

УДК 911.9:528.94:551.4

Е. И. Газетов

Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИС ДЛЯ ОБРАБОТКИ БАТИМЕТРИИ МОРСКОГО ШЕЛЬФА о. ЗМЕИНЫЙ

В статье приводится пример использования современных ГИС-технологий для построения батиметрической карты морского шельфа. При этом были использованы результаты многолетних экспедиционных исследований глубин прибрежной акватории о. Змеиный сотрудниками Регионального Центра мониторинга природной среды и экологических исследований Одесского национального университета им. И. И. Мечникова. Показаны преимущества ГИС для изготовления, проверки и эффективного использования детальных цифровых моделей рельефа (ЦМР) шельфа. Результаты исследования могут быть использованы для решения практических и научных задач при освоении шельфа моря.

Ключевые слова: ГИС-картографирование, батиметрия, морской шельф, ЦМР

Y. Gazetov

GIS APPLICATION FOR MARINE SHELF BATHYMETRY PROCESSING AT ZMIINYI ISLAND

Example of contemporary GIS technologies application in development of bathymetric map of marine shelf has been described. Results of years of bathymetric surveys conducted by the staff of Regional Centre for Environmental Monitoring and Ecological Studies (I. I. Mechnikov Odessa National University) of the Zmiinyi Island coastal waters have been used. Advantages of GIS for maintenance, checking, and effective use of detailed digital elevation models (DEM) of marine shelf have been shown. The results could be used for practical and scientific tasks of marine shelf development.

Keywords: GIS-mapping, bathymetry, marine shelf, DEM.

Є. І. Газетов

ВИКОРИСТАННЯ ГІС ДЛЯ ОБРОБКИ БАТИМЕТРІЇ МОРСЬКОГО ШЕЛЬФУ о. ЗМІЙНИЙ

У статті наведено приклад застосування сучасних ГІС-технологій для побудови батиметричної карти морського шельфу. При цьому були використані результати багаторічних експедиційних досліджень глибин прибережної акваторії о. Зміїний співробітниками Регіонального Центру Моніторингу природного середовища та екологічних досліджень Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова. Показано переваги ГІС для виготовлення, перевірки та ефективного використання детальних цифрових моделей рельєфу (ЦМР) шельфу. Результати дослідження можуть бути використані для вирішення практичних і наукових задач при освоєнні морського шельфу.

Ключові слова: ГІС-картографування, батиметрія, морський шельф, ЦМР

Введение. Актуальность темы определяется непрерывностью освоения минеральных, биологических, рекреационных и транспортных ресурсов моря. В этой связи необходимы практические шаги по исследованию и картографированию подводного рельефа. Для различных задач требуются карты рельефа дна разного пространственного разрешения и точности. В частности, для научных исследований незначительных по площади, но имеющих большое практическое или природоохранное значение, морских объектов значительно повышаются требования к детальности и наглядности карт морского дна. В современной нам действительности для создания таких карт применяются методы исследования, базирующиеся на высокоточной измерительной аппаратуре и сложном программном обеспечении — геоинформационных системах (ГИС). Применение ГИС-технологий дает совершенно новые возможности для решения любых научных и практических задач в этой области.

Исходные предпосылки. Задача получения информации о рельефе морского дна имеет очень давнюю историю [1]. До 1940–45 при картировании морского дна преобладал метод линейной интерполяции отметок глубин. С 1950 года начали использовать результаты геолого-геоморфологического изучения

морского дна и побережий. Благодаря применению акустического способа измерения глубин, с 50-х годов был развит и усовершенствован метод геоморфологической интерполяции. Этот метод учитывает как эхолотные данные о глубинах, так и геолого-геофизическую интерпретацию рельефа дна [2].

Систематическим изучением глубин Черного моря занимались во времена Петра I (атлас Черного и Азовского морей 1703 г.), в русских экспедициях Г.И. Бутакова, И.А. Шестакова ("Лоция Черного моря" 1851 г.), русского геолога Н.И. Андрусова (две «глубомерные» экспедиции 1890–1891 гг.), в советское время Институт океанологии АН СССР и Институт геофизики АН Грузинской ССР [3, 4]. В настоящее время на украинской части акватории Черного моря батиметрическими исследованиями и изготовлением морских карт, лоций, занимается, в основном, ГУ «Держгидрографія» [5]. В 2002 году в акватории о. Змеиный этой организацией была проведена серия батиметрических работ, на основе которых разработана подробная лоция [6]. В ходе многолетнего мониторинга морских и наземных экосистем на научно-исследовательской станции о. Змеиный Регионального Центра интегрированного мониторинга и экологических исследований

(РЦИМ) Одесского національного університета ім. І. І. Мечникова (ОНУ) виникла потреба в більшій деталізації розподілення глибини моря на шельфі з метою максимального урахування особливостей мікрорельєфу морського дна. Крім того, для наукових і практичних досліджень в районі потребувалося комп'ютерне застосування, що дає можливість локалізації і просторового аналізу параметрів морської середовища на шельфі [7].

Цель исследования. Целью данной работы является изложение результатов и практических рекомендаций по использованию ГИС для изготовления детальной цифровой батиметрической карты на примере шельфа Черного моря вблизи о. Змеиный. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- проанализировать значительный объем эхолотных профилей, полученных сотрудниками РЦИМ в 2008–2013 гг., применив существующие и разработанные дополнительные методические подходы по обработке информации с акустических эхолотов;
- по данным эхолотирования на растровой основе построить цифровую модель рельефа (ЦМР) шельфа о. Змеиный, выделив основные черты строения подводного рельефа;
- провести сравнение полученных результатов с существующей картой морских глубин в этом районе [6] с рекомендациями по использованию полученных результатов.

Изложение основного материала. Исходными материалами и компьютерными программами для проведения исследования послужили:

- результаты измерений глубины моря, представленные эхолотными профилями на шельфе о. Змеиный в 2008–2013 гг. и контрольными измерениями ручным лотом;
- отечественные и зарубежные публикации по методам обработки эхограмм;
- GPS измерения положения береговой линии о. Змеиный в 2004 г.;
- лотия района о. Змеиный ГУ «Держгидрографія» за 2008 год;
- программное обеспечение ARCGIS с расширением Spatial Analyst.

Измерения глубины моря проводились эхолотами «Lowrence LCX-15CT» и «SeaCharter 640сDF» на частотах 50 и 200 кГц с точностью определения глубины места — 0,1 м и координат — 1–3 м (в системе WAAS). Определение местоположения плавсредства фиксировалось GPS-приставками ежесекундно, глубина — до нескольких раз в секунду. Результаты измерений в непрерывном режиме записывались в файлы внутреннего формата эхолотов — *.slg. Акватория площадью около 4 км². была покрыта зональными, меридиональными и диагональными (проверочными) профилями, находящимися на расстоянии 50–100 м друг от друга и на расстоянии 0–1300 м от береговой линии острова. Общее количество записанных профилей — 112.

Полученные записи эхолотирования экспортировались на программном обеспечении эхолотов в тек-

стовый формат и обрабатывались в Excel с целью удаления записей без координат и забракованных самими приборами. В итоге общее количество измерений сократилось до ~ 65000. Файлы внутреннего формата эхолотов несут в себе значительное количество сопутствующей (кроме глубины и координат) информации (27 позиций только в экспортируемом в текст варианте), расшифровать которую без специализированного дорогостоящего программного обеспечения в настоящее время не представляется возможным. Однако в процессе обработки удалось выяснить, что даже те данные, смысл которых понятен, позволяют установить некоторые критерии для отсева ошибочной информации, полученной вследствие отражения акустических сигналов от близко расположенных подводных скал. В частности, для этих целей использовались данные под наименованием «Depth», «TopOfBottomValid». Кроме того, информация о глубине переводилась из футов в метры, а информация о местоположении из внутренней метрической системы эхолотов в географическую систему координат WGS84.

Предварительно обработанные в Excel записи эхолотирования экспортировались в среду ARCGIS, где и проводилась окончательная обработка данных:

- учтены данные о величине заглубления акустических зондов эхолотов на разных профилях;
- удалены записи, в которых разница «Depth» и «TopOfBottomValid» превышала 1,2 м — величину, выведенную экспериментально на основе измерений глубины моря ручным лотом;
- попарно проведено визуальное и программное сравнение значений глубин пересекающихся профилей с отбраковкой недостоверных данных в случае, если разность глубин превышала 0,5 м;
- также проведено визуальное сравнение эхолотных измерений и значений глубины моря, полученных ручным лотом, с целью выбраковки некачественных измерений.

В результате проведения вышеизложенных операций был получен массив данных глубины моря — 25000 измерений, включающий точки береговой линии острова с глубиной — 0 м. Колебаниями уровня моря в данном исследовании пренебрегли, т. к. по результатам мониторинга РЦИМ в период проведения эхолотирования амплитуда колебаний уровня была 24 см, что составляет 0,6% от амплитуды изменений глубины моря на обследованной части шельфа (38,5 м). Влияние волнения также не учитывалось, т. к. эхолотирование проводилось преимущественно в штилевую погоду или при волнении < 0,5 м.

Дальнейшая обработка результатов эхолотирования проводилась инструментом приложения Spatial Analyst — «Topo to Raster», производной программы ANUDEM (Австралийский национальный университет ЦМР) [8]. Этим инструментом, предусмотренным для создания гидрологически корректных цифровых моделей рельефа, был рассчитан растр глубин обследованной акватории с пространственным разрешением — 0,1 секунды (2–3 м) (рис. 1). В «Topo to

Raster» применяется итеративный метод интерполяции конечной разницы. Он оптимизирован таким образом, чтобы использовать вычислительную эффективность методов локальной интерполяции (обратно взвешенного расстояния), непрерывность поверхности методов глобальной интерполяции (Kriging, Spline) и учет резких изменений поверхности (хребты, крутые обрывы).

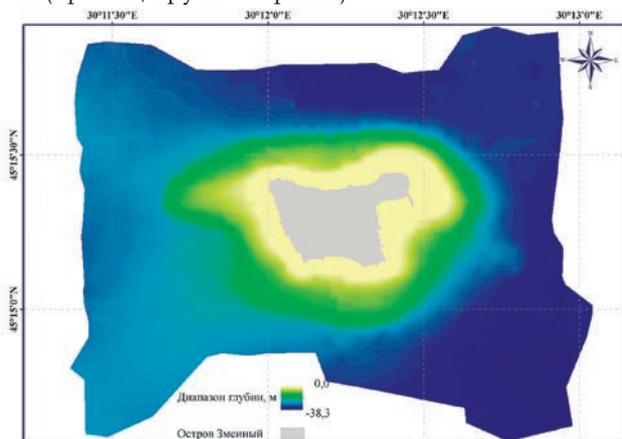


Рис. 1 Растр глубин моря на шельфе о. Змеиний по данным РЦИМ

Те ячейки выходного растра, которые оказываются вне промерных профилей и на твердой поверхности, автоматически отсекаются указанным инструментом под обрабатываемый экстенд. В инструменте «Торо to Raster» присутствует набор процедур, позволяющий учесть любые особенности рельефа. Однако, для этой работы применялась только оптимизированная интерполяция и указание береговой линии как барьера.

Следующей процедурой, позволившей отфильтровать шумы в эхолотных измерениях, было использование функции «Focal Statistics» приложения Spatial Analyst. Этой функцией каждая ячейка выходного растра была осреднена по квадратам со стороной 16 м, что соответствует размеру ячейки выходного растра принятому по формуле: $\Delta s = A/2\sum l$, где: Δs — размер ячейки; A — размер исследуемой площади; $\sum l$ — кумулятивная сумма длины получаемых изолиний требуемой частоты (1 м) [9]. Такое обоснование размера ячейки было сделано в силу того, что размер ячейки растра ЦМР имеет значительное влияние на производные переменных местности, таких как уклон, аспект и кривизна.

Очевидно, что качество ЦМР определяет качество последующего геоморфометрического анализа. Расхождения в ЦМР могут появляться из случайных ошибок при эхолотировании, а также систематических ошибок при интерполяции. Для оценки качества ЦМР и обнаружения ошибок во входных данных существуют различные процедуры. Основными из них являются визуальное сравнение выходного растра и изолиний с существующей картой глубин и изолиниями (рис. 2), вычисление среднеквадратичной ошибки при создании ЦМР (RMSE — Root Mean Square Error), а также расчете параметров поверхности — наклона, аспекта и кривизны, учитывающих свойства матриц высот. Инструмент

«Торо To Raster» генерирует подробный доклад диагностики ошибок и количества мест так называемых «утечек» (ложных ям), что является существенным для коррекции исходных данных и позволяет подобрать оптимальные параметры интерполяции.

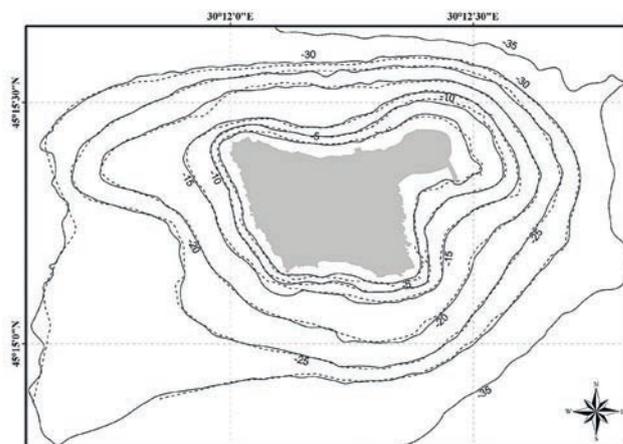


Рис. 2 Сравнение расположения изобат лоции 2002 г. (штрихованная линия до 30 м) и изобат по растру глубин РЦИМ (сплошная линия до 35 м)

Приведенные рисунки 1, 2 в целом повторяют основные особенности подводного рельефа лоции 2002 г., что свидетельствует о правильности расчетов выходного растра. В файле диагностики ошибок «ТороToRaster» RMS1 было равно 1, количество «утечек» — 1345. Исправление «утечек», т.е. коррекция глубин была проведено инструментом «Fills sinks» из приложения Spatial Analyst методом наполнения ям за счет повышения значений сетки [10].

На рисунках 1, 2 прослеживается вытянутая пологая структура шельфа в западном и юго-западном направлении от острова на фоне более резкого увеличения глубины в северной и северо-восточной части шельфа. Между тем, несмотря на повторение основных особенностей лоции 2002 г., детализация растра глубин до 16 м в ячейке позволила сделать вывод о существовании значительно более сложной структуры рельефа дна на шельфе о. Змеиний, что проиллюстрировано на рисунке 3.

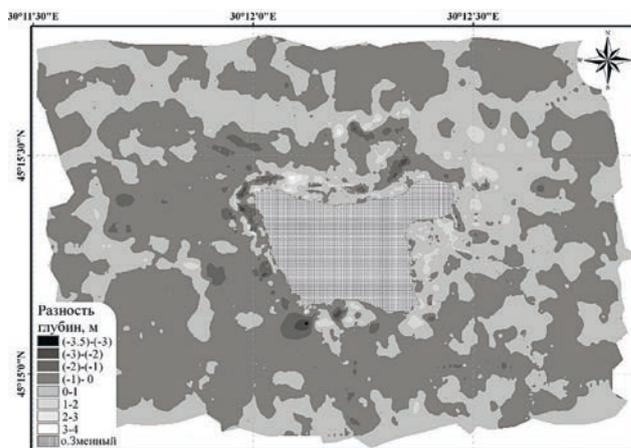


Рис. 3 Разность глубины моря по лоции 2002 г. и растру глубин РЦИМ

В частности, отмечается наличие на шельфе у о. Змеиный большого количества локальных понижений и скальных возвышений, которые не были отражены в предыдущем варианте карты глубин 2008 г.

Выводы и перспективы использования. Использование современных ГИС-технологий позволяет выполнять подробное картографирование подводного рельефа, а также проводить детальную и точную оценку качества используемых батиметрических данных. Построенные на основе ГИС цифровые модели рельефа шельфа являются удобным и гибким инструментом для решения практических задач гидрографии и для научных исследований. Благодаря заложенному в ГИС математическому аппарату появилась возможность не только быстро и точно провести наглядную визуализацию мельчайших подробностей ложа моря, но и выполнить пространственный анализ параметров водной среды, их изменения во времени, учесть их взаимосвязь и влияние рельефа дна.

Благодаря полученным возможностям в ближайшем будущем планируется использовать построенную модель шельфа о. Змеиный для обработки и анализа накопленной в РЦИМ информации по морской экосистеме.

Благодарности. Автор статьи выражает благодарность руководителю РЦИМ Мединцу В.И. за постановку задачи и постоянное внимание к выполнению работы, сотрудникам РЦИМ Сучкову И.А., Снигиреву С.М. за помощь в проведении эхолотирования, сотрудникам Павлик Т.В. и Котогуре С.С. за первичную обработку эхограмм, а также другим сотрудникам, принимавшим участие в сборе информации для этого исследования.

Исследования выполнены в рамках научно-исследовательских проектов ОНУ, которые финансировались из бюджета Министерства образования и науки в 2008 – 2013 гг.

Рецензент: доктор геолого-минералогических наук Е.А. Черкез

Литература:

1. Агапова Г.В. Исследование и картографирование подводного рельефа в познании природы Мирового океана: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук: спец. 07.00.10/Агапова Галина Владимировна. — М., 2008. — 26 с.
2. Леонтьев Н.Ф. Географические основы картографирования подводного рельефа на гипсометрических картах/Н.Ф. Леонтьев. — М.: Геодезиздат, 1961. — 205 с.
3. Черное море: сборник/Вылканов А., Данов Х., Маринов Х. и др.: Пер. с болг. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 408 с.
4. Степанов В.Н. Черное море. Ресурсы и проблемы/В.Н. Степанов, В.Н. Андреев. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 160 с.
5. Офіційний сайт ДУ «Держгідрографія» [Електронний ресурс]/ДУ «Держгідрографія». — 2014. — Режим доступу: <http://www.hydrography.com.ua>
6. Морська навігаційна карта № 3708, о. Зміїний [Карта]. — 1:5000. — Київ: ДУ «Держгідрографія», 2008. — 1 л.
7. Газетов Е.И. ГИС – Модель острова Змеиный и прилежащего шельфа Черного моря/Е.И. Газетов, В.И. Мединец//Екологічні проблеми Чорного моря: Міжнарод. наук.-практ. конф., Одеса, 30 – 31 жовтня, 2008 р.: Зб. наук. статей. — Одеса: ІНВАЦ, 2008. — С. 56 – 60.
8. Hutchinson, M.F. Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure/M.F. Hutchinson, T. Xu, J. A. Stein//Geomorphometry 2011.: Ed. by T. Hengl, I.S. Evans, J.P. Wilson and M. Gould. — Redlands, USA: 2011. — P. 19 – 22.
9. Hengl T. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications/T. Hengl, H.I. Reuter//Developments in Soil Science. — Elsevier, 2008. — Vol. 33. — 772 pp.
10. Tarboton, D. G. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data/D. G. Tarboton, R. L. Bras, I. Rodriguez-Iturbe//Hydrologic Processes. — 1991. — Vol. 5 (1). — P. 81 – 100.