

# Эффективные алгоритмы построения и визуализации рельефа Земли и батиметрии Мирового океана

А. И. Фатькина<sup>1</sup>, В. Н. Храмушин<sup>2,а</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, факультет прикладной математики – процессов управления, Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Сахалинское отделение Российского Научно-технического общества судостроителей им. А.Н. Крылова, Южно-Сахалинск

E-mail: <sup>а</sup> Khram@mail.ru

В настоящей работе рассматриваются варианты построения эффективных алгоритмов для обработки, интерполяции и визуализации рельефа Земли и батиметрии Мирового океана, предназначенные для реализации гидрометеорологических информационных систем и прямых вычислительных экспериментов по моделированию гидродинамики океана, шельфовых акваторий и прибрежных мелководий. Представлены варианты предварительной подготовки цифровых массивов в форматах архитектуры компьютеров типа IBM-PC, а также гигантских объемов данных (порядка 15 Гб) в исходных форматах NetCDF с аппаратной кодировкой VAX(PDP-11). В преобразованиях координат задействуются тензорные операции для быстрых переходов между меркаторской и географической (сферической) проекциями. Прямое построение графических изображений выполняется в оперативной памяти в стандартной растровой RGBi-кодировке, что требуется для задействования алгоритмов параллельных вычислений.

Ключевые слова: алгоритм, числовые объекты, батиметрические массивы, тензорная математика, параллельное программирование

Работа выполнена при поддержке Сахалинского отделения Российского научно-технического общества судостроителей имени А. Н. Крылова.

© 2016 Анна Игоревна Фатькина,  
Василий Николаевич Храмушин

## Введение

Прямые вычислительные эксперименты в прогнозах потенциально опасных морских явлений, так же как в оценках состояния атмосферы, прибрежных и океанских акваторий и их взаимодействия, оперируют обширной информационной базой разномасштабных батиметрических карт, многолетними массивами наблюдений за параметрами состояния Мирового океана, с возможностью вовлечения оперативных потоков данных о зондировании океана из космоса и других телеметрических измерений в реальном времени.

Практическое использование массивов и потоков информации из разнородных источников требует разработки эффективных, а значит специализированных процедур для быстрой конвертации материалов, архивированных в различных форматах аппаратной кодировки данных, с возможностью интерактивной графической визуализации аналитических выборок на географических картах, и с возможностью быстрого синтеза различных вариантов представления результатов моделирования совместно с текущими данными наблюдений о состоянии моря.

## Батиметрические архивы в вычислительных экспериментах

Систематизация и графическая визуализация разнородных батиметрических массивов обусловлена необходимостью проведения регулярных вычислительных экспериментов по моделированию длинноволновых гидродинамических процессов в открытом океане, в шельфовой зоне и на прибрежных мелководьях, таких как цунами, штормовые нагоны, приливные колебания уровня моря и другие морские наводнения и экстремальные течения. При ограниченных вычислительных ресурсах постановка эксперимента востребует оптимизацию величин картографического покрытия с шагом сеточных аппроксимаций, разворачиваемых по направлениям преобладающих изобат или контуров побережья для уменьшения площади береговых фрагментов, и с применением меркаторских (конформных по площади) картографических преобразований для ускорения вычислений  $[0,0]$  на сферической поверхности Земного шара.

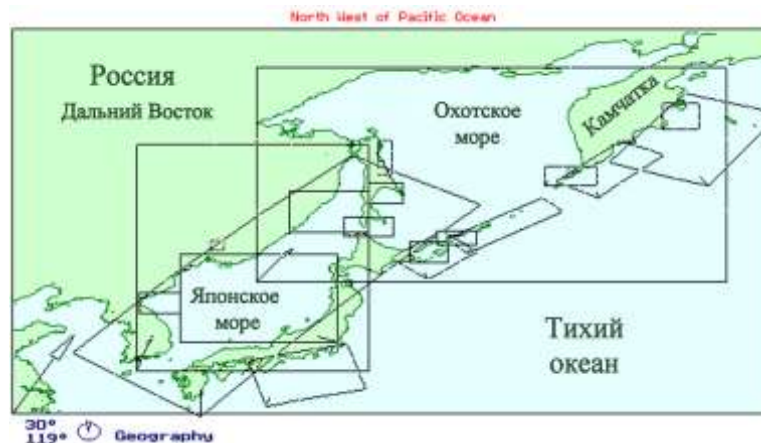


Рис. 1. Сборный лист разномасштабных батиметрических массивов по дальневосточным акваториям, оцифрованных вручную с навигационных карт России.

1. Отработанные на практике методы представления цифровой батиметрии (рис. 1) основаны на использовании дополнительных текстовых описаний с расширением \*.inf; содержащих ссылку на исходные данные; указание на тип чисел (текст, байты, целые или плавающие числа); общий размер и считываемый сектор данных; шаг сетки и тип картографической проекции; координаты опорной точки и наклон левой грани относительно географического меридиана. Описание дополняется списком географических координат мореографов для регистрации колебаний уровня моря и скоростей течений в ходе вычислительного эксперимента.

2. Батиметрические массивы в форматах типа \*.grd содержат конфигурацию в заголовке файла данных, и опознаются по символам: 'DS'. Затем, по отметке 'AA' – включается текстовый режим считывания, по отметке 'VV' – двоичный. Далее выбирается размерность массива и его граничные координаты по осям X и Y, с ожидаемыми экстремумами по аппликате Z.

3. С таким же расширением встречаются океанографические данные в формате NetCDF, оригинальный тип: \*.nc, которые опознаются по начальным символам: 'CDF@', и последующим ключам с избыточным набором параметров, не всегда согласующихся по местоположению и подбору имен в однотипных файлах данных от различных авторов.

Искомые данные во всех трех вариантах батиметрии располагаются единым массивом, допускающим использование универсальных алгоритмов для быстрой выборки глубин и высот на поверхности Земли. Оригинальные материалы из мировых центров данных представляются во внутренних форматах компьютеров типа VAX, что отличается от IBM-PC порядком следования байт. Ускорение выборки достигается предвычислением местоположения строк для фрагментов матрицы данных, для чего текстовые файлы изначально считываются в режиме поиска.

## Алгоритмы интерполяции и быстрых географических преобразований

В географической проекции шаг сетки по долготе зависит от широты:  $\delta S_\lambda = \delta S_\varphi \cdot \cos(\varphi)$ , что нарушает пропорции сеточных ячеек. В меркаторской равноугольной проекции, при небольшой разности широт на границах, шаг сетки может быть постоянным:  $\delta S_M = \delta\varphi \cdot k_M = \delta\lambda / \cos(\varphi - \varphi_0) \cdot k_M$ , где:  $k_M$  – коэффициент пересчета угловой меры в линейную;  $\lambda$  – долгота,  $\varphi$  – широта,  $\delta S$  – шаг сетки. В меркаторской проекции отсчет широты – меридиональная часть, ведется от экватора:  $\varphi_m = \ln(\tan((\varphi_g + \pi/2)/2))$ , с возвратом к угловой мере в географических координатах, как:  $\varphi_g = 2 \cdot \arctan(\exp(\varphi_m)) - \pi/2$  [рад].

Двумерные преобразования координат, в том числе с учетом изменчивости линейных масштабов географических координат, ведется в технологии тензорной математики (рис. 1).

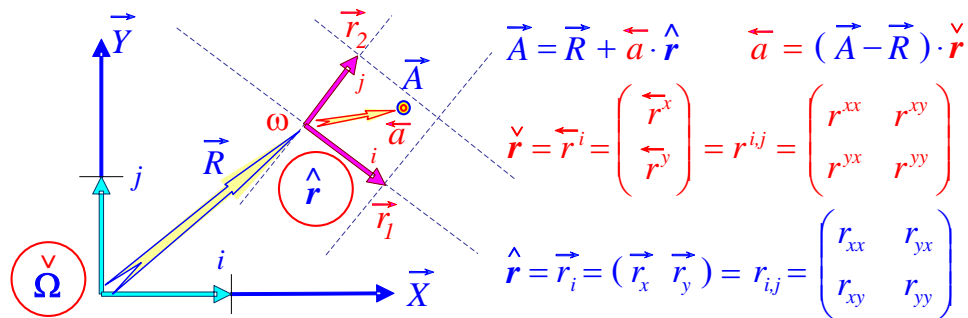


Рис. 2. Сеточное пространство  $\overset{\vee}{\Omega}$  со множеством локальных базисов:  $\overset{\wedge}{r}$  ( $\square$ );  $i, j$  – единичные орты.

```

struct Point{ Real x,y; } // Представление точки на плоскости Real=double
struct Base // Линейные преобразования в единичном базисе
{ Point y,x, Y,X; // Локальный базис, отображение глобальных осей
  Real Axis( Point y, Point x ); // Установка координатных осей
  Point Goint( Point A ){ return (Point){A.x*X.x+A.y*Y.x,A.y*Y.y+A.x*X.y}; }
  Point Goext( Point a ){ return (Point){a.x*x.x+a.y*y.x,a.y*y.y+a.x*x.y}; }
};
struct Basis:Base // Линейные преобразования с глобальным отсчетом
{ Point R; // Опорная точка начала отсчета локального базиса
  Real Axis ( Point R, Point y, Point x ); // Точка отсчета и базисные оси
  Real Euler( Point R, Real Angle, Point size ); // Эйлерово пространство
  Point Goint( Point A ){ return Base::Goint(A-R); } // к локальному базису
};

```

```
Point Goext( Point a ){ return Base::Goext(a)+R; } // в глобальный отсчет
};
```

Локальный базис собирается из разностей координат на границах, как свободных векторов левой и нижней граней сеточной области, нормированных по искомой интерполяционной размерности в индексах узловых точек, которые устанавливаются в качестве столбцов матрицы локального тензора:  $\hat{r} = \begin{pmatrix} \delta \vec{r}_y / n_y & \delta \vec{r}_x / n_x \end{pmatrix}$ . Инициализация тензорного оператора как числового объекта выполняется в процедуре `Axis( y, x )`, где предвычисляются векторы  $\{ Y, X \}$  для обратных тензорных преобразований. Произведение вектора с такой матрицей означает переход от индексов сеточных узлов к координатным смещениям и разностям меридиональных частей, и обратная операция переводит от смещений географических координат к индексам сеточной области. При визуализации батиметрических карт, соответственно, в качестве индексов локального базиса устанавливаются растровые отсчеты для фрагмента графического экрана.

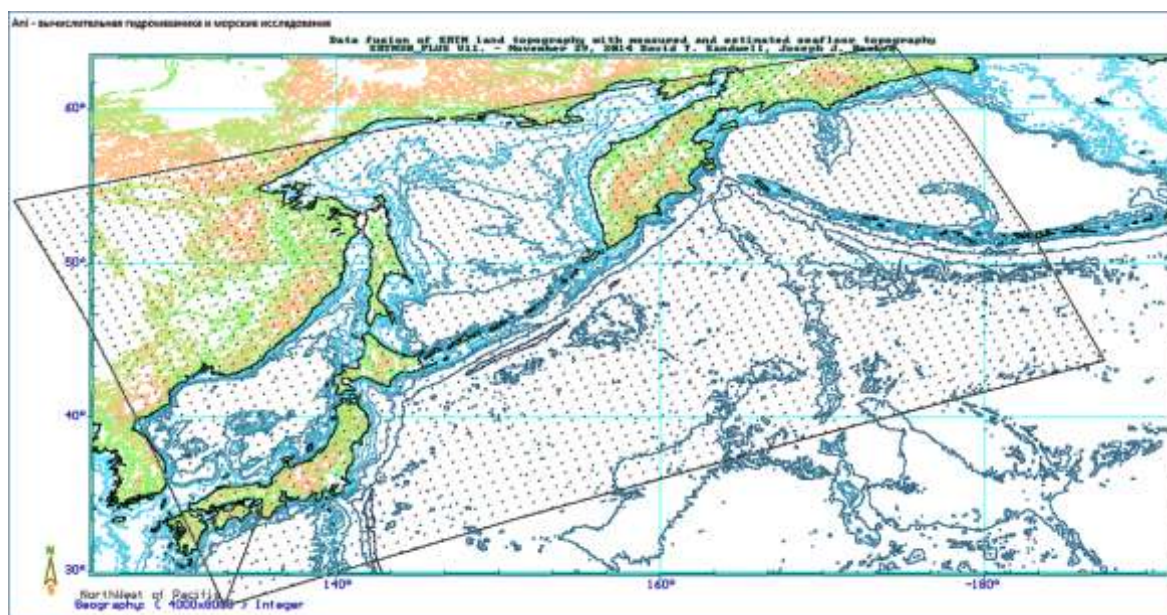


Рис. 3. Пример интерполяции батиметрии с преобразованием картографических проекций.

Процедуры интерполяции и визуализации больших батиметрических массивов нуждаются в задействовании многоядерных вычислительных ресурсов, допускающих возможность кэширования локальных выборок, что весьма актуально в случае применения сглаживающих функций Эрмита второго порядка с осреднением узловых производных при аппроксимации со сглаживанием, так же как и в случае быстрой билинейной интерполяции при необходимости закругления исходных батиметрических материалов.

Требование реентерабельности процедур параллельного программирования исключает возможность кэширования временных параметров в статической памяти вложенных процедур, то есть, для четверок чисел полиномов Эрмита требуется, как минимум, предварительное выделение локальной памяти внутри распараллеливаемых циклов. Формально это становится неким признаком ограниченности привычного структурного или процедурного программирования, с пожеланием необходимости возврата к контекстно-зависимым вычислениям, управляемым виртуальными функциями над текущим состоянием локальных числовых объектов.

Параллельное программирование в среде OpenMP характеризуется непредсказуемостью в последовательности исполнения конкретных вычислительных операций. Это является условием задействования интерполяционных процедур на основе явных численных схем с разделением модифицируемых и разделяемых числовых полей. Графическая визуализация, в таком слу-

чае, требует предварительной прорисовки в оперативной памяти прямого доступа, что формально допускается архитектурой графических систем современных компьютеров.

## Особенности построения алгоритмов визуализации

Для визуализации батиметрических массивов задействуется палитра 224 предопределенных цвета (наследие 256-цветной графики) в RGBi-формате. Это позволяет использовать расширенный диапазон 32-разрядных слов – пикселей для варьирования яркостью при построении затененных изображений рельефа под освещенностью с заданной высоты и направления.

```
static void Topography_Paint () { // Прорисовка батиметрии в поле высот с теневыми оттенками
#pragma omp parallel for
  for( int y=0; y<My; y++ ) // Матрица формируется и интерполируется в процессе
  for( int x=0; x<Mx; x++ ) // чтения исходного файла. Ведется масштабирование
  { Real U=Data[y][x]; // по палитре и вычисление градиентов наклона дна
  RGB_colors C=sea [max(0,min(151,U>0.0?71-int(U*0.0072):72-
int(U*0.0256)))]];
  U = tanh(((Data[y][min(Mx-1,x+1)]-Data[y][max(0,x-1)])*Az.y
+ (Data[max(0,y-1)][x]-Data[min(My-1,y+1)][x])*Az.x)*Skew/5e4 );
  C.b+=U*(U>0?255-C.b:C.b); // попиксельный перебор цветов палитры до 10000 м
  C.g+=U*(U>0?255-C.g:C.g); // с настройкой освещенности и теневых сторон
  C.r+=U*(U>0?255-C.r:C.r); ((unsigned*)Scr)[y*Mx+x+1]=C.i; // (с призраками)
} Tv_PutImage( Tv_port.left+1,Tv_port.top+1,Scr ); // Axis();
}
```

Здесь вектор Az – направление; Skew – высота источника освещения. Батиметрический файл Data предварительно преобразуется к размерности фрагмента графического экрана My·Mx. Палитра собрана в 32-разрядной последовательности RGB\_colors sea[256], по которой настраивается растровая точка C в образе графического экрана Scr [My·Mx].

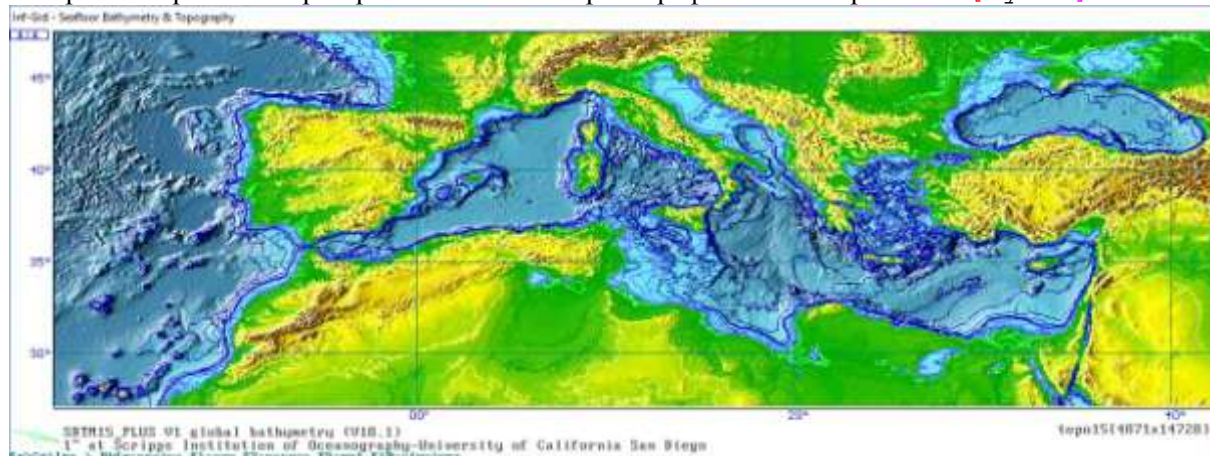


Рис. 4. Интерактивная прорисовка берегового рельефа и батиметрии Атлантики и Средиземноморья.

## Список литературы

Храмушин В. Н. «Апи» – Прямые вычислительные эксперименты для моделирования цунами, штормовых нагонов, экстремальных течений и приливного режима в открытом океане и вблизи побережья. СахГУ. Роспатент № 2010615848 (shipdesign.ru/SoftWare/2010615848.html) Khramushin V. Pryamyie vychislitelnye experimenty dlya modelirovaniya cunami, stormovykh nagonov, ekstremalnykh techeniy i prilivnogo rezhima v otkrytom okeane i vblizi poberezhia [Direct computational experiments for simulating tsunamis, storm surges, extreme currents and tidal mode to open ocean and in near the coast]. SakhSU, Rospatent. Invention 2010615848, 2010.

*Минервин И. Г., Храмушин В. Н.* «Батиметрия» – Цифровые батиметрические массивы (Охотское море). СахГУ. Роспатент № 2010620626 (shipdesign.ru/SoftWare/2010620626.html)  
*Minervin I., Khramushin V.* Cyfrovye batimetricheskie massivы [Digital bathymetric arrays]. SakhSU. Invention 2010620626, 2010.

*Богданов А. В., Дегтярева Я. А., Захарчук Е. А., Тихонова Н. А., Фукс В. Р., Храмушин В. Н.* Интерактивный графический инструментальный глобального вычислительного эксперимента в службе морских оперативных прогнозов // Компьютерные исследования и моделирование. 2015 Том 7 № 3. М.: МГУ, 2015. С. 641–648.

*Bogdanov A., Degtyareva Ja., Zakharchuk E., Tikhonova N., Fux V., Khramushin V.* Interaktivny grafichesky instrumentary globalnogo vychislitel'nogo experimenta v sluzhbe morskikh operativnykh prognozov [Interactive graphical toolkit to computational experiment in maritime forecasts service] // Computer Research and Modeling. – 2015. –Vol.7, No.3. –P. 641–648 (in Russian)

## **Efficient algorithms for construction and visualization of the Earth and the bathymetry of the oceans relief**

**A. I. Fatkina<sup>1</sup>, V. N. Khramushin<sup>2,a</sup>**

<sup>1</sup> Saint-Petersburg State University

<sup>2</sup> Sakhalin division of Science-technical society of shipbuilders named Alexey Krylov, Yuzhno-Sakhalinsk

E-mail: <sup>a</sup> Khram@mail.ru

**Abstract.** In this paper we consider variants of building efficient algorithms for processing, interpolation and visualization of the Earth's topography and bathymetry of the oceans, destined for realization of meteorological information system and direct computational experiments on modeling of ocean, offshore waters and coastal shallows hydrodynamics. The variants of advance preparation digital arrays in the representation of architecture IBM-PC type computers and huge volumes (about 15 GB) in the original NetCDF formats with hardware encoding VAX (PDP-11). In the coordinate transformation tensor operations are utilized for fast transitions between Mercator and geographical (spherical) projections. Direct encoding graphical fields is performed in a standard RGBi bitmap representation in main memory, that is required for activating the algorithms of parallel computing.

**Keywords:** algorithm, numerical objects bathymetric arrays tensor mathematics, parallel programming

The work was supported by Alexey Krylov Science-engineering society of shipbuilder from Sakhalin division.

© 2016 Anna I. Fatkina,  
Vasily N. Khramushin.