

УДК 551.46

С.Л. Никифоров, С.М. Кошель, Н.О. Сорохтин, Н.Е. Козлов

## Цифровые модели рельефа дна и некоторые возможности их морфометрического анализа

S.L. Nikiforov, S.M. Koshel, N.O. Sorokhtin, N.E. Kozlov

## Seabed digital elevation models and some possibilities of their morphometric analysis

**Аннотация.** Данные о батиметрии морского дна необходимы для морской геологии и геоморфологии, картографии и палеогеографии, геоэкологии и гидроакустики, а также других прикладных направлений исследований. Генеральные цифровые модели рельефа (ЦМР) дна должны являться основой для определения "ключевых" участков шельфа для дальнейшего детального изучения, включая промер глубин. При промышленном освоении шельфа они необходимы на стадии обоснования, планирования и определения георисков, разведки и строительства, а на стадии эксплуатации должны служить 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 натурных изысканий. 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. Методика базируется на анализе и оцифровке навигационных карт разного масштаба и проведении дополнительных изобат с учетом классификационных признаков форм рельефа дна. Используя данные ЦМР дна возможен расчет серии морфометрических показателей, которые базируются на вычислении производных сеточных цифровых моделей по исходной ЦМР.

**Abstract.** Seabed bathymetry is an important component of marine geology and geomorphology activity, so as cartography and paleogeography, geocology and hydroacoustics and other applied areas of research also. General seabed digital elevation model (DEM) could be the basement in the definition of "key" shelf areas for further detailed study, including sound profiling. All of them are required at the stage of industrial planning, construction and exploration, definition of geo-hazard, for the monitoring activity and also required to repel potential threats, including natural ones, etc. Developed methods are the most adequate approach for optimization of material costs, considering the large amount, sometimes huge, costs of marine field research. Simulation of seabed relief within large areas is always connected with the limit of hydrographic survey data. From the other hand, detailed knowledge of the bottom topography for software-based automatic processing is not expected in the near future and is not possible now due to technical reasons. Thus, all available geological and morphological information should be used. Our technique is based on the analysis and digitizing of the navigation charts of different scale and drawing manually additional isobaths under developed classification of seabed relief. Using the DEM it is possible to determine some series of morphometric parameters based on calculating the derivative grid models.

**Ключевые слова:** геоинформатика, цифровые модели рельефа дна, методика, картография, геология, батиметрия, классификация рельефа дна, ГИС технологии, морфометрический анализ, углы наклона, пластика рельефа

**Key words:** geoinformatics, seabed digital elevation models, technique, cartography, geology, bathymetry, classification of seabed relief, GIS technology, morphometric analysis, slope angles, plastic of seabed relief

### 1. Введение

Цифровая модель рельефа (ЦМР) дна морских акваторий является важнейшим компонентом базы пространственных данных геоинформационных систем (ГИС) различной направленности. Данные по свойствам рельефа дна необходимы как для решения фундаментальных задач, так и широкого круга прикладных исследований: 1) проведение мониторинга и определения возможного изменения рельефа и структуры морского дна в условиях нарастающего антропогенного пресса, включая разработку и эксплуатацию месторождений углеводородов; 2) изучение структуры рельефа с целью реконструкции обстановок осадконакопления и формирования рельефа, определения его эволюции и использования полученных данных в интересах отраслей, добывающих полезные ископаемые, а также при решении других практических задач, включая оборонные; 3) изучение геолого-геоморфологических процессов, связанных с опасными природными явлениями (деформации морского дна, оползни, деградация подводных многолетнемерзлых пород и пр.), приводящих к быстрому изменению рельефа, физических и гранулометрических свойств осадков с целью минимизации рисков и предупреждения техногенных катастроф, в том числе в районах разведки, планируемой добычи или эксплуатации сырьевых ресурсов РФ;

4) создание и внедрение наукоемких инновационных технологий геолого-геофизических исследований, в том числе высокоразрешающих сейсмоакустических методов с целью исследования тонкой структуры рельефа дна; 5) планирование и организацию морской деятельности в условиях возможного увеличения сроков навигации в Арктике, а также прогнозные построения динамики рельефа по трассе Северного морского пути, включая вероятные геориски; 6) использование данных о свойствах дна для проектно-строительных работ; 7) развитие оперативной океанологии; 8) разработку и эксплуатацию гидроакустических средств подводного наблюдения, в том числе прогноз их потенциальной дальности действия, а также другую обработку гидроакустической информации и т.д.

## 2. Методика создания ЦМР дна

Моделирование рельефа дна, с некоторой долей условности, можно разделить на две группы – 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 для дальнейшего детального изучения, включая промер глубин с целью решения как фундаментальных, так и 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. Однако до настоящего времени для многих производственных организаций и объединений данная последовательность действий не очевидна (Никифоров и др., 2014).

В силу специфики моделируемого объекта (труднодоступность, высокая стоимость получения исходных данных) методика создания ЦМР морского дна, в отличие от рельефа суши, достаточно сложна, трудоемка, и требует создания научного основания в виде классификации (Nikiforov et al., 2005; Nikiforov, 2010), а также исполнения специальных приемов обработки материала.

Основой для создания ЦМР являлись навигационные карты различного масштаба, которые, кроме всего прочего, привязаны к единой точке "нуля отчета", что является необходимым условием при анализе больших массивов первичного материала. При построении модели традиционные методы интерполяции только по точкам, из-за недостатка данных, не позволяют создать цифровую модель, которая точно и адекватно отражала бы небольшие по размерам формы рельефа дна (например, образованные под влиянием экзогенных факторов). Поэтому ручная обработка карт и проведение дополнительных изобат на основе классификационных признаков и комплексного морфогенетического анализа имеющегося фактического материала, включая данные натуральных исследований, является необходимым этапом в подготовке исходных данных для моделирования. На следующем этапе 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. Подробное описание методики приводится в работе (Никифоров и др., 2012).

При создании ЦМР (сеточной модели, представляющей собой матрицу глубин) дна важен выбор алгоритма, который позволил бы сохранить в модели выраженные в исходных изобатах формы рельефа дна с максимальной детальностью. Нами для этой цели применяется оригинальный, разработанный и реализованный авторами алгоритм, основанный на быстром вычислении расстояний до двух ближайших изобат разного уровня (Кошель, 2005). Его главная особенность – интерпретация изолиний как векторных линейных объектов. Указанный подход гарантирует полное совпадение исходных изобат с изобатами, построенными по цифровой модели. Таким образом, в модели сохраняются все мелкие формы рельефа, выраженные в исходных изобатах на карте. Примеры созданных на основе описанной методики цифровых моделей рельефа дна (картографический облик) представлены на рис. 1 и 2. Рельеф на картах показан способом послышной окраски с наложением аналитической отмывки. На карте Белого моря (рис. 1) для показа рельефа суши использована глобальная модель GMTED2010 (Danielson, Gesch, 2011).

ЦМР позволяет отобразить рельеф дна в заданном масштабе без потери первоначальной степени детальности как для всего моря, так и для его отдельных частей. Кроме этого, ЦМР дает возможность строить профили рельефа дна с любой частотой и в любом направлении, а также использовать средства морфометрического анализа в ГИС. При создании карт ЦМР позволяет в полном объеме использовать современные геоинформационные технологии для отображения рельефа. 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 необходимо 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). Для этого на ЦМР необходимо выделить области, где

изменения геолого-геоморфологических параметров будут относительно невелики, и выполнить совмещение данных ЦМР с данными, полученными в натуральных условиях в тех же координатах. При этом систематизацию (типизацию, районирование) логично проводить согласно с классификацией, которую возможно детализировать в соответствии с целями и задачами исследований (Никифоров и др., 2014).

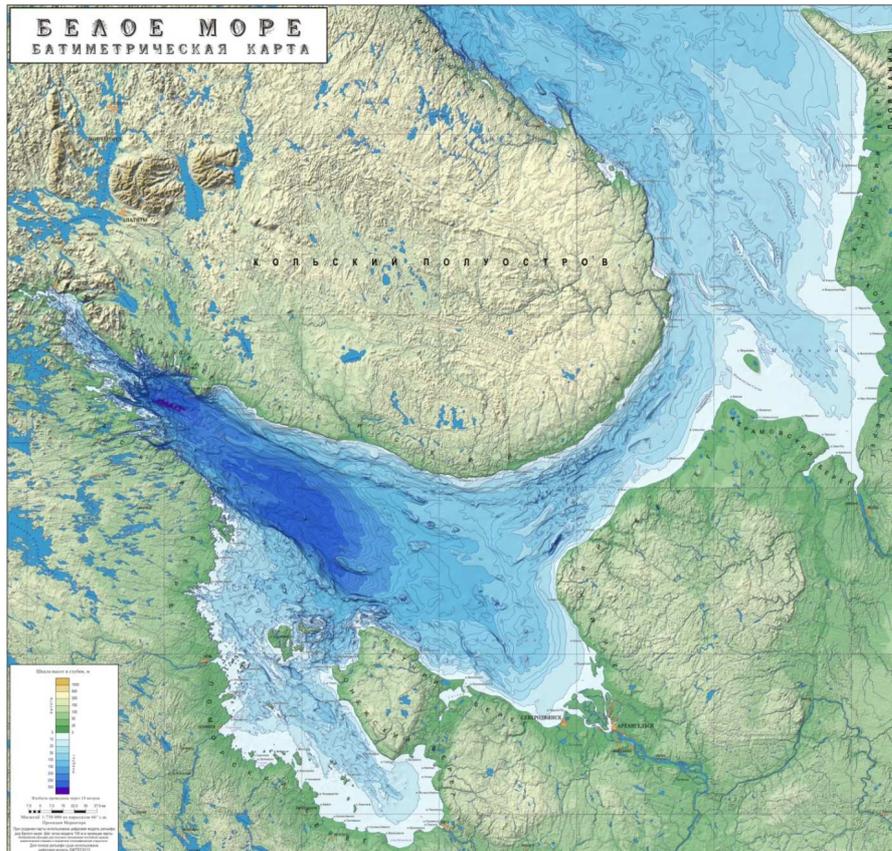


Рис. 1. Батиметрическая карта Белого моря, созданная на основе ЦМР дна

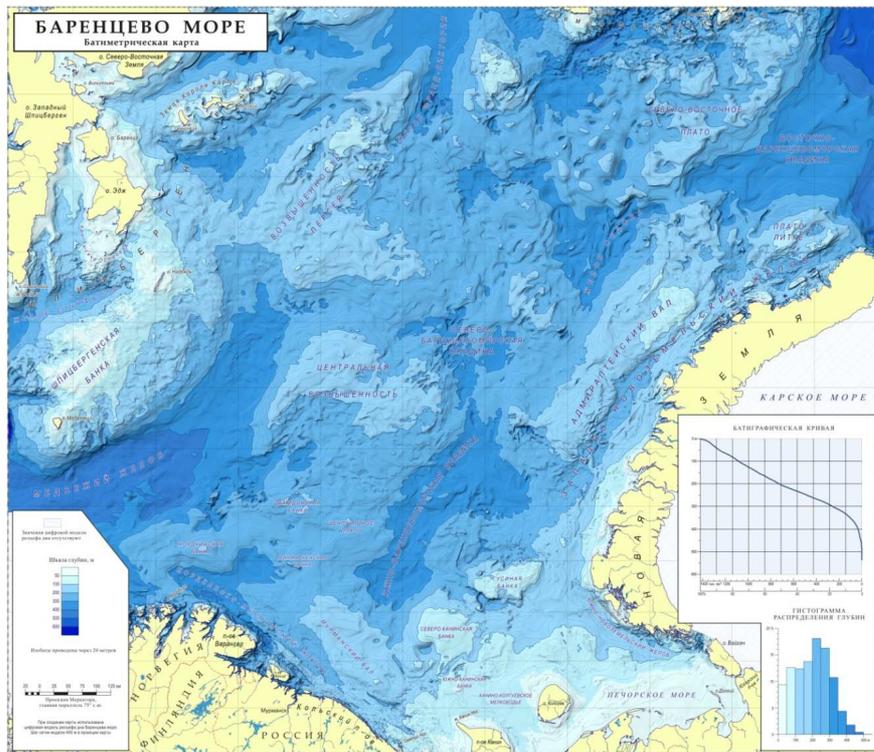


Рис. 2. Батиметрическая карта Баренцева моря, созданная на основе ЦМР дна

### 3. Морфометрический анализ

Используя данные ЦМР дна возможно проведение морфоструктурного анализа на основе ГИС технологий, который направлен на исследование свойств современного и древнего рельефа земной поверхности с целью изучения его происхождения и истории развития. Для проведения морфоструктурного анализа возможно использование любой количественной информации о рельефе суши или, как в нашем случае, морского дна. Так, по данным ЦМР дна возможен расчет серии морфометрических показателей, которые базируются на вычислении производных сеточных цифровых моделей по исходной ЦМР. Морфометрические показатели могут использоваться как непосредственно в виде цифровых данных для дальнейших расчетов, так и для создания на их основе изображений рельефа для визуального анализа.

Одним из основных морфометрических показателей являются углы наклона. Угол наклона  $S$  поверхности (в градусах) в точке с координатами  $(x, y)$  вычисляется по формуле

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

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

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

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 осей  $x$  и  $y$  в выбранной для создания модели проекции (в нашем случае это проекция Меркатора).

Карты углов наклона рельефа дна Белого и Печорского морей представлены на рис. 3 и 4.

Помимо углов наклона по ЦМР может быть вычислен целый ряд других морфометрических показателей, основанных на производных первого и второго порядка. Например, довольно часто используются значения кривизны некоторых нормальных сечений поверхности, а именно, *профильная кривизна* (нормальное сечение плоскостью, содержащей вектор силы тяжести), отражающая изменение скорости переноса масс вдоль линий тока, или, другими словами, ускорение/замедление потоков вещества на поверхности под действием гравитации, и *касательная кривизна* (нормальное сечение плоскостью, перпендикулярной предыдущей), отражающая конвергенцию/дивергенцию потоков (Mitasova, Hofierka, 1993).

Многие алгоритмы вычисления морфометрических показателей базируются на применении так называемого метода "скользящего окна" (иногда используют термин "фильтрация") (Берлянт, 1988). Показатели вычисляются на основе значений исходной матрицы – центр скользящего окна помещается в узел сетки цифровой модели, после чего определяются все узлы сетки, попавшие в заданное окно. Далее, на основе значений в отобранных узлах сетки вычисляется требуемый показатель, и полученное значение приписывается соответствующему элементу новой матрицы. Операция выполняется последовательно для всех узлов сетки цифровой модели рельефа, тем самым на выходе получается новая цифровая модель – матрица значений показателя в узлах исходной сетки. Часто производный показатель вычисляется как линейная комбинация отобранных значений с некоторыми коэффициентами. В этом случае, набор коэффициентов принято называть *фильтром* (линейным), а сам процесс вычисления производного показателя – *фильтрацией*. Фильтрацией можно назвать и вычисление среднего значения по скользящему окну, такой фильтр относится к категории "сглаживающих".

В качестве примера использования метода скользящего окна рассмотрим вычисление производного показателя "*среднеквадратическое отклонение*", который можно интерпретировать как характеристику вертикальной расчлененности рельефа. Значение показателя вычисляется на основе несмещенной оценки дисперсии по формуле:

$$\text{с.к.о. } s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (z_k - \bar{z})^2}, \quad \text{среднее } \bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n z_k,$$

где через  $n$  обозначено количество узлов сетки модели, попавших в скользящее окно, а через  $z_k, k = 1, \dots, n$  – значения исходного показателя в отобранных узлах сетки. Размер скользящего окна подбирается эмпирически с целью наиболее четкого и наглядного выявления морфоструктурных и морфоскульптурных особенностей строения рельефа не только морского дна, но и прилегающей суши (рис. 5).

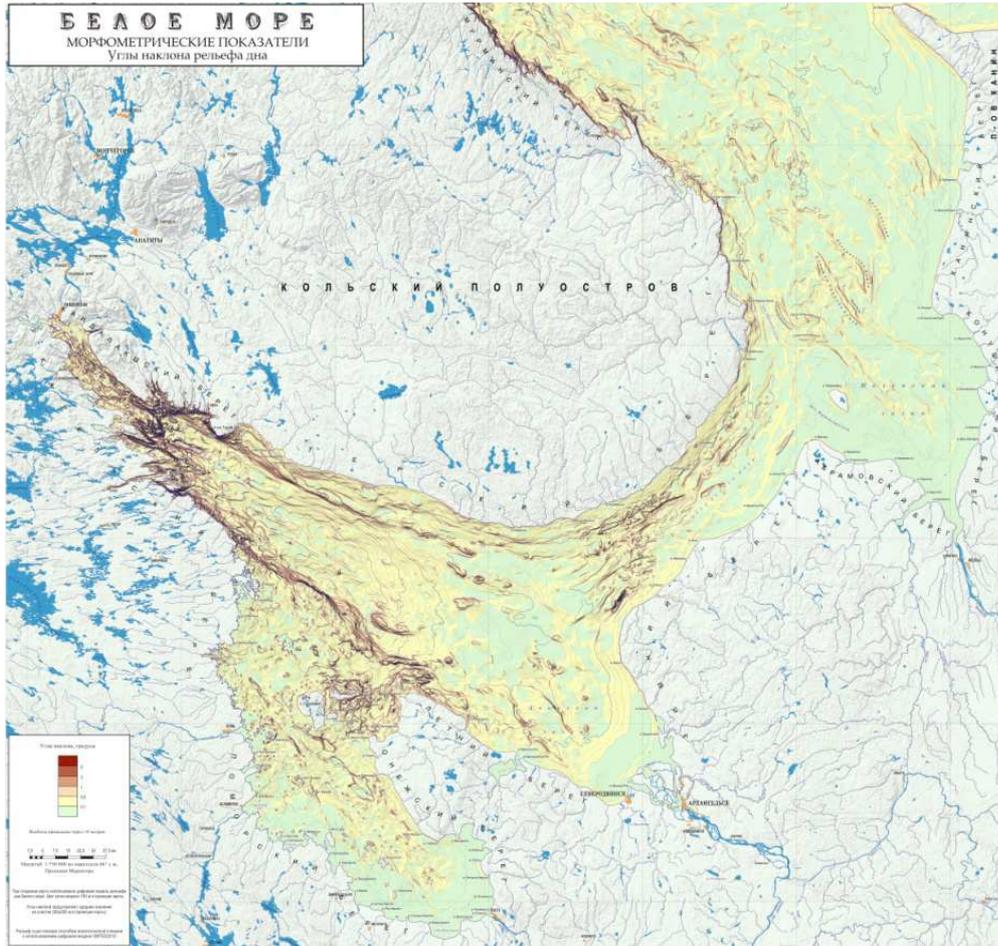


Рис. 3. Углы наклона рельефа дна Белого моря (составлено по ЦМР дна)

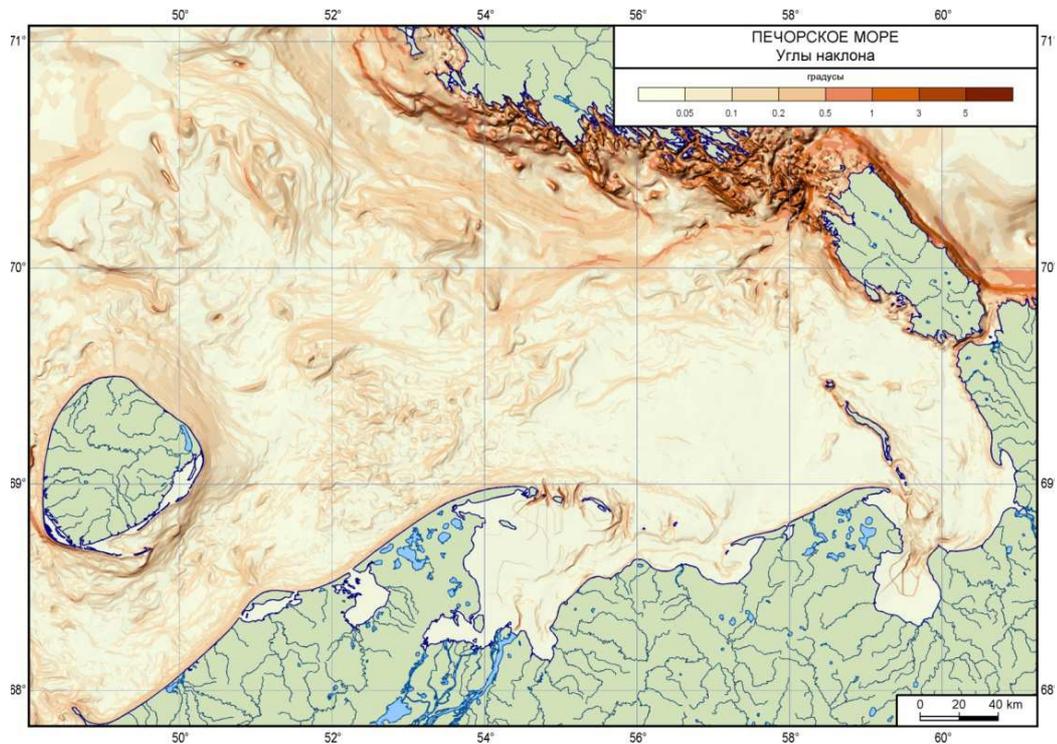


Рис. 4. Углы наклона рельефа дна Печорского моря (составлено по ЦМР дна)

Кроме этого, возможно создание изображений, отражающих пластику рельефа дна, основанное на синтезе нескольких морфометрических показателей. В частности, интересным с точки зрения визуального анализа рельефа выглядит вариант, предложенный в (Chiba *et al.*, 2008) и названный авторами "Red Relief Image Map". Данный способ основан на синтезе изображений двух показателей: углов наклона и усредненной топографической открытости (topographic openness). Углы наклона изображаются в бело-красной непрерывной цветовой шкале (от меньших углов к большим), а топографическая открытость в черно-белой (от отрицательных форм рельефа к положительным). В результате на синтезированном изображении (при правильном подборе закона изменения цвета шкалы) хорошо выделяются холмы (светлый тон) и впадины (темный тон), а также крутые склоны (насыщенный красный цвет) (рис. 6).

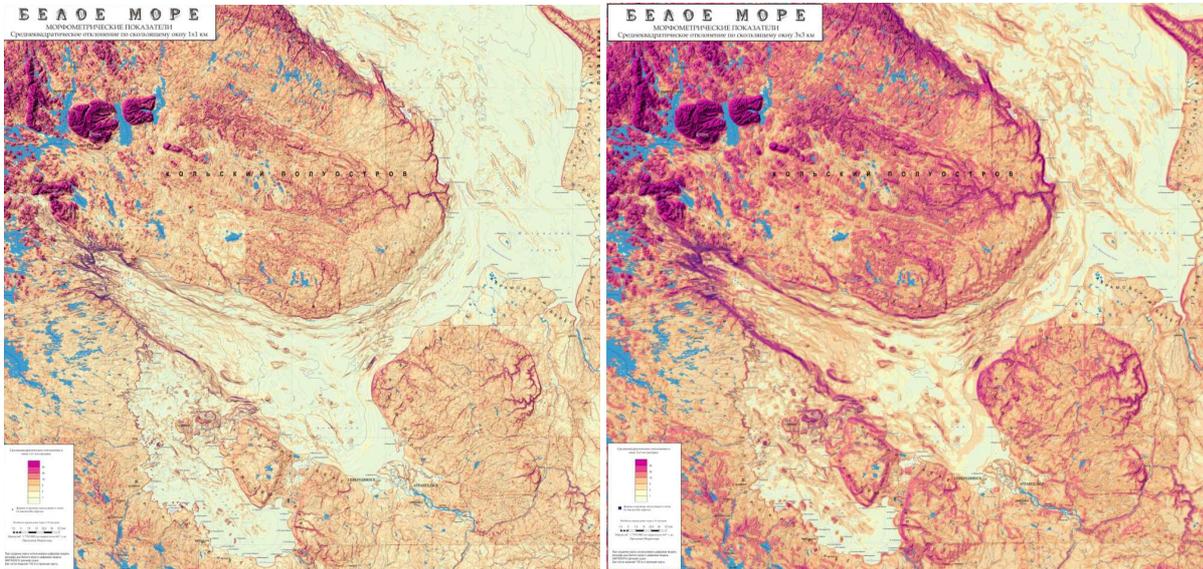


Рис. 5. Среднеквадратическое отклонение по скользящему окну 1×1 км (слева) и 3×3 км (справа)

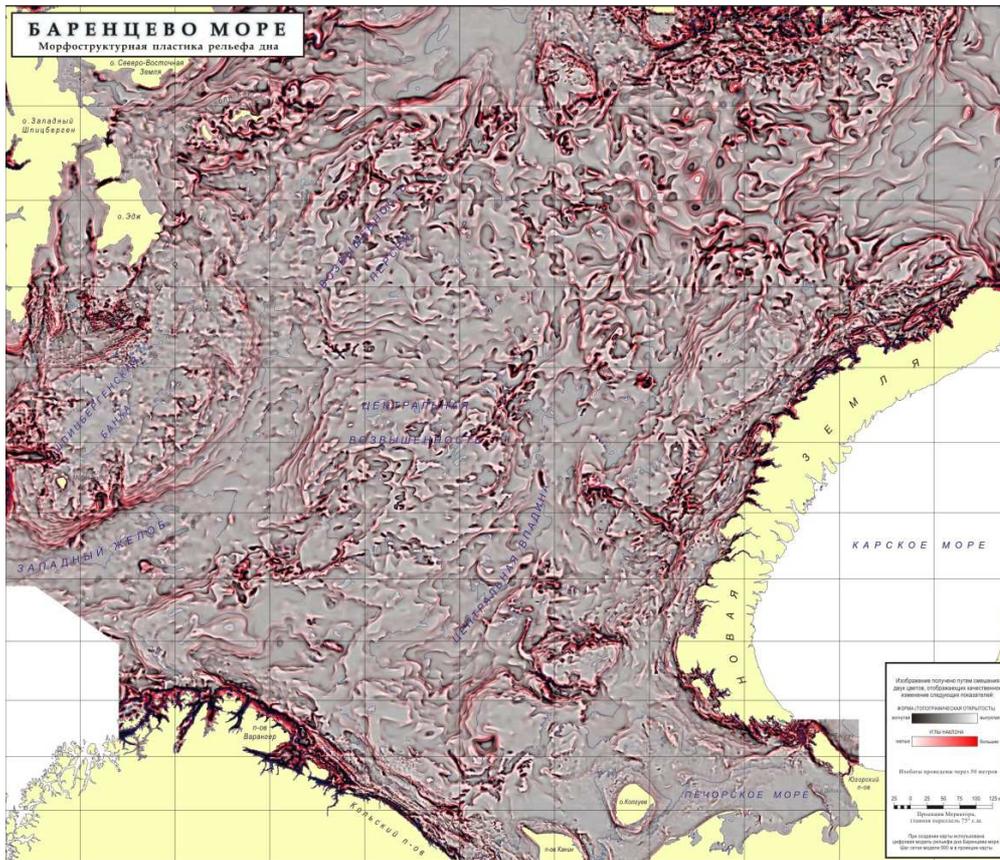


Рис. 6. Морфоструктурная пластика рельефа дна Баренцева моря (составлено по ЦМР дна)

#### 4. Заключение

Цифровая модель рельефа (ЦМР) дна морских акваторий является важнейшим компонентом базы пространственных данных геоинформационных систем. Данные по свойствам рельефа дна необходимы как для решения фундаментальных задач, так и широкого круга прикладных исследований. Генеральные модели рельефа дна должны являться основой для определения "ключевых" участков шельфа для дальнейшего детального изучения, включая промер глубин. При промышленном освоении шельфа они необходимы на стадии обоснования, планирования и определения георисков, разведки и строительства, а на стадии эксплуатации должны служить 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.

Предложенная методика создания ЦМР дна базируется на анализе и оцифровке навигационных карт разного масштаба и проведении вручную дополнительную изобат с учетом разработанных классификационных признаков форм рельефа дна. Одним из ключевых моментов методики является применение для создания модели оригинального алгоритма, позволяющего, в отличие от традиционных методов интерполяции по данным в точках, точно и адекватно отразить в модели все имеющиеся формы рельефа дна, выраженные в изобатах. Его главная особенность – интерпретация изолиний как векторных линейных объектов, что позволяет, в том числе, 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.

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 необходимо провести систематизацию, типизацию и районирование рельефа. Для этого на ЦМР необходимо выделить области, где изменения геолого-геоморфологических параметров будут относительно невелики, и выполнить совмещение данных ЦМР с данными, полученными в натуральных условиях в тех же координатах, при этом систематизацию (типизацию, районирование) логично проводить согласно с классификацией.

Наличие ЦМР дна обеспечивает возможность проведения морфоструктурного анализа на основе ГИС технологий, который направлен на исследование свойств современного и древнего рельефа земной поверхности с целью изучения его происхождения и истории развития. Морфометрические показатели могут использоваться как непосредственно в виде цифровых данных для дальнейших расчетов, так и для создания на их основе изображений рельефа для визуального анализа. Целый ряд морфометрических показателей основан на частных производных первого и второго порядка. Помимо углов наклона (и экспозиции склонов для рельефа суши), наиболее употребительны среди них, в силу их связи с поведением потоков вещества на поверхности под действием гравитации, значения профильной и касательной кривизны поверхности. Многие алгоритмы вычисления морфометрических показателей базируются на применении метода "скользящего окна", когда значение показателя в каждом узле сетки модели вычисляется на основе значений исходной модели (глубин), попавших в окно заданного размера и формы с центром в этом узле. Сюда же входят и методы фильтрации, часто применяемые для обработки растровых изображений.

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 и морфоструктурного анализа); акустические – скорость распространения акустических сигналов; картографические и геоинформационные дают возможность формировать базы данных, разрабатывать алгоритмы и программы, определять решение картографических и геодезических задач и т.д. 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 и проведение морфоструктурного анализа на основе ГИС технологий.

Часть работы, связанная с описанием первичных батиметрических данных, выполнена по государственному заказу № 0149-2014-0032, другая часть, связанная с комплексным анализом картографического материала, выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 14-50-00095.

## Литература

- Chiba T., Kaneta S., Suzuki Y.** Red Relief Image Map: New visualization method for three dimensional data // The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. 2008 Beijing ISPRS Vol. XXXVII. Part B2, 2008. P. 1071-1076.
- Danielson J.J., Gesch D.B.** Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010). U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1073. 2011. 26 P.
- Mitasova H., Hofierka J.** Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis. *Mathematical Geology*. 1993. V. 25, N 6. P. 657-669.
- Nikiforov S.** Morphogenetic classification of seabed // Seabed morphology of Russian Arctic shelf. N.Y., Nova Publishers. 2010. P. 175-188.
- Nikiforov S., Pavlidis Yu., Rahold F. et al.** Morphogenetic classification of the Arctic coastal zone. *Geo-Marine Letters*, Springer Berlin/Heidelberg. 2005. V. 25, N 2. P. 89-97.
- Берлянт А.М.** Картографический метод исследования. М., МГУ, 1988. 254 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.
- 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.
- Никифоров С.Л., Лобковский Л.И., Романкевич Е.А. и др.** О необходимости создания единой базы данных по свойствам строения морского дна. Арктика: экология и экономика. 2014. № 2 (14). С. 31-35.

## References

- Berlyant A.M.** Kartograficheskiy metod issledovaniya [The cartographic method of study]. M., MGU, 1988. 254 p.
- Koshel S.M.** Modelirovanie relefa po izoliniyam [Relief modeling from contour lines] // Universitetskaya shkola geograficheskoy kartografii. K 100-letiyu professora K.A. Salischeva. Red. A.M. Berlyant. M., Aspekt Press, 2005. P. 198-208.
- Nikiforov S.L., Koshel S.M., Frol V.V.** Tsirovaya model relefa dna Belogo moray [Digital terrain model of the White Sea bottom]. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. 2012. N 3. P. 86-92.
- Nikiforov S.L., Lobkovskiy L.I., Romankevich E.A. i dr.** O neobhodimosti sozdaniya edinoy bazy dannyh po svoystvam stroeniya morskogo dna [The need to create a common database on the properties of seabed structure]. Arktika: ekologiya i ekonomika. 2014. N 2 (14). P. 31-35.

## Информация об авторах

**Никифоров Сергей Львович** – Институт океанологии им. П.П. Ширшова, д-р геогр. наук, зав. лабораторией, e-mail: nikiforov@ocean.ru

**Nikiforov S.L.** – Shirshov Institute of Oceanology, Dr of Geogr. Sci., Head of Laboratory, e-mail: nikiforov@ocean.ru

**Кошель Сергей Михайлович** – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, кафедра картографии и геоинформатики, канд. геогр. наук, вед. науч. сотрудник, e-mail: skoshel@geogr.msu.ru

**Koshel S.M.** – Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Cartography and Geoinformatics, Cand. of Geogr. Sci., Leading Researcher, e-mail: skoshel@geogr.msu.ru

**Сорохтин Николай Олегович** – Институт океанологии им. П.П. Ширшова, д-р геол.-мин. наук, глав. науч. сотрудник, e-mail: nsorokhtin@ocean.ru

**Sorokhtin N.O.** – Shirshov Institute of Oceanology, Dr of Geol. & Min. Sci., Leading Researcher, e-mail: nsorokhtin@ocean.ru

**Козлов Николай Евгеньевич** – Геологический институт КНЦ РАН, д-р геол.-мин. наук, зав. лабораторией; директор Апатитского филиала МГТУ, кафедра геологии и полезных ископаемых, профессор, e-mail: kozlovne@afmgту.apatity.ru

**Kozlov N.E.** – Geological Institute KSC RAS, Dr of Geol. & Min. Sci., Head of Laboratory; Director of MSTU Apatity Branch, Geology and Minerals Department, Professor, e-mail: kozlovne@afmgту.apatity.ru