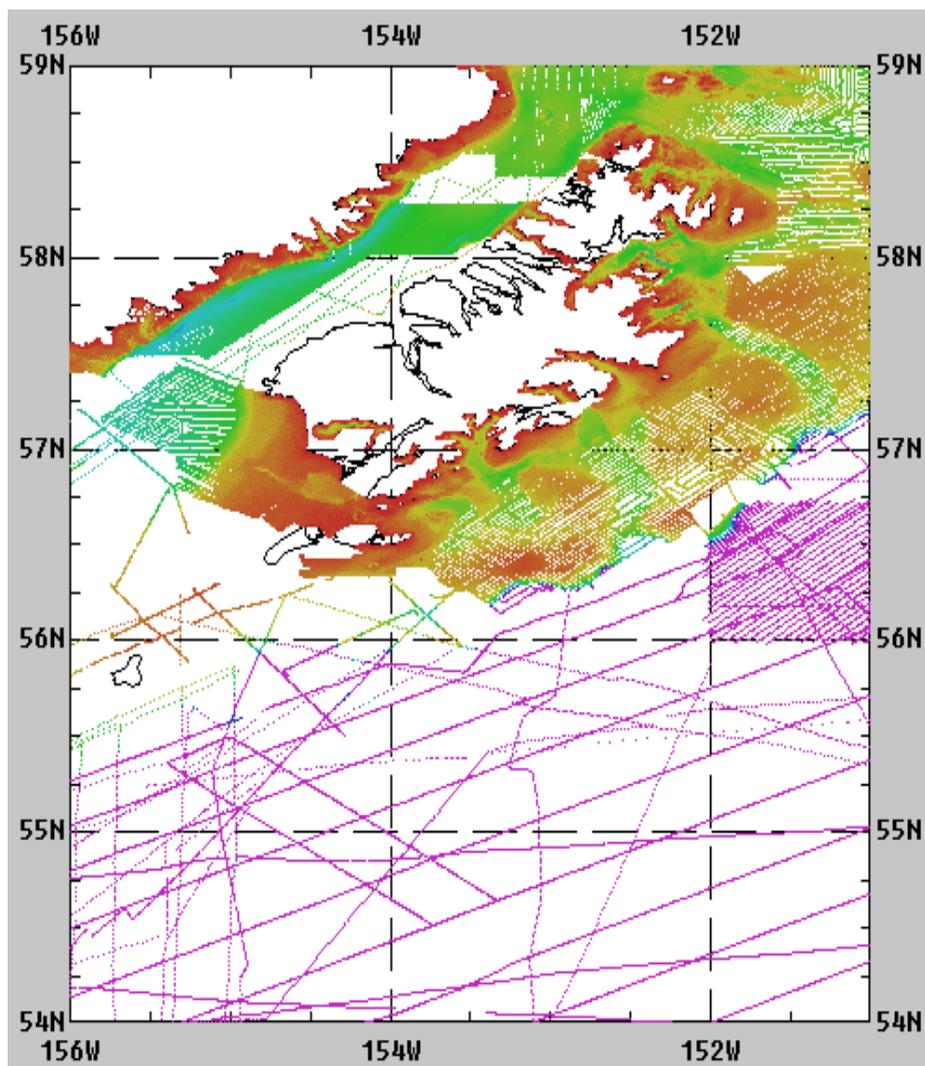


Рис. 1. Расположение данных эхолотации из базы данных Marine Trackline Data вокруг острова Кодиак в северной части Тихого океана

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).

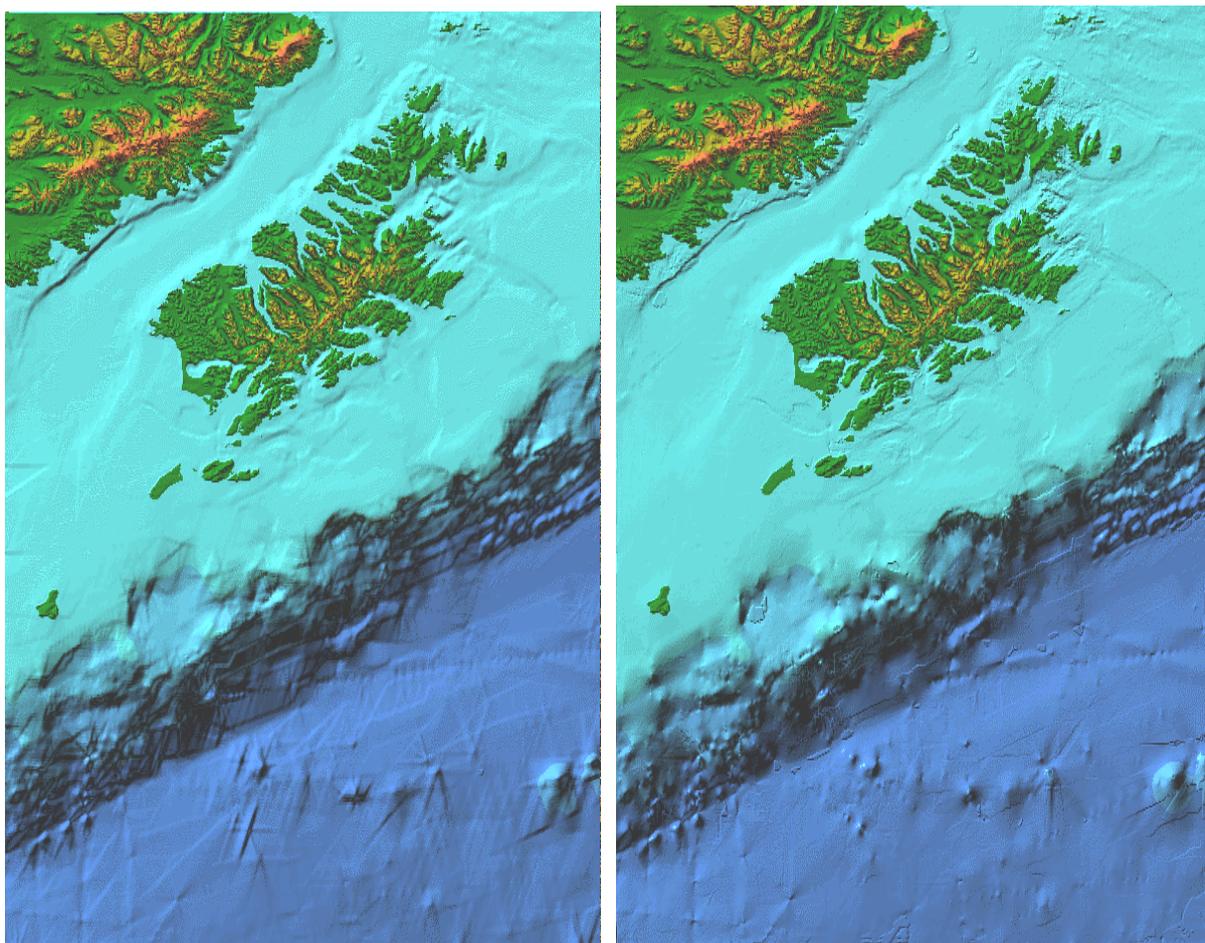


Рис. 2. Псевдо-трехмерные изображения массивов глубин, которые были созданы, используя линейную интерполяцию (слева) и сплайн-интерполяцию (справа)

Для некоторых регионов, где хотелось бы провести численное моделирование распространения цунами цифровой информации о глубинах явно недостаточно для создания регулярных массивов глубин требуемой детальности. В этом случае можно использовать бумажные батиметрические карты, информацию с которых можно ввести в компьютер с помощью интерактивной системы, разработанной автором [4]. В частности, информация о глубинах в Курило-Камчатском регионе в вышеупомянутых базах данных очень скудна, поэтому в Институте Вулканологии ДВО РАН на основе эхо-данных с многочисленных рейсов судов были созданы 4 детальные батиметрические карты, охватывающие акватории вокруг Камчатки и Курильских островов. Расположение районов, изображенных на этих картах, показано пронумерованными прямоугольниками на рисунке 3. Для сравнения на рисунке 4 приведены изолинии глубины из базы данных GEBCO и фрагмент батиметрической карты для района под номером 2. Использование информации о глубинах с этих батиметрических карт дало возможность создать цифровую батиметрию на регулярных сетках. К настоящему времени с помощью «линейного» алгоритма созданы массивы глубин детальностью в 1 географическую минуту для всех четырех областей (Рис. 4), а с помощью сплайн-метода создана цифровая батиметрия на регулярной 0.5 минутной сетке в областях 2 и 3 (см. рис. 4). Сравнение построенной батиметрии с другими имеющимися данными (5-мин ETOPO5, 2-мин Sandwell's [5]) приведено на Веб-странице лаборатории цунами Института Вычислительной Математики и Математической геофизики СО РАН (<http://omzg.sccc.ru/tsulab/> в пункте “Kuril-

Kamchatka Bathymetry Project”). Для примера на рисунке 5 изображен рельеф дна для области 3.

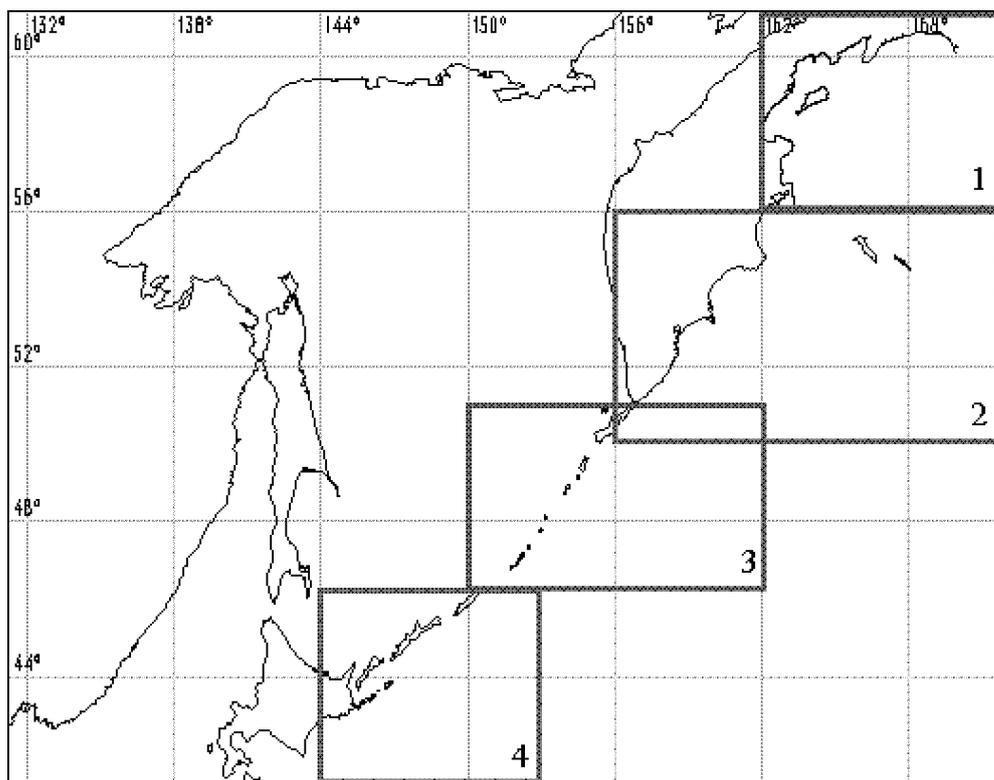


Рис.3. Расположение областей, для которых изготовлены батиметрические карты

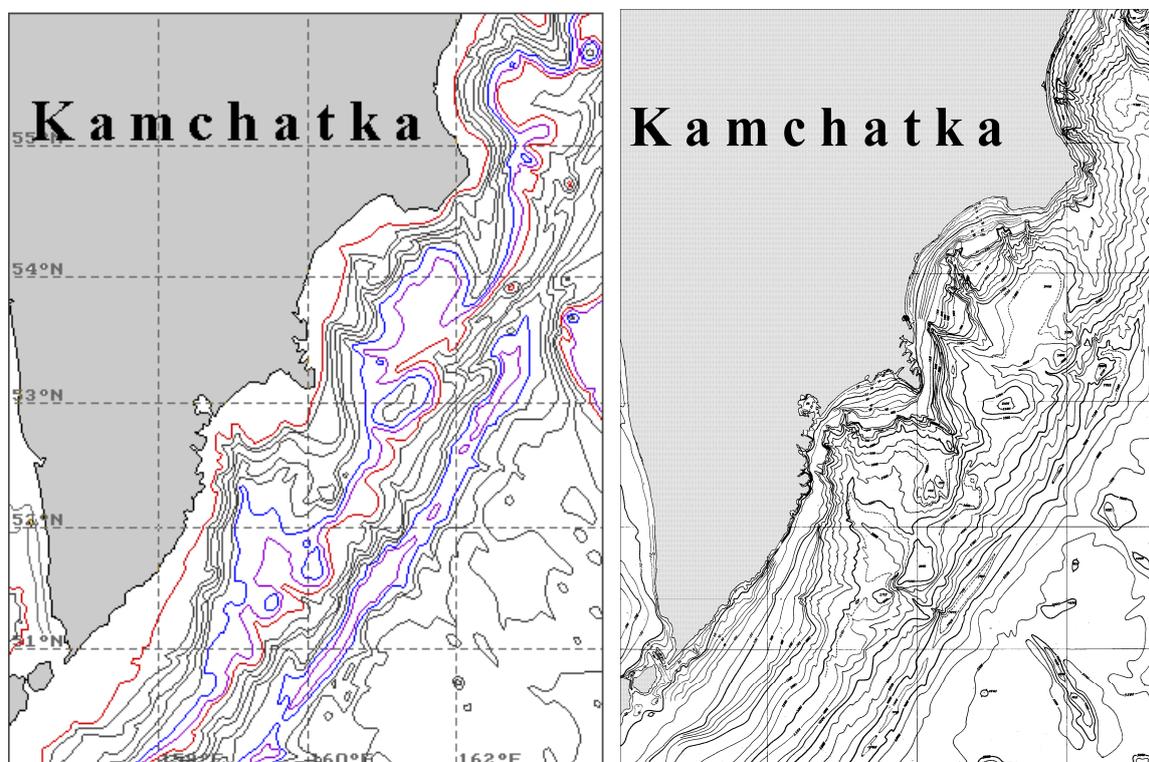


Рис. 4. Сравнение наборов изолиний глубин из базы данных GEBCO и со специально изготовленных батиметрических карт

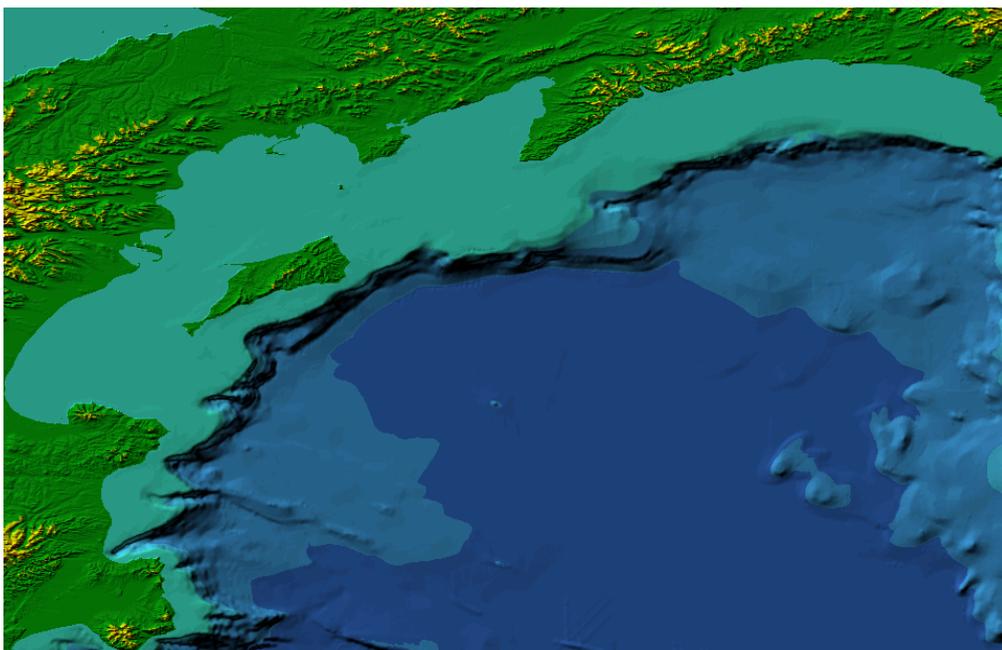


Рис. 5. Трехмерное изображение с боковой подсветкой океанического рельефа в районе средних и северных Курильских о-вов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для некоторых регионов Мирового океана качество цифровых данных о глубинах, содержащихся в глобальных базах данных, позволяет создавать с применением методов, описанных в данной работе, достаточно детальную цифровую батиметрию на регулярных сетках. Если этих исходных данных недостаточно, то могут быть использованы другие источники батиметрической информации (в т.ч. бумажные карты). С помощью предложенных методов была создана новая цифровая батиметрия для всего Курило-Камчатского региона и использована для численного моделирования распространения волн цунами.

Работа поддержана РФФИ (грант 01-01-008(a)) и CRDF (грант RG1-2415-NO-02).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Marine Geological and Geophysical Data from NGDC, Compact disc data set, *National Geophysical Data Center*, Boulder, Colorado, USA.
- [2] Hydrographic Survey Data, CD-ROM data set, Ver. 3.2, *National Ocean Service, NGDC, NOAA*, E/GC3, 325 Broadway, Boulder, CO.
- [3] GEBCO 97, Digital Atlas CD-ROM. 1997. *Intergovernmental Oceanographic Commission, International Hydrographic Organization. British Oceanographic Data Centre, Proudman Oceanographic Laboratory. Bidston Observatory, Birkenhead Merseyside L43 7RA, United Kingdom.*
- [4] Marchuk An. G. Interactive system for input digital geographic and bathymetric information. *Bulletin of the Novosibirsk Computing center. Series: Mathematical Modeling in Geophysics*, Issue: 2 (1996), NCC Publisher, Novosibirsk: 55-62.
- [5] Smith W.H.F. and Sandwell D. 1997. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*. 277: 1956-1962.