

О ПОДХОДЕ К СОЗДАНИЮ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА ДНА АРКТИЧЕСКОГО БАССЕЙНА

А.Ф. ЗЕНЬКОВ, Е.А. ГОРДЕЕВА,
А.В. КОСТЕНИЧ, Е.В. КОЛОБОВ,
Д.Н. КЫТМАНОВ, К.Г. СТАВРОВ

АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», Санкт-Петербург, e-mail: mail@gningi.ru

Описывается подход к разработке технологии создания цифровых моделей рельефа морского дна с использованием данных разнородных съемок. Технология апробирована на материалах гидрографических работ, выполненных отечественными и зарубежными исследователями в центральной части Северного Ледовитого океана с дрейфующего льда, с надводных и подводных носителей. Обоснована необходимость систематического анализа качества неравноточной батиметрической информации, полученной при маршрутных и площадных съемках и различающейся по уровню достоверности, при создании единых баз данных и цифровых моделей.

Ключевые слова: геостатистика, многолучевой эхолот, морфометрический анализ, съемка рельефа морского дна, цифровая модель рельефа, ИВСаО.

Под моделью рельефа морского дна понимается представление в том или ином формате редуцированного рельефа морского дна, отражающее основные свойства истинного рельефа, ради изучения которых создается модель. Цифровая модель рельефа морского дна (ЦМРД) — это модель, представленная множеством числовых триад (глубина и плановые координаты) с указанием системы координат и (или) картографической проекции. ЦМРД могут быть регулярными (grid, растр), нерегулярными (TIN — triangulated irregular network) и комбинированными (TGRID — triangulated grid).

ЦМРД в качестве батиметрической основы необходима для решения различных прикладных задач, требующих привлечения батиметрических данных, например:

- создания «навигационных поверхностей» (The Navigation Surface) (Smith, 2003);
- отображения различных видов информации о морской природной среде (гидрометеорологической, экологической, геологической, геофизической, экологической и др.) в геоинформационных системах (ГИС);
- построения различных типов тематических карт (тектонических, структурных, геохимических карт, карт осадков, карт металлоносности и т.д.);
- решения научно-прикладных задач, например определения континентальной окраины для обоснования внешней границы континентального шельфа (ВГКШ) (Международная Конвенция, 1985).

Такая модель может использоваться для обеспечения плавания подо льдом, в этом случае ЦМРД целесообразно совместить с базой данных о донных грунтах.

Обычно при построении цифровых моделей рельефа дна используются два принципиально отличающихся подхода:

– оцифровка традиционных батиметрических и морских навигационных карт с последующей интерполяцией различными методами глубин между оцифрованными изобатами (Кошель, 2005; Никифоров и др., 2012);

– создание регулярных (grid) и нерегулярных (TIN) цифровых баз данных на основе интерполяции фактографического материала — имеющихся в цифровом виде данных современных съемок рельефа дна или ретроспективной информации, полученной в результате оцифровки планшетов систематического и маршрутного промеров.

Широко используемая международным арктическим сообществом цифровая модель рельефа морского дна (ЦМРД) Северного Ледовитого океана (International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean – IBCAO) (Jakobsson et al., 2000; Jakobsson, Macnab, 2001) для российского сектора составлена на основе оцифровки изобат и отдельных глубин карты «Центральный Арктический бассейн» масштаба 1:2 500 000, изданной ГУНиО МО РФ в 2003 г., и нескольких навигационных карт масштаба 1:500 000, изданных ранее. Это обстоятельство позволяет говорить о ее недостаточной информативности для российского сектора с учетом имеющихся в настоящее время открытых материалов съемок рельефа дна этого региона.

Следует также отметить, что оцифровка изобат может давать специфический эффект «искусственного террасирования». На рис. 1 цвет. вклейки показано сравнение ЦМРД IBCAO и модели, построенной на основе базы ретроспективных батиметрических данных (БРБД). В БРБД использованы материалы съемок рельефа дна с дрейфующего льда (на станциях «Северный полюс» и Воздушных высокоширотных экспедиций «Север»), с подводных лодок (программа SCICEX, США), с надводных судов с помощью однолучевых (ОЛ) и многолучевых (МЛ) эхолотов.

Таблица 1

Объем базы батиметрических данных на российский сектор СЛО

№ п/п	Источник	Годы съемки	Количество точек глубин, шт.	Объем информации, Мб
1	БРБД (Россия)	1961–1991	98 140	3,94
2	МЛ-съемка с надводного судна (Россия)	2010	4 484 871	149,68
3	МЛ-съемка с надводного судна (Россия)	2011	873 188	29,10
4	МЛ-съемка с надводного судна (Россия)	2014	7 581 882	218,06
5	МЛ-съемка с надводного судна (США)	2003	1 142 293	32,92
6	МЛ-съемка с надводного судна (США)	2004	3 305 181	100,36
7	МЛ-съемка с надводного судна (США)	2007	5 482 455	165,37
8	МЛ-съемка с надводного судна (США)	2008	6 568 762	196,60
9	МЛ-съемка с надводного судна (США)	2010	5 298 628	161,09
10	МЛ-съемка с надводного судна (США)	2011	5 794 872	175,06
11	МЛ-съемка с надводного судна (США)	2012	6 098 926	183,41
12	ОЛ-съемка (Россия)	2013	2 561	0,14
13	ОЛ-съемка (база NOAA/NGDC, США)	–	267 130	12,79
14	Съемка по программе SCICEX (США)	1993–1999	1 752 439	98,55
15	Оцифрованные карты в формате S-57	2013	6 896	7,79
Всего			48 758 224	1534,84

Исправить ситуацию можно, создав цифровую модель рельефа морского дна СЛО (российский сектор) на основе имеющегося фактографического материала (табл. 1). По аналогии с IBCAO мы назвали такую модель RuBCAO — The Russian Bathymetric Chart of the Arctic Ocean.

Сложность создания RuBCAO обусловлена разнородностью имеющейся информации. Съёмки рельефа дна проведены разными методами, специалистами разных стран с использованием разнородной гидрографической и навигационной аппаратуры и т.д. Временной диапазон проведения съёмок — более 50 лет, это целая эпоха в век научно-технической революции. Для решения возникающих проблем нами разработана технология совмещения в единый массив разнородных данных о глубинах морского дна, в основном построенная на принципах, аналогичных использовавшимся при построении IBCAO (вне российского сектора).

Кратко принципы построения IBCAO можно сформулировать так:

- создание «списка приоритетности» по уровню достоверности батиметрических данных;
- анализ каждого отдельного источника данных на наличие ошибок и их коррекция;
- анализ расхождений батиметрических данных в местах их пересечения, определение причин ошибок на основе известных методов и условий получения данных и их коррекция;
- компоновка откорректированных данных;
- гридирование и дальнейшее сглаживание результатов.

Предлагаемая нами технология вобрала в себя некоторые приемы, применяемые при построении IBCAO, например ранжирование всех разнородных данных по приоритетности (у нас — уровню достоверности), исключение из площади полос обзора многолучевого эхолота данных с меньшим уровнем достоверности и т.д.

Основное отличие в том, что если в IBCAO осуществляется поиск причин несоответствия данных разных съёмок и это обуславливает введение поправок, то в RuBCAO определяются расхождения (невязки) съёмок с меньшим уровнем достоверности по сравнению с более достоверными, на основе которых вводятся поправки либо напрямую, либо с использованием различных методов интерполяции. Можно сказать, что принцип построения RuBCAO — совмещение на основе системного анализа статистических и геостатистических методов с методами морфометрического и экспертного анализов.

Рассмотрим основные этапы технологии RuBCAO:

1. Составление списка приоритетности по уровням достоверности — ранжирование всех видов съёмки рельефа дна в порядке возрастания (убывания) их достоверности. Под уровнем достоверности съёмки рельефа дна мы понимаем степень приближения результатов съёмки к истинному рельефу дна. Ранжирование съёмок рельефа дна по уровню достоверности осуществляется экспертом на основе анализа метаданных съёмок и зависит от априорной или апостериорной неопределённости съёмки, точности привязки результатов измерений, дискретности, плотности измерений в единице площади и т.д.

Для RuBCAO съёмки рельефа дна можно расположить по убыванию уровня достоверности в следующем порядке:

- результаты съёмки рельефа дна многолучевым эхолотом с надводного судна;

- результаты съемки рельефа дна однолучевым эхолотом с надводного судна;
- результаты съемки рельефа дна однолучевым эхолотом со станций «Северный полюс» (СП);
- результаты съемки рельефа дна однолучевым эхолотом и сейсмозондированием при проведении ВВЭ «Север»;
- результаты съемки рельефа дна по программе SCICEX;
- результаты оцифровки изобат батиметрической карты 2013 г. в формате S-57.

2. Использование статистического метода для поиска и учета систематических расхождений (невязок) между результатами съемок с разным уровнем достоверности на их пересечениях (наложениях). Поиск и учет расхождений может быть реализован методами алгебры карт (ArcGIS, 2013) путем построения поверхности расхождения или «ошибок» менее достоверной съемки по сравнению с более достоверной. Это достигается вычитанием поверхности одной съемки из поверхности другой (см. рис. 2 цвет. вклейки).

3. На последующих этапах выполняются следующие операции:

- проверяется нормальность распределения расхождений (ошибок) по критерию χ^2 или Стьюдента;
- выявляются промахи (выбросы) по критерию Диксона, которые удаляются из выборки;
- находятся участки с систематическим расхождением, и вычисляется систематическая ошибка, равная средней ошибке на данном участке $\Delta_{\text{сист.}} = \Delta_{\text{ср}}$;
- определяется поправка, равная $-(\Delta_{\text{сист.}})$. Поправка вводится в данные съемки с низшим приоритетом (худшей достоверностью);
- в случае отсутствия систематической ошибки, когда случайная ошибка не превосходит допустимой погрешности по 2-му классу стандарта Международного гидрографического общества ИНО S-44 (v. 5), поправки в данные не вводятся;
- после введения всех необходимых поправок, вся исправленная выборка гридуется.

4. Интерполяция поправок по поверхности съемки с меньшим уровнем достоверности с использованием методов геостатистики (Krigging и Radial Basis Function) на основе построения вариограмм (Демьянов, Савельева, 2010).

5. Морфометрический анализ для определения углов наклона между ближайшими точками поверхности и сравнения их с характерными для данных геоморфологических форм. Значительное превышение допустимых значений углов наклона поверхности дна является поводом для удаления таких данных как имеющих наименьшее доверие.

Все операции при создании модели проводятся с TIN-поверхностями, а конечный результат представляется в виде модели grid. При этом можно говорить о снижении погрешности результатов съемок рельефа дна с низким уровнем достоверности (использованных при создании модели) за счет введения интерполированных поправок и снижения систематической составляющей погрешности.

В результате создается регулярная ЦМРД с требуемым шагом ячейки grid'a, визуализацию которой в виде псевдотрехмерной модели рельефа дна можно осуществить с помощью той или иной ГИС. На рис. 3 цвет. вклейки представлены модели рельефа дна до обработки и учета систематических погрешностей (сверху) и полученные в результате полной обработки информации по вышеприведенной схеме (снизу).

Сравнение моделей RuBCAO и IBCAO выявляет расхождение глубин в 125–800 м на отдельных участках континентального склона и подводных хребтов. При этом, поскольку расхождения выявлены в основном в районах съемки современными многолучевыми эхолотами, можно говорить о наличии неопределенностей на отдельных участках IBCAO, построенных по ретроспективным данным.

Таким образом, представляется целесообразным рекомендовать предлагаемую методику создания ЦМРД, основанную на использовании реперных технологий, для обработки разнородных данных съемок рельефа дна и в других районах Мирового океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геостатистика теория и практика М.: Наука, 2010. 327 с.
- Кошель С.М. Моделирование рельефа по изолиниям // Университетская школа географической картографии. К 100-летию профессора К.А. Салищева / Ред. А.М. Берлянт. М.: Аспект Пресс, 2005. С. 198–208.
- Международная Конвенция по морскому праву 1982 г. : Конвенция Организации Объединенных Наций по морскому праву: [подписана 10 декабря 1982 г.: вступ. в действие 16 ноября 1994 г.]. М.: «Военное издательство», 1985. 224 с.
- Никифоров С.Л., Кошель С.М., Фроль В.В. Цифровая модель рельефа дна Белого моря // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2012. № 3. С. 86–92.
- ArcGIS Resources 10.1 [Electronic resource] / Esri, 380 New York Street, Redlands, CA 92373-8100, USA. 2013. URL: <http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/019r/019r00000002000000.htm>
- Jakobsson M. New grid of Arctic bathymetry aids scientists and mapmakers / M. Jakobsson, N.Z. Cherkis, J. Woodward et al. // Eos Trans. AGU. Vol. 81, 89, 93, 96. 2000.
- Jakobsson M. International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) [Electronic resource] / M. Jakobsson, R. Macnab, Members of the Editorial Board // Technical Reference and User's Guide. 2001. URL: http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/IBCAO_TechnicalReference.PDF.
- Smith S.M. The Navigation Surface: A Multipurpose Bathymetric Database. University of New Hampshire, 2003. 86 p.

*A.F. ZENKOV, E.A. GORDEEVA, E.V. KOLOBOV, A.V. KOSTENICH, D.N. KYTMANOV,
K.G. STAVROV*

ON THE APPROACH TO DEVELOP UPDATED DIGITAL MODELS OF THE ARCTIC BASIN BOTTOM

In the report an approach to developing technology to create digital elevation models of the seabed using heterogeneous data is considered. The technology was tested on material hydrographic work carried out by domestic and foreign researchers in the Central Arctic Ocean with drifting ice, surface ships and submarines. The necessity of systematic analysis of different quality bathymetric information varying by level of reliability when creating common databases and digital models is justified.

Keywords: geostatistics, multi-beam echo sounder, morphometric analysis, surveying the seabed topography, digital elevation model, IBCAO.

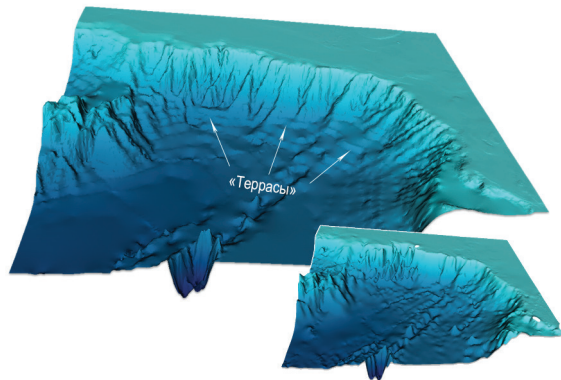


Рис. 1. Сравнение ЦМРД ИВСАО и модели на основе БРБД.

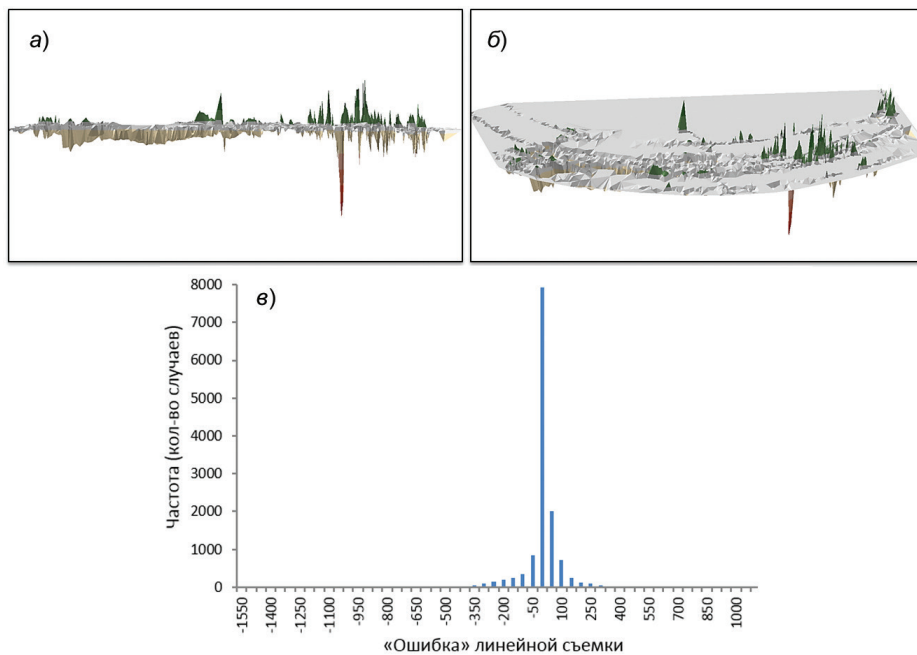


Рис. 2. Вид поверхности невязок (*а* — вид сбоку, *б* — вид сверху) и гистограмма их распределения (*в*).

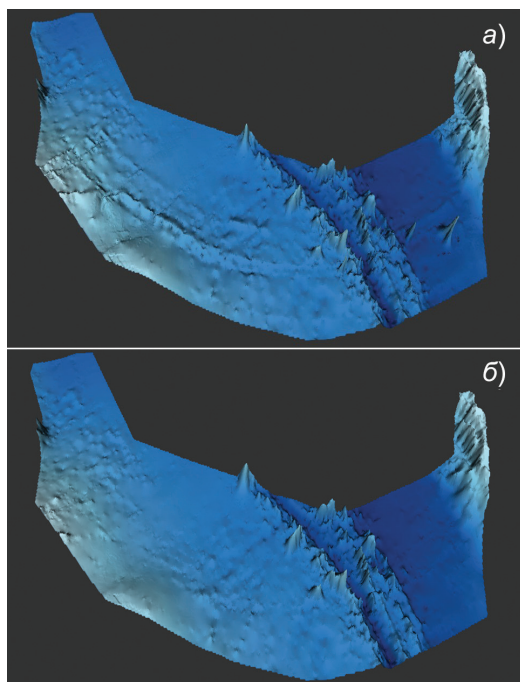


Рис. 3. Поверхности рельефа дна до (*а*) и после (*б*) полного цикла обработки.