

УДК 551.46:910.2

© С.Л. Никифоров, С.М. Кошель, Н.В. Либина

С.Л. Никифоров, С.М. Кошель, Н.В. Либина

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ РЕЛЬЕФА ДНА БЕЛОГО И БАРЕНЦЕВА МОРЕЙ

Введение

Исследование и освоение ресурсов арктических морей связано с необходимостью разработки передовых технологий для изучения геологических, гидроакустических и гидрографических свойств строения морского дна, включая систематизацию и типизацию имеющихся данных с возможностью их последующей интеграции в цифровые модели, создаваемые на базе геоинформационной системы (ГИС). База данных (БД) по характеристикам морского дна является важнейшим компонентом глобальной многослойной оболочки морских ГИС различного назначения.

Важнейшие компоненты БД – система сбора первичных данных, система хранения и систематизации данных о рельефе и структуре осадочной толщи, собственно БД и построенные на их основе цифровые модели рельефа (ЦМР) дна и осадочной толщи. Под ЦМР дна и осадочной толщи понимается организованная структура файлов, содержащих векторные представления пространственных объектов разного типа, атрибутивную информацию о них и топологические соотношения между ними.

Для создания ЦМР разработаны следующие основные требования к ее построению:

1. Достоверность по глубинам – изобаты ЦМР должны совпадать с исходными натурными данными с точностью, зависящей только от шага сетки ЦМР и метода вычисления координат изобат.
2. Топологическая достоверность – должно соблюдаться соответствие между реальными и модельными элементами рельефа дна. Соответствие этому требованию проверяется визуально по картам производных показателей, линий тока, структурных линий и элементов, аналитической отмывке и др. На построенной модели не должно быть ложных локальных максимумов и минимумов или других очевидных аномалий. Для выполнения первого и второго требований необходимо научное обоснование причин формирования рельефа дна с учетом его происхождения, структурной

принадлежности, палеогеографических и современных особенностей развития.

3. Использование всей имеющейся геолого-геоморфологической информации в максимально возможном объеме – 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. Используемая информация должна быть кондиционной, получена и обработана на сертифицированном оборудовании, без наличия умышленных или неумышленных искажений.

Моделирование рельефа и структуры дна с некоторой долей условности можно разделить на два типа:

- 1) создание генеральных моделей рельефа дна крупных акваторий в условиях резкого дефицита пространственно-координированных значений глубины;
- 2) 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, 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.

Исходные данные и методы создания цифровой модели рельефа дна

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. В настоящее время создание достоверных генеральных ЦМР возможно только путем ручной обработки батиметрических данных на основе природы геолого-геоморфологических явлений [1].

Основой для создания цифровой модели рельефа дна являлись навигационные карты различного масштаба (преимущественно 1:100 000 и 1:200 000). Однако 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. Поэтому, данные гидрографического промера в отрыве от геолого-геофизических и геоморфологических данных могут обеспечить только общее представление о рельефе морского дна. В настоящее время не разработаны методы компьютерного анализа массивов глубин, позволяющих выявлять особенности, а главное, генезис рельефа. По этой причине на навигационных картах вручную проводились изобаты. Сечение изобат выбиралось из условия наиболее полного отражения имеющихся эндогенных и относительно небольших по размерам экзогенных форм рельефа. Затем проводилось 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 [2-5]. Работы выполнялись в программной оболочке ArcGIS.

Следующий этап заключался в создании собственно цифровой модели рельефа дна. Здесь важнейшей задачей являлся выбор алгоритма, который позволил бы сохранить в модели имеющиеся формы рельефа дна, выраженные в изобатах, с максимальной детальностью. 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). Нами использован алгоритм, который основан на быстром вычислении расстояний

до двух ближайших изобат разного уровня (расстояние измеряется вдоль линий, не пересекающих изобаты) [6, 7]. Его главная особенность – интерпретация изолиний как векторных линейных объектов и использование их топологической структуры, 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. Таким образом, в модели сохраняются все небольшие по размеру формы рельефа, выраженные в изобатах на карте. Также важен и выбор шага сетки модели. С одной стороны, должна обеспечиваться необходимая детальность изобат, построенных по модели, и их соответствие исходным изобатам, с другой стороны, излишне мелкий шаг приводит к увеличению объема данных без увеличения их содержательности. Для Белого моря оптимальным с этой точки зрения оказался шаг модели 100 м в проекции Меркатора с главной параллелью 66° (около 3" по широте и 8" по долготе), для Баренцева – 200 м в проекции Меркатора с главной параллелью 75° (около 5" по широте и 18" по долготе). Изображение рельефа выполнено способом послойной окраски в сочетании с аналитической отмывкой. Для отображения суши использована модель GMTED2010 [10, 11]. ЦМР Белого и Баренцева морей представлена на рис. 1. При создании карт наличие цифровой модели рельефа позволяет в полном объеме использовать современные геоинформационные (картографические) технологии.

Созданная ЦМР Белого и Баренцева морей (рис. 1) позволяет отображать рельеф дна без потери первоначальной степени детальности, как для всей охватываемой акватории, так и для ее отдельных частей, строить профили рельефа дна с любой частотой и в любом направлении. Используя данные ЦМР дна, возможно проведение морфоструктурного анализа, который направлен на исследование свойств современного и древнего рельефа земной поверхности с целью изучения его происхождения и истории развития. По данным ЦМР дна можно рассчитать все необходимые морфометрические показатели (цифровая модель углов наклона и т.д.).

В частности, методы морфометрического анализа ЦМР Баренцева моря были использованы для верификации результатов теоретических исследований влияния структурообразующих процессов на характер рельефообразования Баренцевоморского шельфа [8, 9].

В распределении поверхностных отложений и строении верхней осадочной толщи наблюдается

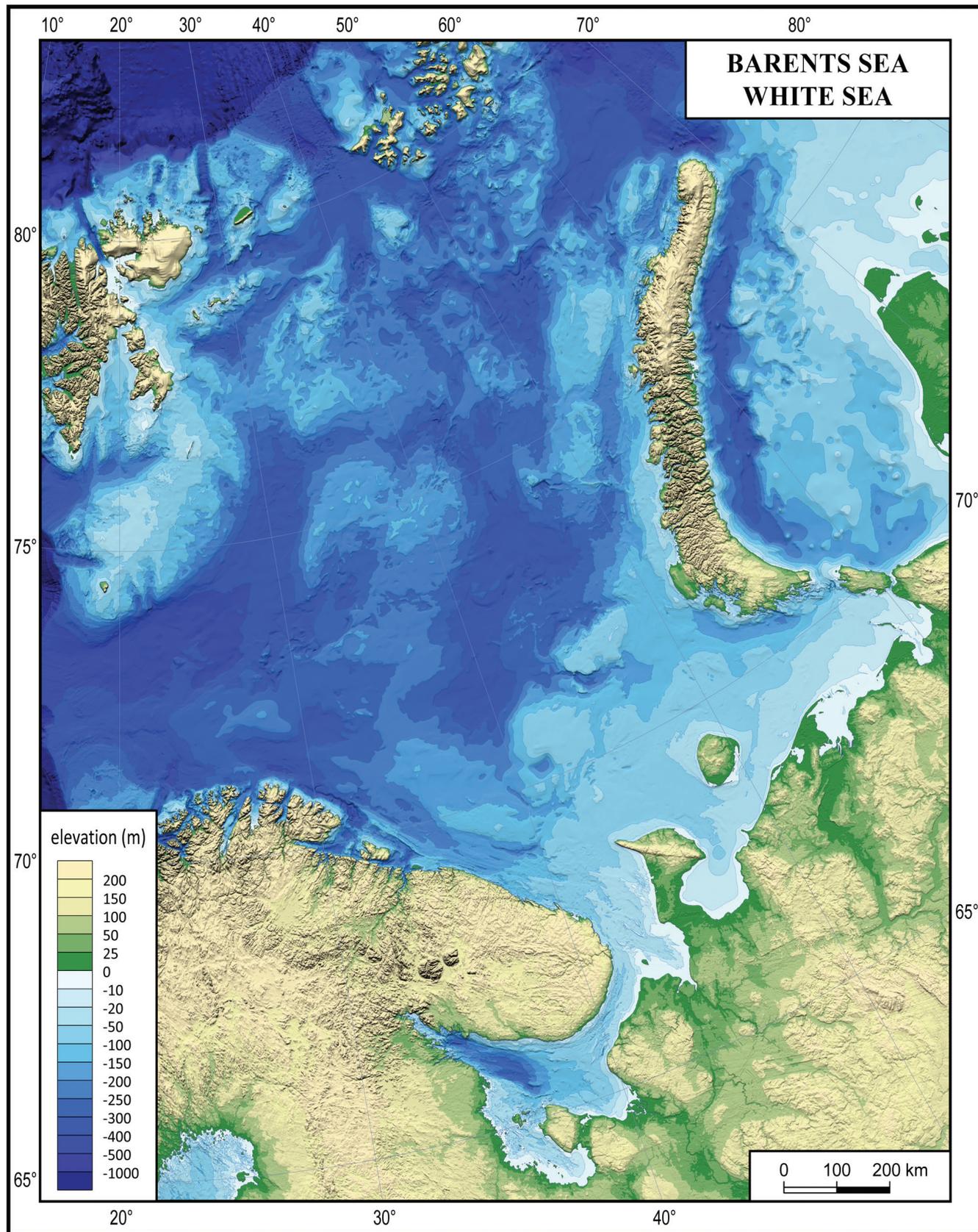


Рис. 1. Цифровая модель рельефа дна Белого и Баренцева морей

Fig. 1. Digital model of the bottom relief of the White and Barents Seas

отчетливая связь с современной поверхностью рельефа дна и его отдельными формами. Поэтому картирование поверхностных осадков должно проводиться по ЦМР.

Заключение

Данные по свойствам рельефа дна, основанные на детальных ЦМР, необходимы как для решения фундаментальных задач, так и широкого круга прикладных исследований, включая:

- 1) изучение структуры рельефа с целью реконструкции обстановок осадконакопления и формирования рельефа, определения его эволюции и использования полученных данных в интересах промышленности, а также при решении других прикладных задач;
- 2) проведение мониторинга и определение возможного изменения рельефа и структуры морского дна в условиях нарастающего антропогенного пресса, включая разработку и эксплуатацию месторождений углеводородов;
- 3) изучение геолого-геоморфологических процессов, связанных с опасными природными явлениями (оползни, деградация подводных многолетнемерзлых пород, эмиссия газов и пр.), приводящими 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 высоко разрешающих 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 изменений рельефа дна и физических свойств осадков по трассе Северного морского пути, включая вероятные геориски;
- 6) использование данных о свойствах дна для проектно-строительных работ;
- 7) разработку и эксплуатацию гидроакустических средств подводного наблюдения, в том числе прогноз их потенциальной дальности действия и т.д.

Работа выполнена по государственному заказу № 0149-2018-0005.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа дна, Арктика, шельф, Белое море, Баренцево море, морская геофизика, геология, геоморфология.

ЛИТЕРАТУРА

1. Свентэк Ю.В. Теоретические и прикладные аспекты современной картографии. – М. : Эдиториал УРСС, 1999. – 80 с.
2. 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.
3. Никифоров С.Л., Кошель С.М., Фроль В.В. Цифровая модель рельефа дна Белого моря // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. – 2012. – № 3. – С. 86-92.
4. Никифоров С.Л., Кошель С.М., Фроль В.В., Попов О.Е., Левченко О.В. О методах построения цифровых моделей рельефа дна (на примере Белого моря) // Океанология. – 2015. – Т. 55, № 2. – С. 326-336.
5. Никифоров С.Л., Кошель С.М., Сорохтин Н.О., Фроль В.В., Попов О.Е., Левченко О.В. Цифровая модель рельефа дна Белого моря: методика построения и краткое описание // Система Белого моря. Том IV: Процессы осадкообразования, геология и история / ред. А.П. Лисицын. – М. : Научный мир, 2017. – С. 157-184.
6. 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.
7. Koshel S.M. Algorithm for Topologically Correct Gridding of Contour Data // GIScience 2012 : Proceedings of Seventh International Conference on Geographic Information Science. – USA : OH : Columbus, 2012. – P. 1-5. – DOI: 10.13140/RG.2.1.2131.8561.
8. Сорохтин Н.О., Никифоров С.Л., Кошель С.М., Козлов Н.Е. Геодинамическая эволюция и морфо-структурный анализ западной части арктического шельфа России // Вестник МГТУ : труды Мурманского государственного технического университета, 2016. – Т. 19, № 1/1. – С. 123-137. – URL: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2016-1/1-123-137>.
9. Nikiforov S.L., Sorokhtin N.O., Koshel S.M., Lobkovsky L.I. Morphostructural Analysis and Seabed Shelf Typing // Oceanology. – 2018. – V. 58, № 2. – P. 266-272.
10. 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.

11. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0 / M. Jakobsson et al. // Geophysical Research Letters. – 2012. – No. 39. – L12609. – DOI: 10.1029/2012GL052219.

REFERENCES

1. Sventek Yu.V. Theoretical and applied aspects of modern cartography. Moscow : URSS, 1999. 80 p.
2. Nikiforov S.L., Popov O.E., Popov V.A., Seleznyov I.A. The concept of developing a unified geoacoustics seabed and technology of geoacoustics modeling // Fundamental and applied hydrophysics. 2010. No. 6. P. 25-32.
3. Nikiforov S.L., Koshel S.M., Frol V.V. Digital terrain model of the White Sea bottom // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. 2012, 3, P. 86-92.
4. Nikiforov, S.L., Koshel, S.M. Frol, V.V., Popov, O.E., Levchenko O.V. On the methods for the construction of seabed digital elevation models (using the example of the White Sea) // Oceanology. 2015. 55(2). P. 296–305. <https://doi.org/10.1134/S0001437015020113>.
5. Nikiforov S.L., Koshel S.M., Sorokhtin N.O, Frol V.V., Popov O.E., Levchenko O.V. Digital elevation model of the White Sea seabed: methodology and a brief description // System of the White Sea. Vol. IV: Sedimentation

processes, geology and history / ed. A.P. Lisitzin. Moscow : The scientific world. 2017. P. 157-184.

6. Koshel, S.M. Relief modeling from contour lines // University School on Geographical Mapping Dedicated to the 100 Anniversary of Professor K.A. Salishchev / A.M. Berlyant (Ed.). Moscow : Aspekt Press, 2005. P. 198-208.

7. Koshel S.M. Algorithm for Topologically Correct Gridding of Contour Data // GIScience 2012 : Proceedings of Seventh International Conference on Geographic Information Science. – USA : OH : Columbus, 2012. P. 1-5. DOI: 10.13140/RG.2.1.2131.8561.

8. Sorokhtin N.O., Nikiforov S.L., Koshel S.M., Kozlov N.E. Geodynamic evolution and morphostructural analysis of the Western sector of the Russian Arctic shelf // Vestnik MGTU. 2016. V. 19, No. 1/1. P. 123-137. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2016-1/1-123-137>.

9. Nikiforov S. L., Sorokhtin N. O., Koshel S. M. Lobkovsky L. I. Morphostructural Analysis and Seabed Shelf Typing // Oceanology. 2018. V. 58, № 2. P. 266-272.

10. 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.

11. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0 / M. Jakobsson et al. // Geophysical Research Letters. 2012. No. 39. L12609. DOI: 10.1029/2012GL052219.