

тектонической активностью и высокой антропогенной освоенностью, геосистемные карты приобретают первостепенную важность и позволяют вести рациональное природопользование с минимальным риском для окружающей среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №12-05-00819).

ЛИТЕРАТУРА

1. Очерки по глубинному строению Байкальского рифта / отв. ред. чл.-корр. АН СССР Н.А.Флоренсов – Новосибирск: Наука, 1977 – 152 с.
2. Золотарев А.Г., Савинский К.А. Предрифтовая структурная зона в Прибайкалье // Геология и геофизика. – 1978. - № 8. – с. 60-68.
3. Коновалова Т.И. Геосистемное картографирование / Т.И.Коновалова – Новосибирск: изд-во «Гео», 2010. – 186 с.

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА ДНА СЕВЕРНЫХ МОРЕЙ РОССИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ

*С.М.Кошель, А.С.Кошель, Л.А.Ушакова
Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Географический Факультет
Ленинские горы, Москва 119991, Россия
e-mail: skoshel@mail.ru annkoshel@gmail.com la.ushakova@mail.ru*

MAPPING OF THE RUSSIAN NORTHERN SEAS BOTTOM RELIEF USING DIGITAL ELEVATION MODELS

*S.M.Koshel, A.S.Koshel, L.A.Ushakova
M.V.Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography
Leninskiye Gory, Moscow 119991, Russia
e-mail: skoshel@mail.ru annkoshel@gmail.com la.ushakova@mail.ru*

Abstract. The task of the project is the design of the digital elevation models (DEM) of the bottoms of Barents Sea, Pechora Sea, and the White Sea. Accuracy (resolution) of DEMs allows for adequate delineation of morphological structures and peculiarities of the sea bottoms and the design of bathymetrical and derivative maps. DEMs of the sea bottom were compiled using data from navigation charts of different scales, where additional isobaths were drawn manually 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, merging and joining of the map sheets, correction of geometry and attributes. For generation of digital model of bottom topography it is important to choose algorithm which allows for representation all of the sea bottom features expressed by isobaths in most details. The original algorithm based on fast calculation of distances to the two different nearest isobaths was used. Interpretation of isolines as vector linear objects is the main peculiarity of this algorithm. The resulted DEMs were used to design bathymetrical maps of Barents Sea of 1:2 500 000 scale, Pechora Sea of 1:1 000 000 scale, and White Sea of 1:750 000 scale. Different derivative maps were compiled based on DEM of the White Sea.

Введение

Различная хозяйственная деятельность на шельфах северных морей России должна сопровождаться оценкой ее воздействия на окружающую среду. Знание современного состояния природной среды необходимо для разработки природоохранных мер и прогнозирования антропогенного воздействия на неё. Активизация в последние годы хозяйственной деятельности в районе северных морей требует получения информации о современном состоянии природной среды, а изучение рельефа является одной из её составляющих. С рельефом дна морей связаны многие особенности природных условий морского бассейна, как по горизонтали, так и по вертикали. Рельеф влияет на общую циркуляцию вод, положение и структуру течений, определяет их направление и разделение на отдельные потоки. Рельеф дна и очертания побережий сказываются на приливных явлениях и их взаимодействии с другими видами динамики вод, особенно в дельтах и эстуариях.

Для интегрирования данных о рельефе дна в геоинформационные системы (ГИС) необходимо их представление в виде цифровых моделей. Необходимость создания цифровых моделей рельефа (ЦМР) морского дна определяется также потребностями их использования при создании единой базы

океанографических и гидрографических данных, которая повысит эффективность системы навигационно-гидрографического обеспечения морской деятельности России

Целью данного исследования является построение цифровых моделей рельефа дна Баренцева, Печорского и Белого морей с разрешением, позволяющим адекватно отразить его (рельефа дна) морфоструктурные черты и особенности, и создание на их основе батиметрических и различных производных карт.

Подготовка исходных данных для моделирования

Работа по созданию ЦМР проводилась совместно с сотрудниками Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Основой для построения цифровых моделей рельефа дна стали морские навигационные карты: на территорию Печорского моря масштаба 1:100 000; на территорию Баренцева моря – 1:200 000 и 1:500 000; и на территорию Белого моря – от 1:100 000 до 1:500 000. Карты составлены Главным управлением навигации и океанографии Министерства обороны Российской Федерации (последние издания, данные за 1990-е и 2000-е годы) в проекции Меркатора, использована Балтийская система высот. На картах Печорского моря изобаты проведены через 5 (или 10) м, на картах Баренцева и Белого морей – через 40 (или 50) м, а также даны отметки глубин.

Специалисты из ИО РАН, ориентируясь на имеющиеся изобаты, отметки глубин, данные экспедиционных исследований, знания о строении и генезисе подводного рельефа, вручную проводили на картах дополнительные изобаты с более мелким сечением, чтобы подробнее отобразить морфоструктурные особенности рельефа, показать его мелкие характерные формы. Для акватории Печорского моря были проведены изобаты с сечением 1-5 м, для Баренцева и Белого морей – 5-10 м. Сечение изобат выбиралось из условия наиболее полного, по возможности, отражения имеющихся эндогенных и относительно небольших по размерам экзогенных форм рельефа [Никифоров, 2006; Никифоров и др., 2010; Никифоров и др., 2012; Ждан и др., 2012].

Подготовленные листы карт с нанесенными дополнительными изобатами сканировались, после чего выполнялась геопривязка растровых образов и их обработка для последующей векторизации. После векторизации изобаты были отредактированы и атрибутированы. Данные разных листов были объединены в один файл, для чего потребовалось выполнить так называемую «сшивку» линий (согласование геометрии) с проверкой их атрибутов вдоль границ листов карт. В качестве изобаты с глубиной 0 м использовалась современная береговая линия «World Vector Shoreline», предназначенная для создания карт масштаба 1:250 000 и мельче, имеющаяся в свободном доступе на сайте американской Национальной Организации по Океану и Атмосфере (сайт www.noaa.gov). В итоге предварительной подготовки были созданы три файла с изобатами на территорию Баренцева, Печорского и Белого морей в географических координатах, которые были пересчитаны в равноугольную цилиндрическую проекцию Меркатора (проекция, в которой далее создавалась модель и составлялись карты) с главной широтой 75° с.ш. для Баренцева моря, 69°30' с.ш. для Печорского моря и 66° с.ш. для Белого моря.

При выполнении перечисленных работ неизбежны ошибки в геометрии (небольшие разрывы в линиях) и атрибутах изобат, которые очень сложно обнаружить ввиду огромного объема данных. Благодаря особенностям использованного алгоритма моделирования (его описание дано ниже) работу по окончательной проверке корректности данных удалось существенно облегчить, и выполнялась эта работа уже в процессе создания ЦМР. В идеальном случае, если данные корректны, алгоритм моделирования гарантирует, что исходные изобаты и изобаты, построенные по ЦМР, будут практически совпадать. Там же, где есть ошибки, изобаты заметно различаются. Эти различия хорошо заметны визуально, если для изображения исходных изобат и изобат, построенных по модели, использовать контрастные цвета. На участках, где обнаружены различия, проверяются и корректируются атрибутивные значения и геометрия линий. Исправленные данные сохраняются, на их основе снова вычисляется ЦМР и проводится визуальное сравнение изобат. Процесс повторяется до тех пор, пока не исчезнут визуально заметные отличия.

Создание ЦМР

Для построения цифровой модели использовался пакет MAG, разработанный на кафедре картографии и геоинформатики географического факультета МГУ. Реализованный в этом пакете алгоритм моделирования по изолиниям, позволяет создавать достоверные по высотам ЦМР для любого типа рельефа [Кошель, 2005; Koshel, 2012].

В своей базовой части, как и в некоторых других пакетах, алгоритм основан на быстром вычислении расстояний до двух ближайших изолиний разного уровня (расстояния измеряются вдоль линий, не пересекающих изолинии) и последующей линейной интерполяции. Главной особенностью алгоритма является интерпретация изолиний как векторных объектов, что позволяет корректно определять высоты 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, для его качественной работы необходимо правильно подготовить исходные данные. Оцифрованные изолинии не должны иметь разрывов, должны быть либо замкнутыми, либо начинаться и заканчиваться вне области моделирования. Работа этого алгоритма состоит из двух этапов. На первом определяются пересечения изолиний со всеми

ребрами сетки, включая диагональные. Такие ребра выделяются, а соответствующим узлам сетки приписывается расстояние до точки пересечения с изолинией и значение уровня этой изолинии. Для каждого узла сетки запоминается не более двух расстояний до изолиний с разными значениями уровней. На втором этапе определяются расстояния до двух ближайших изолиний от тех узлов сетки, которым не были приписаны значения на первом этапе. Вычисление расстояний выполняется с помощью волнового итерационного алгоритма. Практический опыт показывает, что в среднем требуется выполнить 10-12 итераций, причем их количество зависит только от рисунка изолиний (извилистости). После этого выполняется дальнейшая обработка узлов с одним значением расстояния с помощью дополнительных циклов итераций.

Благодаря векторному подходу и учету топологической структуры изолиний этот метод, в отличие от других, позволяет создавать достоверные по высотам модели для любого типа рельефа. Использование волнового итерационного алгоритма для вычисления сеточных расстояний делает его высокоэффективным с вычислительной точки зрения. Погрешности в определении расстояний при этом не превышает 12%.

Следует отметить, что программный модуль для моделирования по изолиниям реализован также в пакете ArcGIS (метод *TopoToRaster* в модуле *StialAnalyst*), однако используемый в нем алгоритм не гарантирует совпадения изолиний, построенных по модели, с исходными изолиниями, особенно при наличии многочисленных мелких форм рельефа, поскольку опирается в конечном итоге не на изолинии, а на точки, расставленные вдоль изолиний с некоторым шагом [Кошель, 2005].

Важным моментом при создании сеточной 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. Выбранный нами алгоритм моделирования гарантирует совпадение исходных и модельных изолиний, однако это достигается только при определенном шаге регулярной сетки. Это обусловлено тем, что алгоритмы вычисления изолиний по сеточным моделям используют, как правило, билинейную интерполяцию внутри каждой ячейки сетки и, следовательно, с их помощью невозможно получить, например, замкнутые изолинии с размерами порядка шага сетки. Теоретически для того, чтобы сохранить все мелкие формы изолиний при их построении по модели, шаг сетки должен быть в 2-3 раза меньше формы изолинии, которая должна быть отражена в модели.

Анализ формы и размеров исходных изолиний для выбранных акваторий показал, что оптимальное значение шага сетки в координатах указанных выше проекций составляет порядка 100 м. Меньшее значение шага не добавит новой содержательной информации, а только увеличит ее объем, большее же значение может привести к исчезновению выраженных в изолиниях мелких форм рельефа. Однако при таком шаге размер файла модели, например, на всю акваторию Баренцева моря (площадь которого достаточно велика – 1 424 000 км²) будет составлять порядка 1Гб. Такой объемом затрудняется работа с моделью (а многие программы просто не поддерживают работу с такими большими моделями), поэтому наиболее детальные модели с шагом 100 были построены только на отдельные участки. Для целей картографирования было решено создать единую цифровую модель на всю акваторию Баренцева моря с шагом сетки 400 м в выбранной проекции Меркатора с главной широтой 75° с.ш. Её объем – порядка 220 Мб, что приемлемо для работы в большинстве программ. В географических координатах такой шаг приблизительно соответствует шагу в 23 угловые секунды по долготе и 7 угловых секунд по широте.

Территории Печорского и Белого морей не так велики (площадь Печорского моря составляет порядка 80 000 км², площадь Белого моря – порядка 90 000 км²). Для них созданы ЦМР на всю акваторию с шагом сетки 100 м в проекции Меркатора: с главной широтой 69°30' для Печорского моря и главной широтой 66° для Белого моря. В географических координатах такой шаг приблизительно соответствует шагу в 9 угловых секунд по долготе и 3 угловые секунды по широте для Печорского моря; 8 угловых секунд по долготе и 3 угловые секунды по широте для Белого моря. Объем цифровых моделей в таком случае получается порядка 75 Мб для ЦМ Печорского моря и 130 Мб – для ЦМ Белого моря.

В общем случае ЦМР могут создаваться в любой проекции, в зависимости от решаемых задач и целей. Проекция Меркатора была выбрана исходя из того, что традиционно батиметрические карты создаются в этой проекции. Однако готовую модель можно пересчитать в другую проекцию при необходимости.

В результате в программном пакете MAG были построены: единая цифровая модель рельефа дна Баренцева моря с разрешением 400 м, а также ряд более детальных цифровых моделей на отдельные участки его акватории с разрешением 100 м; цифровые модели рельефа дна Печорского и Белого морей с разрешением 100 м.

Составление батиметрических и производных карт

Наличие ЦМР дает возможность в полной мере использовать геоинформационные технологии для создания изображения рельефа на картах – автоматического вычисления изолиний, создания послойной окраски, использования методов светотеневой пластики, освещенных горизонталей и т.д. [Востокова, Кошель, Ушакова, 2002].

Основным элементом содержания батиметрической карты является изображение подводного рельефа. Нами для его отображения на составленных картах был выбран способ изолиний и послойной окраски в сочетании с аналитической отмывкой. Для создания изображения рельефа дна Баренцева моря методом

послойной окраски была составлена шкала из 8 ступеней (0-50 м, 50-100 м, 100-200 м, 200-300 м, 300-400 м, 400-500 м, 500-600 м, более 600 м), цвет которой плавно изменяется от светло-голубого до темно-синего. Для Печорского моря аналогичным методом была создана шкала из 13 ступеней (0-10 м, 10-20 м, 20-30 м, 30-40 м, 40-50 м, 50-60 м, 60-70 м, 70-80 м, 80-90 м, 90-100 м, 100-150 м, 150-200 м, более 200 м). Для Белого моря была выбрана шкала из 9 ступеней (0-10 м, 10-20 м, 20-50 м, 50-100 м, 100-150 м, 150-200 м, 200-250 м, 250-300 м, более 300 м). Изобаты проведены с тем же сечением, кроме того, на некоторых участках проведена дополнительная изобата 5 м.

Изображение аналитической отмывки получено в пакете MAG на основе созданной ЦМР. При его создании использована комбинация косоуго (северо-западное расположение источника) и отвесного освещения, интенсивность отраженного света вычислялась на основе модели идеального рассеяния Ламберта. Совмещение (наложение) изображений послойной окраски и аналитической отмывки также выполнялось в пакете MAG с использованием нового, специально разработанного для картографических целей алгоритма [Koshel, Nikiforov, Koshel, 2012; Koshel, Mikhal'ov, 2013], позволяющего сохранить визуальное восприятие цветов ступеней послойной окраски. При использовании традиционного метода синтеза изображения – сочетании отмывки в серых тонах и цветного изображения послойной окраски – происходит либо затемнение результирующего изображения (умножение яркостей), либо его осветление (прозрачность) по сравнению с исходной палитрой цветного изображения, что, как правило, приводит к существенным различиям с цветами, отображенными в легенде карты. Частично решить эту проблему помогает использование специального приема при показе цветовой шкалы в легенде, имитирующего плавное изменение яркости или контрастности основного цвета ступени послойной окраски. В пакете MAG реализован специально разработанный для картографических целей алгоритм синтеза, который позволяет зрительно сохранять тот же цветовой тон синтезированного изображения, что представлен в легенде, за счет уменьшения яркости и контрастности на одних участках изображения, и увеличения на других.

При создании батиметрических карт для показа рельефа суши была использована новая общедоступная глобальная цифровая модель рельефа суши GMTED2010 (сайт eros.usgs.gov) с разрешением 7,5 угловых секунд, поскольку хорошо известная модель SRTM не имеет покрытия в столь высоких широтах. Рельеф суши также показан способом послойной окраски с наложением аналитической отмывки.

Наличие ЦМР позволяет не только создавать изображение рельефа современными средствами, но и проводить статистический анализ, на основе которого можно получить такие дополнительные элементы оформления батиметрической карты, как батиграфическая кривая и гистограмма распределения глубин. Эта работа была выполнена при оформлении карты Баренцева моря (рис. 1).

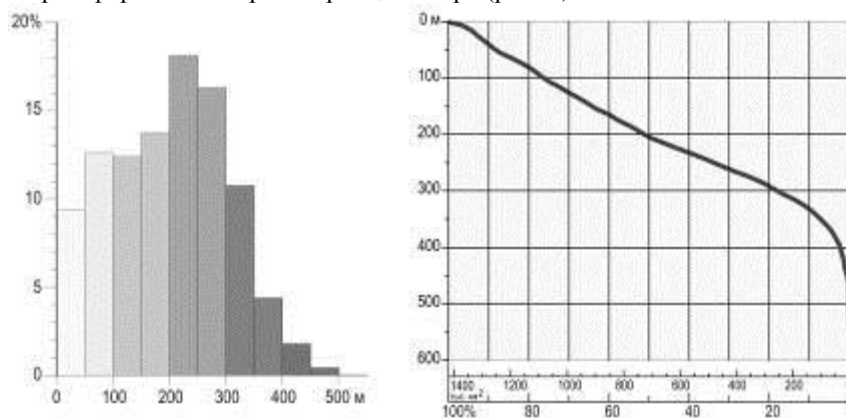


Рис. 1. Гистограмма распределения глубин (слева) и батиграфическая кривая (справа) Баренцева моря, построенная по ЦМР

Окончательное составление и оформление карт (наложение растрового слоя послойной окраски, совмещенной с аналитической отмывкой и векторных слоев с изобатами, береговой линией, границами, гидрографией и т.д.; нанесение подписей форм подводного рельефа и прочих географических элементов; добавление элементов оформления, таких как название карты, легенда, градусная сетка, художественная рамка и др.) выполнялось в графическом редакторе CorelDraw (рис. 2).

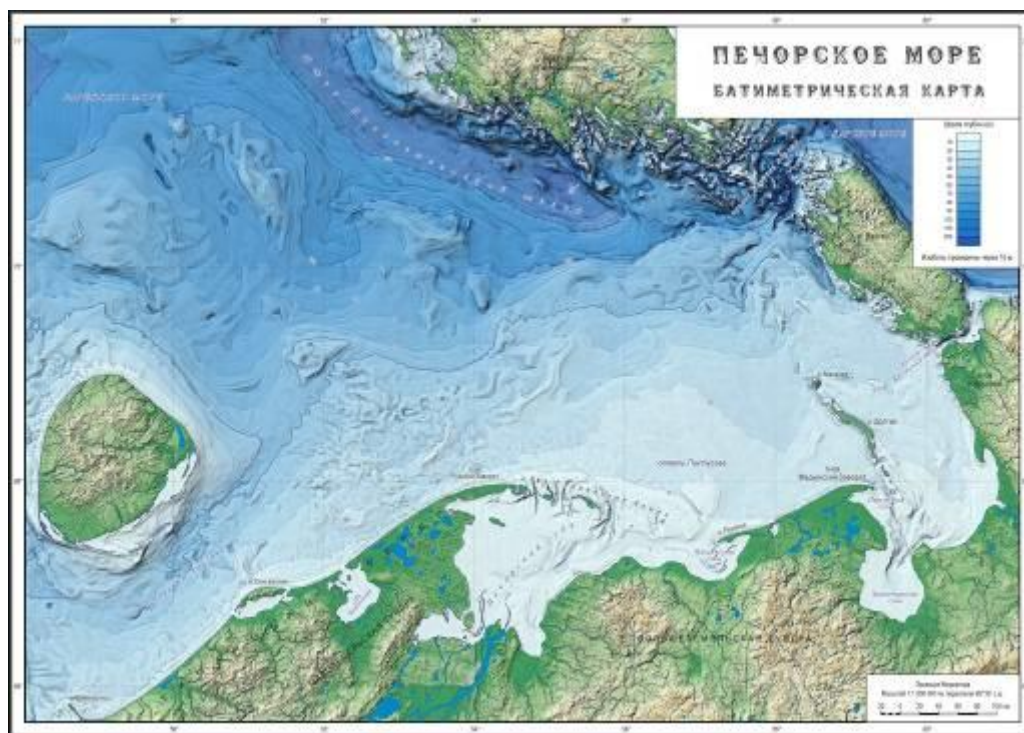


Рис. 2. Батиметрическая карта Печорского моря (уменьшенное изображение)

Для создания производных карт необходимо сначала построить соответствующие цифровые модели производных показателей на основе цифровой модели рельефа дна. В данном исследовании все производные модели и карты создавались только для Белого моря. Для картографирования были выбраны следующие показатели:

- углы наклона поверхности дна (как один из важнейших геоморфологических показателей);
- среднее квадратическое отклонение глубин в скользящем окне заданного размера (статистический показатель, позволяющий оценивать вертикальную расчлененность рельефа).

Цифровая модель углов наклона строилась только для акватории Белого моря. На карте данный показатель показан способом изолиний с послышной окраской, совмещенным с аналитической отмывкой рельефа. Всего было выделено 6 ступеней углов наклона в градусах: менее 0,1; 0,1-0,5; 0,5-1; 1-3; 3-5; более 5. Необходимые элементы содержания, такие, как рельеф суши, гидрография, населенные пункты, подписи объектов были взяты с батиметрической карты Белого моря, карта углов наклона составлялась в том же масштабе – 1:750 000. Чтобы сделать акцент на отображаемом показателе, рельеф суши показан только способом аналитической отмывки.

Цифровая модель среднее квадратического отклонения глубин (высот) в скользящем окне была вычислена для всей территории, отображенной на карте (как для акватории, так и для суши). В результате нескольких экспериментов с размерами скользящих окон было решено оставить 2 модели с размерами окна 1x1 км и 3x3 км. Фрагменты карт, составленных на основе этих двух моделей, показаны на рис. 3.

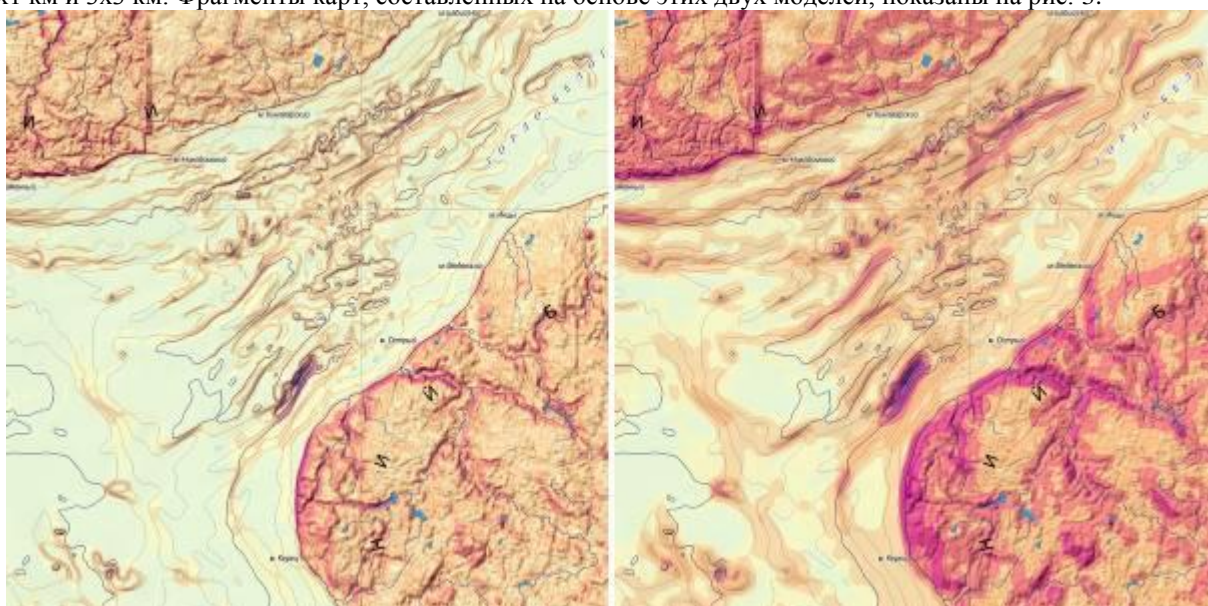


Рис. 3. Фрагменты карт среднеквадратического отклонения в скользящем окне размера 1x1 км (слева) и 3x3 км (справа) для Белого моря, созданных на основе соответствующих производных ЦМР

При сравнении полученных карт хорошо заметно влияние размера скользящего окна. С увеличением размера картина сглаживается, генерализуется, исчезают многие мелкие структуры, хорошо заметные при использовании скользящего окна меньшего размера. Созданные карты могут использоваться для анализа вертикальной расчлененности рельефа, также они позволяют выделять различные типы берегов, различные структурные линии и т.п.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана методика создания цифровых моделей рельефа морского дна на примере некоторых северных морей России. Созданы три цифровые модели рельефа дна (Баренцева, Печорского и Белого морей), соответствующие российским морским навигационным картам, обладающие достаточно высокой точностью и географической достоверностью. Полученные ЦМР могут служить основой для проведения разнообразных прикладных исследований. Области их применения весьма обширны:

- ЦМР могут использоваться для детального и подробного изучения рельефа дна морей океанологами, геоморфологами, а также специалистами из других областей исследований, связанных с океаном;
- на основе ЦМР можно создавать подробные карты рельефа дна, а также производные картографические изображения: карты углов наклона, карты расчлененности рельефа, и т. д.;
- полученные ЦМР позволяют проводить анализ рельефа и его морфометрических характеристик средствами ГИС – строить профили дна, гистограммы распределения глубин, трехмерные изображения и т. д.;
- ЦМР дна также могут использоваться как базовая часть данных при выполнении различных научных расчетов (создание геоакустических, климатических моделей, моделирование течений и т. д.).

Использование ЦМР для создания карт продемонстрировано на примере составления батиметрической карты Баренцева моря масштаба 1:2 500 000, батиметрической карты Печорского моря масштаба 1:1 000 000 (рис. 2) и батиметрической карты Белого моря масштаба 1:750 000. Созданы также различные производные карты на основе ЦМР Белого моря.

Литература

1. Востокова А., Кошель С., Ушакова Л. Оформление карт. Компьютерный дизайн: Учебник (ред. Востокова А.В.). – Москва, Аспект Пресс, 2002. – С. 288.
1. Ждан М.И., Кошель С.М., Никифоров С.Л., Попов В.А., Селезнев И.А. Цифровая модель рельефа дна Баренцева моря. Труды XI всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики". – СПб.: Наука, 2012. – С. 257-259.
2. 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.
3. Никифоров С.Л. Рельеф шельфа морей Российской Арктики: диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук: 25.00.28 / Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова РАН. – Москва, 2006. 314 с.
4. Никифоров С., Кошель С., Фроль В. Цифровая модель рельефа дна Белого моря // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2012. – № 3. – С. 86-92.
5. 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.
6. Сербенюк С., Кошель С., Мусин О. Программы МАГ для создания цифровых моделей геополей // Геодезия и картография. – 1991. – № 4. – С. 44-46.
7. 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.
8. Koshel S., Mikhalyov O. New approaches in cartographic relief representation with morphometric variables // Proceedings of 26th International Cartographic Conference, August 25-30, 2013, Dresden, Germany. — 2013. — P. 743–744.
9. 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. 1-1.