

УДК 551.465

О МЕТОДАХ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ДНА (НА ПРИМЕРЕ БЕЛОГО МОРЯ)

© 2015 г. С. Л. Никифоров¹, С. М. Кошель², В. В. Фроль², О. Е. Попов³, О. В. Левченко¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
географический факультет Москва

³Акустический институт РАН, Москва

e-mail: nikiforov@ocean.ru

Поступила в редакцию 25.11.2013 г., после доработки 06.02.2014 г.

Основой для создания цифровой модели рельефа (ЦМР) дна Белого моря являлись навигационные карты различного масштаба. Проводилось сканирование карт и обработка их растровых образов, векторизация изобат и создание атрибутивных таблиц, трансформирование векторных слоев из проекции карты в географические координаты, а также редактирование и сшивание листов, коррекция геометрии и атрибутов. При создании ЦМР важен выбор алгоритма, который позволил бы сохранить в модели выраженные в исходных изобатах формы рельефа дна с максимальной детальностью. Был использован оригинальный, разработанный и реализованный авторами алгоритм, основанный на быстром вычислении расстояний до двух ближайших изобат разного уровня. Его главная особенность — интерпретация изолиний как векторных линейных объектов. Сравнение глубин из построенной цифровой модели ЦМР дна с глубинами, измеренными при проведении эхолотных промеров в натурных условиях, показало их хорошее соответствие. Актуальными являются не только созданная цифровая модель рельефа дна, но и методические и методологические основы цифрового моделирования, включая новые классификационные подходы к описанию рельефа.

DOI: 10.7868/S0030157415020136

Цифровая модель рельефа (ЦМР), в том числе дна морских акваторий, является важнейшим компонентом базы пространственных данных геоинформационных систем (ГИС) различной направленности. Преимущество многослойной оболочки ГИС заключается в возможности формировать неограниченное число слоев, характеризующих те или иные свойства морского дна, ограничениями служат рациональность и оптимизация действий при решении поставленных задач, здравый смысл и операционная мощность вычислительной техники.

Данные о батиметрии морского дна необходимы для морской геологии и геоморфологии, а также картографии, палеогеографии, геоэкологии, гидроакустики и множества других прикладных направлений исследований, а именно:

проведения мониторинга и определения возможного изменения рельефа и структуры морского дна в условиях нарастающего антропогенного воздействия, включая разработку и эксплуатацию месторождений углеводородов;

планирования и организации морской деятельности в условиях возможного увеличения сроков навигации в Арктике;

использования данных о свойствах дна для проектно-строительных работ;

определения границ распространения на шельф многолетнемерзлых пород и последствий их вероятной деградации в условиях потепления;

развития оперативной океанологии;

разработки и эксплуатации гидроакустических средств подводного наблюдения, в том числе для прогноза их потенциальной дальности действия, а также при обработке гидроакустической информации.

Информация о морском дне необходима и при решении глобальных геополитических задач — например, определении внешней границы арктического континентального шельфа РФ, для чего, согласно требованиям Конвенции ООН по морскому праву, кроме всего прочего, необходимо создание модели рельефа дна [11].

Моделирование рельефа дна, с некоторой долей условности, можно разделить на два типа — создание генеральных моделей рельефа дна крупных акваторий в условиях резкого дефицита пространственно-координированных отметок глубины и моделирование рельефа дна небольших по площади участков с достаточным количеством данных. Генеральные модели рельефа дна должны являться основой для определения “ключевых” участков шельфа с детальным промером глубин для решения как фундаментальных, так и,

Таблица 1. Морфометрические характеристики рельефа шельфа

Морфометрические группы рельефа	Структурно-геоморфологическая принадлежность	Размер (наиболее типичный)
Мегарельеф	Шельф в целом – крупнейший структурный элемент в планетарном плане	Ширина – от берега до бровки – десятки, сотни и тысячи км
Макрорельеф	Протяженные равнины, крупные структурные поднятия и депрессии, как правило, структурно обусловленные	Протяженность – сотни км
Мезорельеф	Экзогенные формы рельефа, реже структурные, формирование и развитие которых связано с особенностями палеогеографических и (или) современных процессов	Протяженность менее сотни км, обычно десятки км
Микрорельеф	Экзогенный рельеф, связанный с проявлением современных процессов (волновые знаки ряби, биотурбационные признаки и т.д.)	Относительная высота (глубина), протяженность – метры и сантиметры

особенно, практических задач. При промышленном освоении шельфа они необходимы на стадии обоснования, планирования и определения георисков, разведки и строительства, а на стадии эксплуатации служат основой для проведения мониторинга, обеспечения мероприятий по отражению возможных угроз, включая природные и т.п. Данный подход наиболее адекватен для оптимизации материальных затрат, учитывая большую, а порой огромную, стоимость натуральных изысканий. Необходимо учитывать и то, что именно генеральные модели сводят к минимуму возможные и неизбежные ошибки на всех стадиях изысканий и эксплуатации. Несмотря на логичность (по крайней мере, для авторов) предлагаемых решений, до настоящего времени данная последовательность действий не очевидна для многих производственных организаций и объединений.

Моделирование рельефа дна крупных акваторий всегда проводится в условиях дефицита данных гидрографического промера, а равномерной и детальной изученности рельефа дна не стоит ожидать и в ближайшем будущем. Поэтому, необходимо использовать имеющуюся геолого-геоморфологическую информацию. Однако при составлении цифровых карт рельефа дна редко учитывается его происхождение, структурная принадлежность, палеогеографические условия формирования и современные особенности развития, не привлекаются геофизические, геологические, геоморфологические и другие данные и не проводится их комплексный анализ. При компьютерной обработке данных, как правило, проводится механическая интерполяция глубин по регулярной (или по нерегулярной) сетке отметок.

По морфометрическим признакам, рельеф шельфа, с некоторой долей условности, можно разделить на следующие группы (табл. 1).

Рельеф шельфа каждого из арктических морей имеет собственную специфику, связанную как с

современными процессами, так и с историей развития. Наибольшее влияние на его эволюцию оказало последнее (вюрмское) оледенение. Оледенения оставили свои следы преимущественно на шельфе западной части Российской Арктики (включая Белое море), тогда как восточная его часть в ледниковые эпохи осушалась и дренировалась реками [10, 16, 19 и др.]. Благодаря деятельности покровных ледников существенные изменения претерпели первично тектонические и эрозионные формы рельефа, что привело к формированию фиордовых, фиардовых и шхерных берегов, а на шельфе – подводных фиордовых долин, окраинных желобов и т.д. Характерными признаками этих образований является наличие порогов, боковых и напорных морен, связанных с аккумулятивной и эрозионной деятельностью ледников.

В конце прошлого столетия на основе анализа ведущих рельефообразующих процессов была создана морфогенетическая классификация форм и типов рельефа [3], однако она имела высокую степень генерализации и в ней не были учтены региональные особенности формирования рельефа именно шельфа Арктики. Поэтому за основу взята более новая морфогенетическая классификация форм и типов рельефа, глобально модернизированная и детализованная специально для арктических морей [7, 8, 15, 17, 18 и др.]. В классификации учитывается сложное взаимодействие различных природных факторов, определяющих происхождение и морфологическую выраженность различных форм рельефа дна. При этом генезис рельефа шельфа определяется не отдельно взятым процессом, а является результатом взаимодействия современных и древних экзогенных процессов совместно с учетом структурно-геологической принадлежности. Используя данный подход, можно определить тенденцию изменения морфологии рельефа в будущем. В классификации оха-

рактирован основной комплекс эндогенных (структурных) и экзогенных (или скульптурных) форм рельефа с учетом их специфических особенностей формирования и развития в полярной зоне. В основе всех крупных форм рельефа шельфа, так или иначе, лежит тектоническая структура, на которую впоследствии накладываются формы рельефа экзогенного происхождения. Геологическими структурами определяется положение крупных форм рельефа, таких как синклинальные подводные впадины, антиклинальные и брахиантиклинальные подводные возвышенности, равнины, флексурные уступы и т.п. Несмотря на то, что они все, в большей или меньшей степени, переработаны современными или (и) древними экзогенными процессами, доминантными являются или являлись именно эндогенные процессы. Формирование экзогенного рельефа, наоборот, связано с определяющим влиянием современных или древних субаквальных (субаэральных) процессов морфогенеза (климатические, гидрофизические и др.).

Основой для создания ЦМР дна Белого моря являлись навигационные карты различного масштаба. Следует отметить, что цель гидрографического промера (и, как результат, навигационные карты) направлена не на выявление морфометрических геолого-геоморфологических особенностей рельефа дна, а на указание опасных участков именно для мореплавания — указание расположения мелей, отличительных глубин и других подводных объектов. При этом каждая из проводимых изобат имеет свое назначение, например: 2-х метровая ограничивает глубины опасные для плавания всех видов кораблей; 5-ти метровая — глубины не доступные для судов со средней осадкой; 10-ти метровая — для судов с большой осадкой; 10–20-ти метровая — глубины доступные для всех судов. Поэтому, данные промера в отрыве от геолого-геофизических и геоморфологических данных могут обеспечить только общее представление о рельефе морского дна.

Далее, на навигационных картах вручную проводились дополнительные изобаты. Такой подход, несмотря на большую трудоемкость, является на наш взгляд необходимым условием подготовки исходных данных для дальнейшего создания цифровой модели рельефа. В настоящее время еще не разработаны методы компьютерного анализа массивов глубин, позволяющих выявлять особенности, а, главное, генезис рельефа.

Сечение изобат выбирается из условия наиболее полного, по возможности, отражения имеющихся эндогенных и относительно небольших по размерам экзогенных форм рельефа. Затем, проводится сканирование карт и обработка их растровых образов, векторизация и создание атрибутивных таблиц, трансформирование векторных

слоев из проекции карты в географические координаты, а также редактирование и сшивание листов, коррекция геометрии и атрибутов [6, 8, 9].

Следующий этап заключается в создании растровой цифровой модели рельефа дна, где важнейшей задачей являлся выбор алгоритма, который позволяет отобразить в модели имеющиеся формы рельефа дна с максимальной детальностью (учитывая разный размер эндогенных и экзогенных образований). Традиционные методы интерполяции по данным в точках не позволяют создать цифровую модель, точно и адекватно отражающую небольшие по размерам формы рельефа (например, образованные под влиянием экзогенных факторов). Это относится и к реализованному в модуле `TOPotoRASTER` пакета `ArcGIS` алгоритму моделирования по изолиниям, который, несмотря на популярность, в итоге опирается не на изолинии как линейные объекты, а на точки, расставленные вдоль изолиний с некоторым шагом. Недостатки такого подхода особенно заметны на рельефе с множеством мелких форм на фоне крупных структурных элементов. Нами использован другой алгоритм, который основан на быстром вычислении расстояний до двух ближайших изобат разного уровня (расстояние измеряется вдоль линий, не пересекающих изобаты) [5, 13, 14]. Его главная особенность — интерпретация изолиний как векторных линейных объектов, что позволяет корректно определять значение глубины на участках, ограниченных только изолинией одного уровня, исходя из значений на смежных участках, и, соответственно, достоверно строить модель в пределах замкнутых повышений и понижений рельефа морского дна. Поскольку алгоритм опирается на топологическую структуру изолиний, то необходимо правильно подготовить исходные данные, а именно: оцифрованные изолинии не должны иметь разрывов, т.е. должны быть либо замкнутыми, либо начинаться и заканчиваться вне области моделирования. Таким образом, в модели сохраняются все небольшие по размеру формы рельефа, выраженные в изобатах на карте. Описанный алгоритм был реализован одним из авторов в виде отдельного программного модуля [5].

Важным моментом при создании модели является выбор шага регулярной сетки, в узлах которой вычисляются значения моделируемого показателя. Слишком большой шаг приводит к потере информации, заложенной в исходных данных. Слишком мелкий шаг приводит к неоправданному увеличению объема модели без увеличения ее информативности и, как следствие, увеличение времени на ее обработку и анализ программными средствами. Экспериментальным путем выяснено, что для наших исходных данных наиболее полное сохранение многообразия рельефа дна в модели достигается при выборе шага сетки не бо-

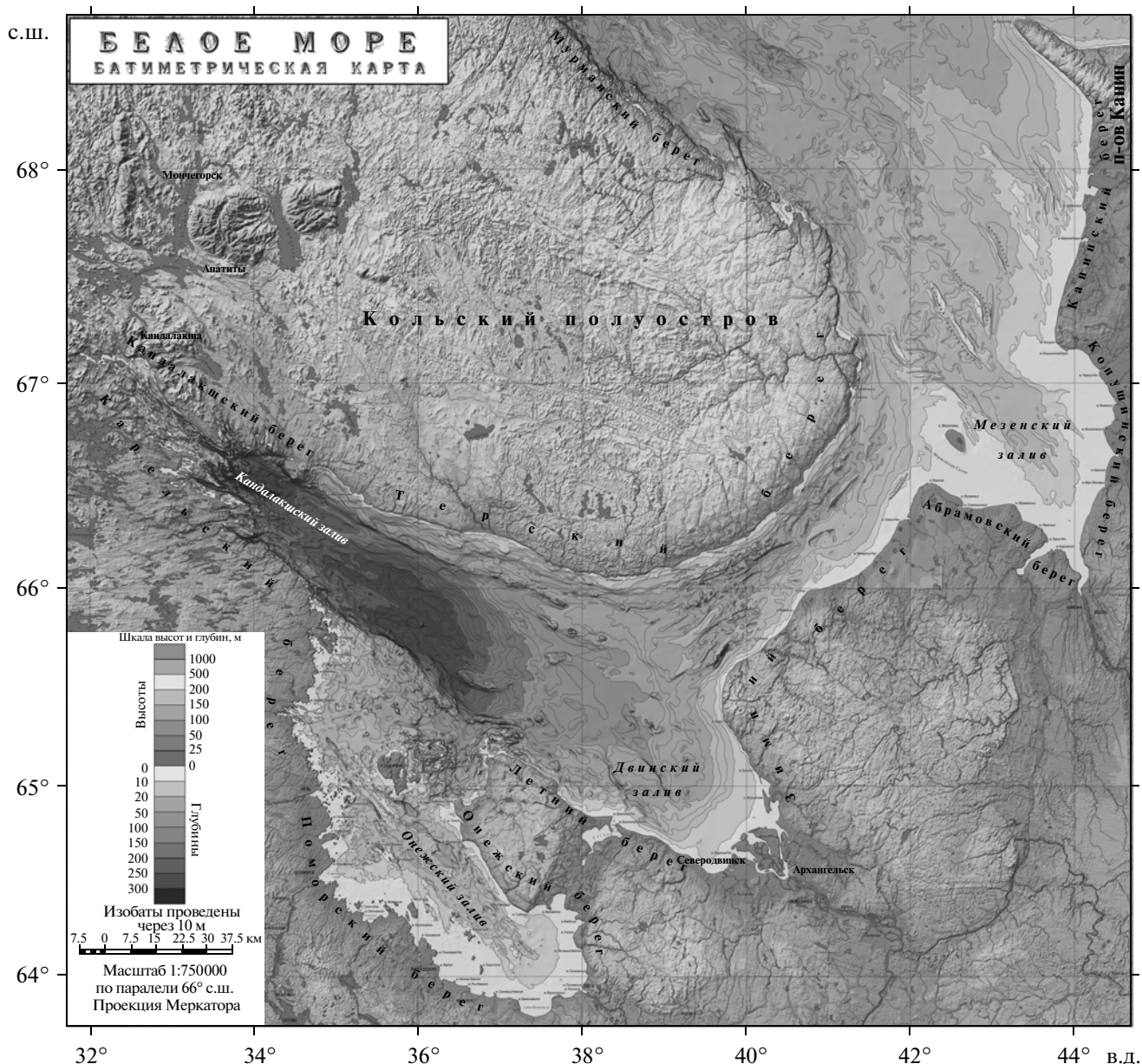


Рис. 1. Батиметрическая карта Белого моря (уменьшено), созданная на основе цифровой модели рельефа дна “ИО РАН-МГУ”, проекция Меркатора, масштаб по параллели 66°, система координат 1942 г. (Пулкото). Шаг сетки модели 100 м в проекции карты. Изображение рельефа дна и суши получено наложением послойной окраски и аналитической отмычки. Для показа рельефа суши использована цифровая модель GMTED2010.

лее 100 м в проекции Меркатора с главной параллелью 66° (в географических координатах это соответствует шагу около 3 угловых секунд по широте и 8 секунд по долготу). Объем модели (матрицы четырехбайтовых чисел с плавающей точкой) на всю акваторию Белого моря, включая северную часть (так называемое “Горло”), при таком шаге сетки составляет всего около 130 Мб.

Построенная цифровая модель отражает рельеф дна в заданном масштабе без потери первоначальной степени детальности, выраженной в исходных изобатах, как для всего моря, так и для

его отдельных частей. Кроме этого, ЦМР дна дает возможность строить профили с любой частотой и в любом направлении, а также использовать средства морфометрического анализа в ГИС (расчет углов наклона и пр.). При создании карт наличие цифровой модели позволяет в полном объеме использовать современные геоинформационные (картографические) технологии. На рис. 1 представлена (в уменьшенном виде) батиметрическая карта Белого моря, созданная на основе построенной цифровой модели рельефа дна и модели GMTED2010 [12] для рельефа суши. Рельеф на

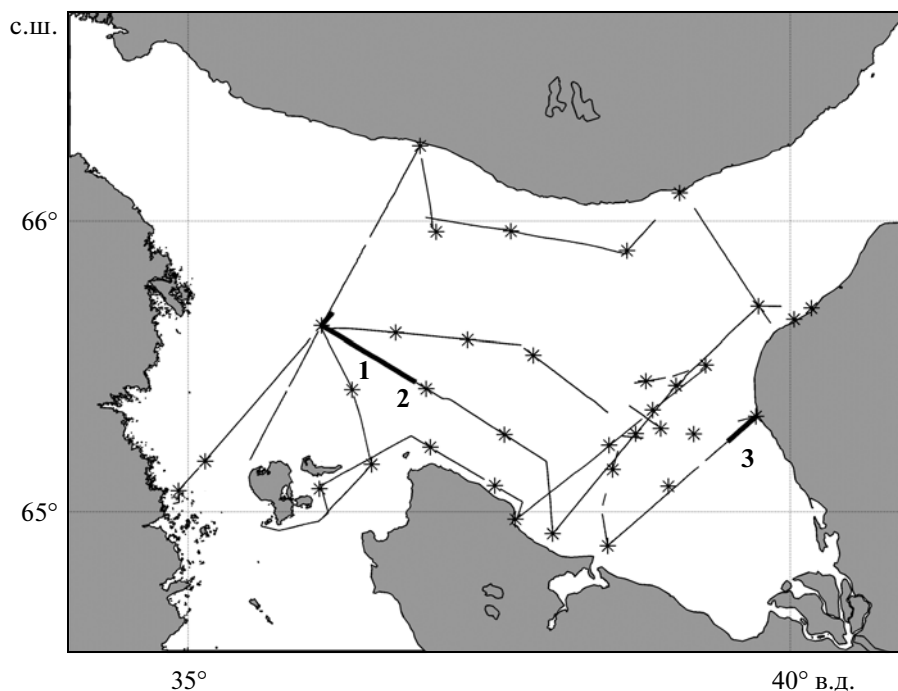


Рис. 2. Схема промерных галсов в рейсе НИС “Эколог” (2011 г.).

Звездочки – точки, в которых определялись вертикальные профили скорости звука. 1, 2 и 3 – галсы (жирные линии), для которых приведены графики для сравнения измеренных глубин и глубин из ЦМР (см. рис. 5).

карте показан способом послышной окраски в сочетании с аналитической отмывкой.

Для проведения специализированных геолого-геоморфологических работ, либо геоакустических расчетов необходимы еще более детальные данные с сохранением первичной сейсмоакустической и крайне подробной информацией о морфологии (включая, расчлененность) рельефа дна и других характеристиках. В этом случае, следует провести систематизацию, типизацию и районирование рельефа (основное различие между геоакустическим районированием и типизацией состоит в том, что при типизации главный критерий – качественные различия, а при районировании – количественные) [1]. Для этого на ЦМР дна необходимо выделить области, где изменения геолого-геоморфологических параметров будут относительно невелики, при этом, систематизацию (типизацию, районирование) логично проводить согласно с классификацией, которую возможно детализировать в соответствии с целями и задачами исследований. Например, тип рельефа – “подводная возвышенность” можно разделить на подтипы “вершина подводной возвышенности”, “склоны подводной возвышенности”, “подножье подводной возвышенности” (возможны и более дробные другие варианты). Иными словами – представление морского дна как совокупности типичных геологических объектов дает возможность

наиболее полно использовать информацию о морском дне.

Для определения достоверности ЦМР дна необходимо сравнение глубин из ЦМР с глубинами, измеренными при сейсмоакустических исследованиях осадочной толщи дна, в случае Белого моря – в рейсе НИС “Эколог” в тех же координатах (срок проведения экспедиции – 4–13 июля 2011 г.). Измерение глубин в натуральных условиях проводилось с помощью узколучевого параметрического эхолота-профилографа “SES-2000 standard” (“Innomar Technologie GmbH”, Росток, Германия), который является двухканальной акустической системой, реализующей параметрический эффект нелинейной акустики [20]. Рабочая частота эхолотирования – 100 кГц при ширине характеристики направленности $\pm 1.8^\circ$. Для устранения влияния качки применялась система коррекции. Позиционирование проводилось с помощью системы GPS, обеспечивающей среднеквадратичное отклонение при определении местоположения примерно в 3 м. Эхолотные промеры проводились преимущественно по прямолинейным галсам длиной от 3 до 27 км. Среднее расстояние между точками измерения глубины около 0.4 м. Для оценки достоверности ЦМР были выбраны эхолотные галсы, расположенные как в центральной части моря, так и на относительно мелководных участках, общей протяженностью более тысячи км (рис. 2).

Таблица 2. Распределение минимальных и максимальных скоростей звука на различных глубинах для профилей скорости звука, измеренных во время проведения эхолотных промеров

Глубина, м	Минимальная скорость звука, м/с	Максимальная скорость звука, м/с	Разность, %
0	1460	1503	2.9
10	1444	1487	2.9
20	1438	1475	2.5
30	1437	1465	1.9
40	1437	1463	1.8
50	1437	1459	1.5
60	1438	1456	1.2
70	1438	1440	0.14
80	1438	1442	0.28
90	1438	1439	0.07
100	1437	1438	0.07

В начале обработки было проведено определение качества первичного материала. Часть промерных галсов была отбракована ввиду явных ошибок измерений. Кроме этого, результаты промеров очищались от случайных ошибок. Признаком ошибочных значений глубины являлось значительное отклонение глубины одного—двух последовательных измерений от предыдущих и последующих значений, а также одновременное резкое увеличение шага по расстоянию между соседними отсчетами. Всего, после предварительного анализа, в дальнейшей обработке участвовало 99 галсов общей длиной 1055 км.

Оценка потенциальной точности измерения глубин путем эхолотирования достаточно сложна из-за возможных многочисленных источников ошибок (их систематическое описание приводится в [4]). При проведении промеров не было морских уровенных постов непосредственно в районах работ, которые позволяли бы учитывать изменение уровня моря за счет сгонно-нагонных явлений, приливов и т.п. В связи с трудностями организации таких работ приведение глубин к единому нулю не проводилось, а для оценки достоверности ЦМР использовались статистические методы.

Одним из значительных источников ошибок определения глубин при эхолотировании является большая изменчивость в пространстве поля скорости звука. Поскольку измеренные глубины рассчитывались по средней скорости звука 1500 м/с, то значения глубин исправлялись с учетом вертикальных профилей скорости звука, которые рассчитывались по измеренным с помощью гидрофизического зонда температуре и солёности во время остановок в ходе промерных работ. По всему району работ было измерено 37 про-

филей температуры и солёности. Для исправления глубин на каждом галсе использовался ближайший профиль скорости звука. Наибольшая изменчивость скорости звука наблюдалась в верхнем наиболее динамичном слое от 0 до 60 м. В табл. 2 приводится распределение минимальных и максимальных скоростей звука на различных глубинах для всех профилей, полученных во время проведения промеров (рис. 3).

В ходе обработки данных рассчитывалось расстояние вдоль промерного галса путем суммирования расстояний между соседними точками, в которых определялись глубины. Затем данные эхолотного промера интерполировались на равномерную по расстоянию сетку с шагом в один метр и сглаживались усредняющим фильтром с равномерным взвешиванием длиной 500 м. Сглаживание проводилось для приведения в соответствие спектров глубин промерного галса со спектром глубин из ЦМР.

Сравнение глубин эхолотного промера с глубинами из ЦМР проводилось следующим образом — вычислялось матожидание и среднеквадратичное отклонение разности глубин из ЦМР и полученных при эхолотировании. Матожидание разности глубин дает информацию о систематическом отклонении глубин из ЦМР от натуральных измеренных глубин. Среднеквадратичное отклонение разности глубин показывает, в каких пределах изменяются отклонения между глубинами из ЦМР и данными эхолотирования.

В результате вычислений математическое ожидание по всем галсам равно -3.14 м, т.е. ЦМР дна дает в среднем меньшие глубины, что может быть объяснено приведением всех глубин в ЦМР к нулю, в отличие от данных по эхолотированию морского дна при проведении морских экспеди-

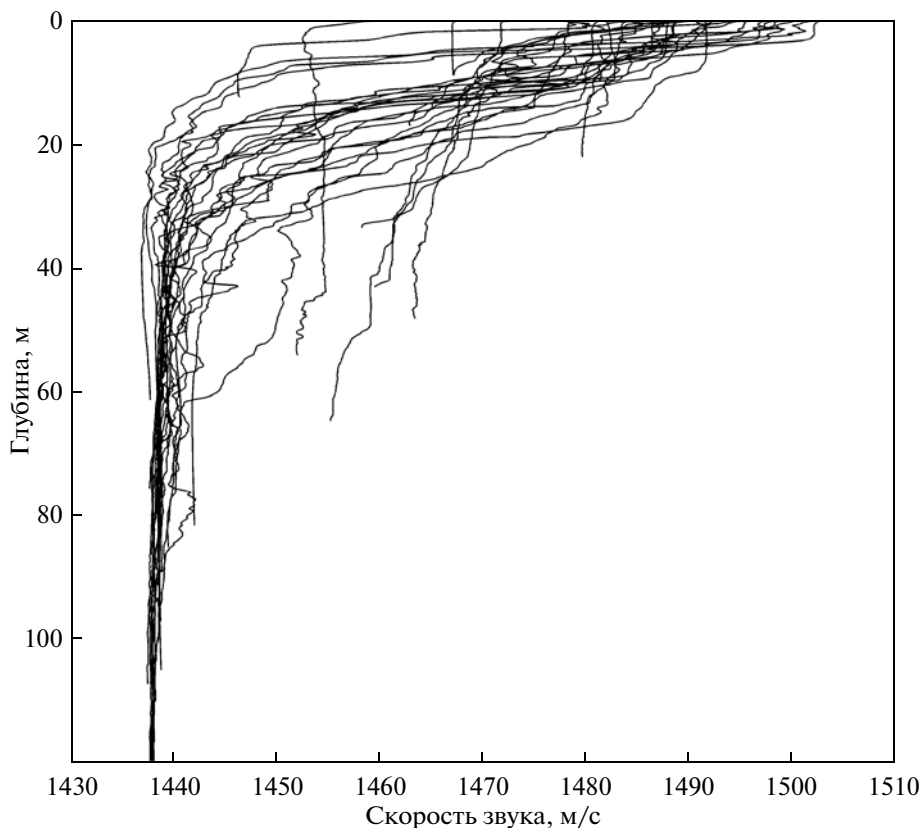


Рис. 3. Вертикальные профили скорости звука по всему району натуральных исследований.

ционных работ на НИС “Эколог”. Среднеквадратичное отклонение по всем галсам составило 3.49 м.

На рис. 4 представлен график зависимости среднеквадратичного отклонения (1) и математического ожидания (2) разности глубин из ЦМР и полученных при эхолотировании от средней глубины галса. Можно отметить увеличение математического ожидания при уменьшении средней глубины галса. По-видимому, это можно объяснить большей высотой приливов на прибрежных мелководьях. При увеличении средней глубины галса наблюдается тенденция к уменьшению абсолютной величины математического ожидания, а для самых больших глубин математического ожидания становится положительным. К сожалению, дать более точную интерпретацию смены знака математического ожидания затруднительно, ввиду отсутствия данных о скорости звука на глубинах более 120 м во время проведения промеров.

Дополнительно для сравнения можно привести интервальные оценки. Для интервала глубин от 0 до 60 м математическое ожидание -4.19 м, а среднеквадратичное отклонение 3.88 м. Для глубин более 60 м математическое ожидание -2.70 м, а среднеквадратичное отклонение 3.07 м.

Ниже, в качестве примера, приводятся примеры сопоставления глубин для трех галсов, измеренных непосредственно в рейсе эхолотом “SES 2000 standard” и полученных из ЦМР (рис. 5). На рис. 2 жирными линиями с номерами указано положение этих галсов.

Используя данные ЦМР дна возможен расчет серии морфометрических показателей, которые базируется на вычислении производных сеточных цифровых моделей по исходной ЦМР. Угол наклона (в градусах) в точке с координатами (x, y) вычисляется по формуле:

$$S(x, y) = \frac{360}{2\pi} \arctg \sqrt{(\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2},$$

где $z = z(x, y)$ – функция двух переменных, описывающая рельеф. Для вычисления частных производных могут быть применены различные методы, при этом следует учитывать, что функция глубин $z(x, y)$ является сеточной (ее значения известны в узлах регулярной прямоугольной сетки). Нами для вычисления частных производных в узле сетки с индексами (i, j) использованы центральные разности:

$$(\partial z / \partial x)_{ij} = \frac{z_{i+1,j} - z_{i-1,j}}{2h_x}, \quad (\partial z / \partial y)_{ij} = \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j-1}}{2h_y},$$

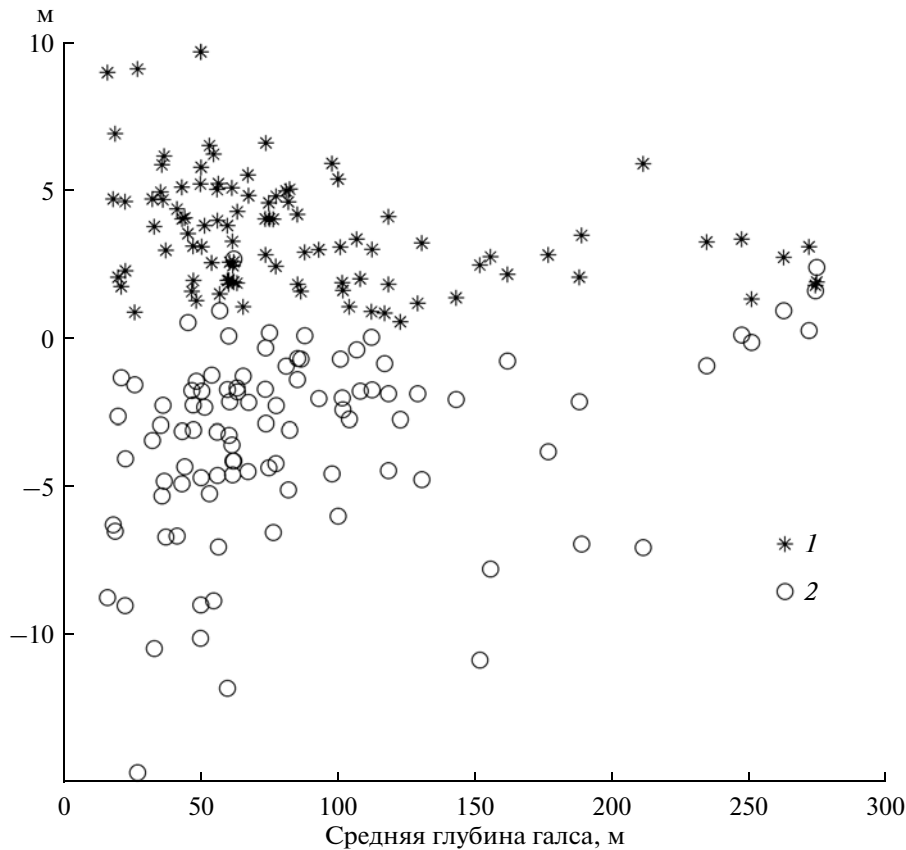


Рис. 4. Зависимость среднеквадратичного отклонения (1) и математического ожидания (2) разности глубин из ЦМР и полученных при проведении эхолотных промеров от средней глубины галса.

где через z_{ij} обозначено значение глубины в узле (i, j) , а через h_x и h_y – шаг сетки вдоль осей x и y соответственно. При вычислениях необходимо также вводить поправочный коэффициент для значений h_x и h_y , учитывающий искажения длин вдоль параллелей и меридианов в проекции Меркатора (поскольку модель создавалась именно в этой проекции).

Помимо углов наклона по ЦМР дна может быть вычислен целый ряд других морфометрических показателей. Довольно часто алгоритмы для их вычисления базируются на использовании так называемого метода “скользящего окна” (иногда используют термин “фильтрация”) [2]. Суть его состоит в следующем – выбирается область определенной формы (обычно квадрат или круг) и размера, центр области помещается в узел сетки и делается выборка всех значений ЦМР, попавших в эту область. Значение требуемого показателя в центре окна далее вычисляется по полученной выборке. Описанная операция повторяется для каждого узла сетки ЦМР. В результате получается новая сеточная цифровая модель, в узлах которой хранятся значения вычисленного показателя.

ВЫВОДЫ

Моделирование рельефа дна крупных акваторий всегда проводится в условиях дефицита данных гидрографического промера, а равномерной и детальной изученности рельефа дна не стоит ожидать в ближайшем будущем. Поэтому, дополнительно необходимо использовать имеющуюся геолого-геоморфологическую информацию.

Процесс создания ЦМР дна достаточно сложен и трудоемок. Методика базируется на анализе и оцифровке навигационных карт разного масштаба и проведении дополнительных изобат с учетом классификационных признаков форм рельефа дна.

При создании модели рельефа был применен оригинальный алгоритм, минимизирующий возможные ошибки при ее построении, так как традиционные методы интерполяции по данным в точках не позволяют создать цифровую модель, точно и адекватно отражающую небольшие по размерам формы рельефа. Созданный алгоритм позволяет отобразить в модели все имеющиеся формы рельефа дна с максимально возможной детальностью (учитывая разный размер эндогенных и экзогенных образований). Он основан на

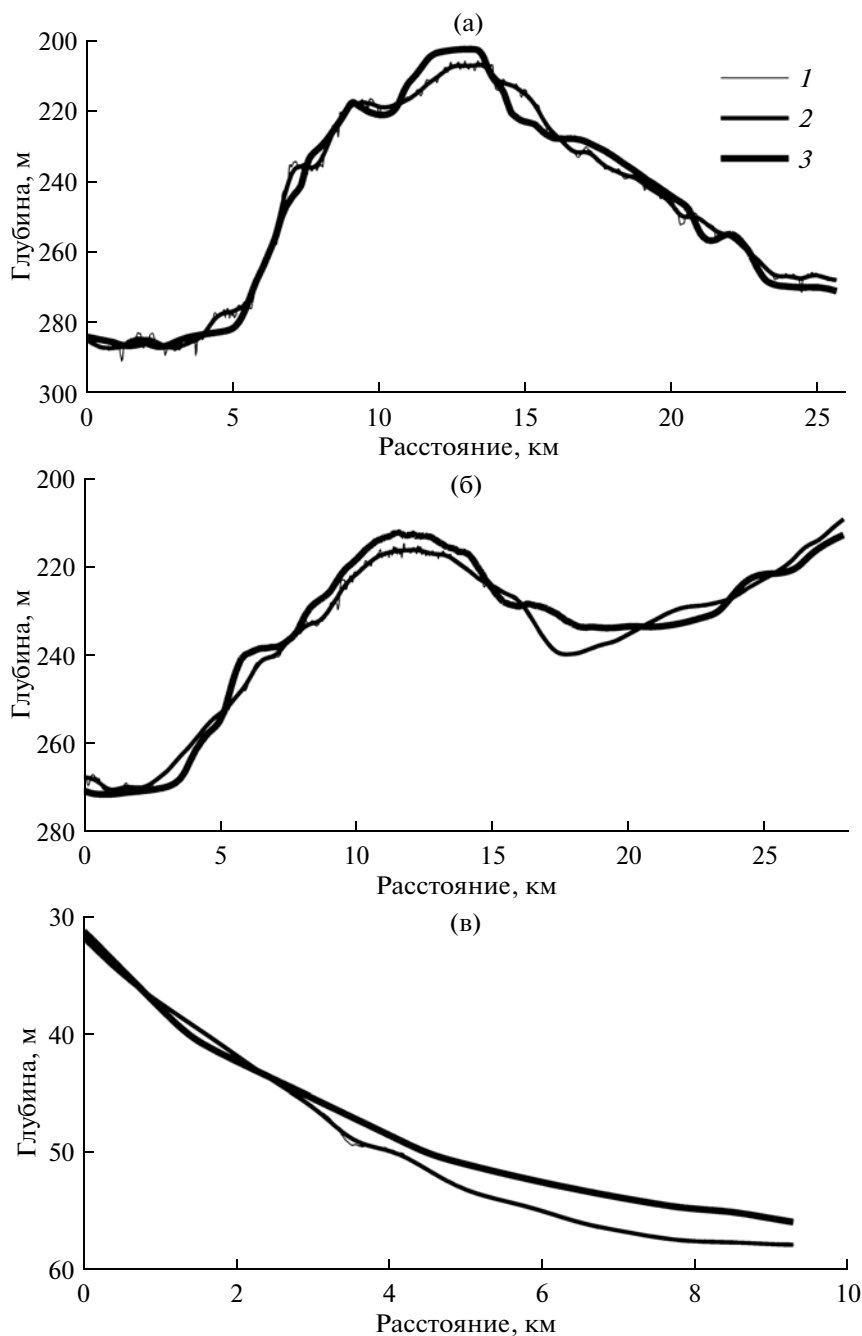


Рис. 5. Сравнение глубин из ЦМР дна и эхолотного промера для галсов № 1 (а), № 2 (б) и № 3 (в): 1 – эхо; 2 – сглаженное эхо; 3 – ЦМР. Положение галсов показано на рис. 2.

быстром вычислении расстояний до двух ближайших изобат разного уровня (расстояние измеряется вдоль линий, не пересекающих изобаты), и последующей линейной интерполяции между уровнями этих изобат. Его главная особенность – интерпретация изолиний как векторных линейных объектов, что позволяет корректно определять значение глубины на участках, ограниченных только изолинией одного уровня, исходя из

значений на смежных участках, и, соответственно, достоверно строить модель в пределах замкнутых повышений и понижений рельефа морского дна.

Созданная ЦМР на примере Белого моря позволяет отображать рельеф дна в заданном масштабе без потери первоначальной степени детальности (масштабы от 1 : 100000 до 1 : 200000) как для всего моря, так и для его отдельных ча-

стей. Кроме этого, ЦМР дна дает возможность строить профили с любой частотой и в любом направлении, а также использовать средства морфометрического анализа в ГИС (расчет углов наклона и пр.) и т.д. При создании карт наличие ЦМР дна позволяет в полном объеме использовать современные геоинформационные (картографические) технологии визуализации рельефа (для показа рельефа суши использована цифровая модель GMTED2010).

Для оценки достоверности ЦМР дна на примере Белого моря было проведено сравнение глубин из ЦМР с глубинами, измеренными при проведении эхолотных промеров в натуральных условиях. Было показано их хорошее соответствие: матожидание и среднеквадратичное отклонение разности глубин по всем галсам общей длиной более тысячи километров равны, соответственно, — 3.14 м и 3.49 м.

Таким образом, предложенные методические решения показали свою эффективность. Данный подход оптимизирует материальные затраты, учитывая большую, а порой огромную, стоимость натуральных изысканий.

Развитие подобных исследований возможно на границе разных отраслей знаний — геоморфологии, геологии, геофизики, картографии, геоинформатики, акустики и математического моделирования. При этом геоморфологические исследования являются основой для изучения морфологии и динамики рельефа; геологические, геофизические, совместно с геоморфологическими, определяют генезис, возраст рельефа и его палеогеографическое развитие (что позволяет проведение морфогенетического анализа); акустические — скорость распространения акустических сигналов, что особенно важно при работе в натуральных условиях, например, при проведении эхолотного профилирования; картографические и геоинформационные дают возможность формировать базы данных, разрабатывать алгоритмы и программы, определять решение картографических и геодезических задач, пересчетов различных проекций и т.д. При этом, новизну имеет не только финальный продукт — собственно цифровая модель рельефа дна, но и методические и методологические основы цифрового моделирования, включая новые классификационные подходы к описанию рельефа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-05-00408-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверьянов С.Б., Ильин А.В.* Концепция геоакустического моделирования дна океана // Проблемы геоакустики: методы и средства / Под ред. Ямщикова В.С. М.: Изд-во МГУ, 1996. С. 54–57.
2. *Берлянт А.М.* Картографический метод исследования. М.: Изд-во МГУ, 1988. 254 с.
3. *Ионин А.С., Павлидис Ю.А., Юркевич М.Г.* Морфогенетическая классификация форм рельефа шельфа Мирового океана // Современные процессы осадконакопления на шельфах Мирового океана. М.: Наука, 1990. С. 24–50.
4. *Коломыйчук Н.Д.* Гидрография. Издание Главного управления навигации и океанографии Министерства обороны СССР. 1988. 363 с.
5. *Кошель С.М.* Моделирование рельефа по изолиниям // Университетская школа географической картографии. К 100-летию профессора К.А. Салищева / Ред. Берлянт А.М. М.: Аспект Пресс, 2005. С. 198–208.
6. *Никифоров С.Л., Кошель С.М., Фроль В.В.* Цифровая модель рельефа дна Белого моря // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2012. № 3. С. 86–92.
7. *Никифоров С.Л., Островский Д.Б., Павлидис Ю.А., Селезнев И.А.* История развития рельефа шельфа Арктики и создание цифровой модели рельефа дна // Изв. РАН, ДВО. 2007. № 1 (3). С. 66–76.
8. *Никифоров С.Л., Попов О.Е., Попов В.А., Селезнев И.А.* Концепция создания единой базы геоакустических данных морского дна и технологии геоакустического моделирования // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. № 6. С. 25–32.
9. *Никифоров С.Л., Попов О.Е., Попов В.А. и др.* Создание геоакустических баз данных на примере обследования акватории Белого моря // Тр. X Всеросс. конфер. “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики”. РАН, Научный совет по проблемам фундаментальной и прикладной гидрофизики. СПб.: Наука, 2010. С. 38–41.
10. *Павлидис Ю.А., Никифоров С.Л.* Обстановки морфолитогенеза в прибрежной зоне Мирового океана. М.: Наука, 2007. 455 с.
11. *Фридман Б.С.* Результаты гидрографических исследований и картографирование рельефа дна Арктического бассейна для определения внешней границы континентального шельфа России в Арктике. М.: Наука, 2007. 258 с.
12. *Danielson J.J., Gesch D.B.* Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010). U.S. Geological Survey Open-File Report 2011–1073. 26 p.
13. *Koshel S.M.* Algorithm for Topologically Correct Gridding of Contour Data // Proceedings of Seventh International Conference on Geographic Information Science (GIScience 2012), Columbus OH. USA. 18–21 September 2012. P. 1–5.
14. *Koshel S.M., Nikiforov S.L., Koshel A.S.* Experiments on Sea Bottom Relief Modelling and Cartographic Representation: White Sea Case Study // Proceedings of International Symposium on Automated Cartography (AutoCarto 2012). Columbus OH. USA. 16–18 September 2012. P. 1.
15. *Nikiforov S.* Morphogenetic classification of seabed // Seabed morphology of the Russian arctic shelf. N.Y.: Nova Publishers, 2010. P. 175–188.
16. *Nikiforov S., Pavlidis Y., Koshel S.* Past seabed environments // Seabed Morphology of the Russian Arctic Shelf / Ed. Nikiforov S. N.Y.: Nova Publishers, 2010. P. 1–14.

17. *Nikiforov S., Pavlidis Yu., Rahold F. et al.* Morphogenetic classification of the Arctic coastal zone // *Geo-Marine Letters*. 2005. V. 25. № 2. P. 89–97.
18. *Nikiforov S., Pavlidis Yu., Rachold V.* Morphogenetic classification of the arctic coastal seabed // *Berichte zur Polar-und Meeresforschung*. 2003. № 443. P. 89–92.
19. *Seabed Morphology of the Russian Arctic Shelf* / Ed. Nikiforov S. New York: Nova Publishers, Inc., 2010. 202 p.
20. *Wunderlich J., Wendt G., Muller S.* High-resolution Echo-sounding and Detection of Embedded Archaeological Objects with Nonlinear Sub-bottom Profilers // *Mar. Geophys. Res.* 2006. V. 26. № 2–4. P. 123–133.

About Methods for Generating of Digital Models of Bottom Topography (by Example of the White Sea)

S. L. Nikiforov, S. M. Koshel, V. V. Frol, O. E. Popov, O. V. Levchenko

The digital elevation model (DEM) of the White Sea bottom was compiled using data from navigation charts of different scales, where additional isobaths were drawn by hand taking into account the classification features of the bottom topography forms. Next procedures were carried out: scanning of these charts, processing of scanned images, isobaths vectorization and creation of attribute tables, vector layers transformation to geographical coordinates as well editing, gathering of the chart's sheets, correction of geometry and attributes. For generation of digital model of bottom topography it is important to choose algorithm which allows to represent all of the sea bottom features expressed by isobaths in most detailed. The original algorithm based on fast calculation of distances up to two different closest isobaths was used. Interpretation of isolines as vector objects is main peculiarity of this algorithm. Comparison of water depth from the compiled digital model with ones from measured by echosounder in situ showed good agreement. Not only derived DEM are relevant, but also developed during its creation methodical and methodological bases of digital modeling, including the new classification approaches to the description of the relief.