

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОГРАФИИ ЧЕРНОГО МОРЯ ДЛЯ АЛЬТИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2011 г. А. А. Кубряков, С. В. Станичный

Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь

*E-mail: arskubr@gmail.com

Поступила в редакцию 01.10.2010 г.

В работе применен новый подход для восстановления средней динамической топографии Черного моря. При этом были использованы контактные наблюдения — измерения SVP — дрейфтеров и данные вертикального зондирования температуры и солености совместно с измерениями аномалий уровня моря, полученными по данным спутниковой миссии Torex/Poseidon. Абсолютный уровень моря, восстановленный по альтиметрическим данным с использованием средней динамической топографии, полученной в работе, был сопоставлен с динамическим уровнем, полученным по независимым судовым съемкам. Сопоставление показало, что представленная в работе методика позволяет более точно определять динамическую топографию Черного моря по сравнению с работами предыдущих авторов. Результаты этой работы будут полезны для восстановления полей геострофических течений по данным спутниковой альтиметрии.

Ключевые слова: альтиметрические спутниковые данные, динамическая топография, аномалии уровня моря, Черное море

ВВЕДЕНИЕ

Современные спутниковые альтиметрические миссии дают возможность получать регулярные данные об уровне Черного моря. Такого рода данные могут быть использованы для изучения особенностей мезомасштабных процессов при прямом анализе (Коротчаев et al., 2001), усвоении альтиметрических измерений в динамических моделях (Коротчаев и др., 1998) и для расчета скоростей геострофических течений по наклону уровня моря относительно поверхности геоида. Однако невысокая точность измерений геоида не позволяет прямым методом по измерениям альтиметра восстанавливать динамическую топографию морской поверхности. Вместо этого для анализа изменчивости уровня моря используется аномалия уровня поверхности (АУП) от осредненного за период 1993–1999 гг. поля уровня моря, полученного на основе измерений спутниковых альтиметров миссии Torex/Poseidon (Hernandes et al., 2000). Основные сложности использования альтиметрических данных для изучения динамики поверхностного слоя связаны с проблемой восстановления динамической топографии на основе измерений АУП. Целью данной работы является построение средней динамической топографии (СДТ) — поля, которое необходимо прибавить к АУП для восстановления мгновенной динамической топографии.

Существует несколько основных подходов к решению задачи об определении СДТ: расчет средней топографии на основе климатических данных (Lev-

itus et al., 2001); топография, рассчитываемая на основе моделирования циркуляции океана (Кныш и др., 2002); использование спутниковой гравиметрии для расчета точного геоида и построения абсолютной динамической топографии на его основе (Johannessen et al., 2003); “синтетическая” климатология (Rio, 2003). В нашей работе используется методика, основанная на “синтетическом” подходе: СДТ определяется на основе сопоставления данных контактных и альтиметрических измерений. Этот подход в настоящее время считается наиболее перспективным (Hernandez et al., 2001). В качестве контактных измерений использовались данные дрейфтеров и судовых гидрологических съемок. Восстановленная в работе топография была сопоставлена с независимыми океанографическими съемками. Результаты валидации были сравнены с результатами, полученными с использованием топографии, восстановленной с помощью модели динамики моря (Кныш и др., 2002).

СИНТЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД

Синтетический метод восстановления средней динамической топографии базируется на основе комбинации контактных и альтиметрических измерений. Для оценки СДТ $H(r)$ в точке r в момент времени t из полной динамической топографии $h_{is}(t, r)$, рассчитанной по контактными измерениям, вычита-

ют аномалию $h'(t, r)$, полученную по данным альтиметрии (Rio, Hernandez, 2004)

$$h_{is}(t, r) - h'(t, r) = H(r). \quad (1)$$

Отметим, что хотя оба измерения содержат часть сигнала, отвечающую за временную изменчивость уровня моря, их разность содержит только стационарную во времени часть – среднюю динамическую топографию. Благодаря этому для расчетов СДТ можно использовать весь массив контактных данных, существующий после 1992 г. – даты запуска высокоточных альтиметрических миссий Torex/Poseidon и ERS-1 (Rio, Hernandez, 2004).

Для определения СДТ “синтетическим методом” в качестве контактных данных можно также использовать измерения скоростей. Зная полную геострофическую скорость $u_{is}(r, t)$, $v_{is}(r, t)$ и аномалии компонент скоростей $u'(r, t)$, $v'(r, t)$, вычисленных из аномалии уровня по формуле (1), можно получить оценку средней геострофической скорости в точке $U(r)$, $V(r)$:

$$\begin{aligned} v_{is}(t, r) - v'(t, r) &= V(r), \\ u_{is}(t, r) - u'(t, r) &= U(r). \end{aligned}$$

И далее, используя уравнения геострофического баланса, можно определить градиенты средней динамической топографии $H(r)$:

$$U(r) = -\frac{g}{f} \frac{\partial H(r)}{\partial y}, \quad V(r) = \frac{g}{f} \frac{\partial H(r)}{\partial x}, \quad (2)$$

здесь $U(r)$, $V(r)$ – компоненты средней геострофической скорости, g – ускорение свободного падения, f – параметр Кориолиса. Интегрируя соотношения (2) получим оценки средней динамической топографии $H(r)$.

МАССИВЫ ДАННЫХ

Из банка океанографических данных Морского гидрофизического института Национальной академии наук Украины (МГИ НАНУ) были отобраны данные вертикального зондирования температуры и солёности за период с 1992 по 2003 гг. После этого из профилей температуры и солёности с помощью программы “Гидролог” (Belokorytov, 2005) динамическим методом были получены динамические высоты уровня моря. Всего было использовано более 3100 зондирований.

В работе использовались данные дрейфтеров с 1999 по 2005 гг. Основным инструментом является SVP-В дрейфтер и его модификации (Motuzhev, et al., 2000). Дрейфтер имеет вертикальный подводный парус цилиндрической формы с центром действия на глубине 15 м, сопротивление которого примерно в 40 раз больше, чем у связанного с ним поверхностного поплавка вместе с тросовой линией. Таким образом, влияние поверхностных волн и дрейфовых течений на горизонтальное перемещение дрейфтера

не является существенным, т.к. он переносится вместе с водной массой, окружающей его парус. Определение местоположения дрейфтера производится спутниками системы “Argos” с разрешением не хуже нескольких сотен метров. Всего использовались данные 65 дрейфтеров ~107000 измерений. Исходное временное разрешение данных составляет 1–6 час. Для дальнейшего анализа дрейфтерные измерения были проинтерполированы на одночасовую сетку.

Данные спутниковой альтиметрии были получены в виде аномалий уровня вдоль треков спутников Torex/Poseidon и Jason-1. Над Черным морем за период 1992–2002 гг. проходит девять треков спутника Torex/Poseidon, за 2002–2004 гг. проходит десять сдвинутых треков спутника Torex/Poseidon и девять треков спутника Jason-1 (рис. 1). Пространственное разрешение данных – 7 км, временное ~10 дней.

Данные были получены из отделения космической океанографии Collecte Localisation Satellites (CLS). В работе использовался региональный массив данных, разработанный специально для Черного моря. Его основное отличие от глобального массива – возможность получать альтиметрические измерения ближе к берегу и более высокое разрешение данных (<http://www.aviso.oceanobs.com>).

При создании массивов в исходные альтиметрические данные были введены традиционные для таких измерений поправки на ошибки измерения орбиты спутника, коррекции на инструментальные ошибки, на возмущения за счет влажной тропосферы, сухой тропосферы, ионосферных эффектов (Fu, Cazenave, 2001).

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ОЦЕНОК СДТ

По данным о местоположении дрейфтеров $r(t)$ были вычислены полные скорости течений v

$$v_{i+1/2} = \frac{r_{i+1} - r_i}{t_{i+1} - t_i}$$

Изменение скорости дрейфтера, описываемое уравнением

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{k} \times f\vec{v} = -g\nabla h + \frac{1}{\rho} \frac{d\tau}{dz} + A, \quad (3)$$

вызвано градиентами динамической топографии – первое слагаемое правой части; напряжением трения ветра – второе слагаемое правой части и высокочастотной агеострофической компонентой A , связанной в основном с инерционными колебаниями; здесь τ – касательное напряжение трения ветра, ρ – плотность, z – глубина.

Инерционная компонента скорости были отфильтрованы с помощью КИХ-фильтра (фильтр с конечной импульсной характеристикой). Окно

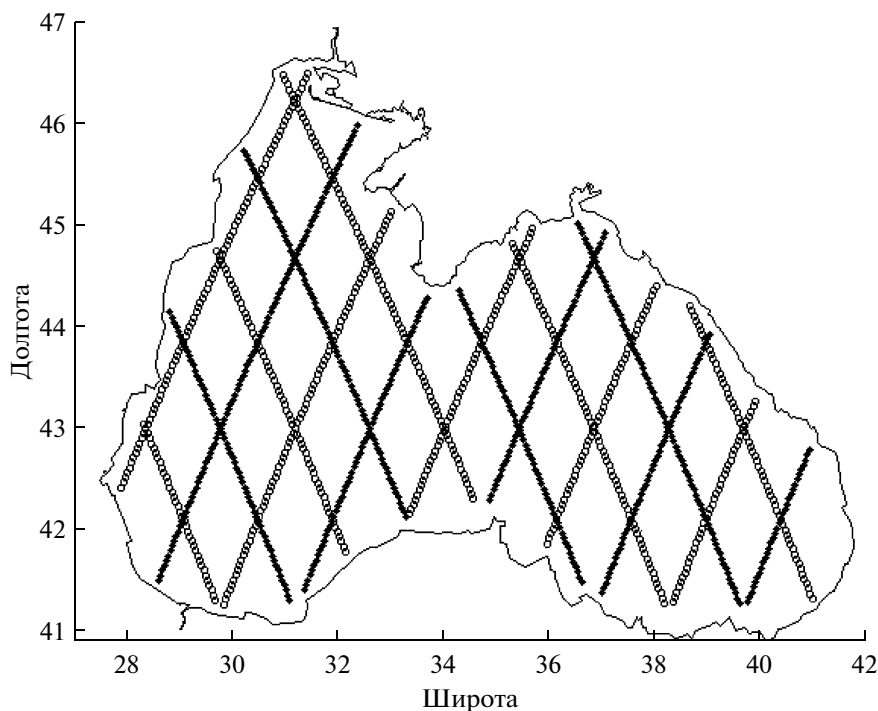


Рис. 1. Положение альтиметрических треков спутниковых миссий Topex/Poseidon.

фильтра выбиралось так, чтобы оно совпадало с периодом инерционных колебаний в Черном море, определяющимся по формуле

$$T = 12 / \sin \varphi,$$

здесь φ — широта, для Черного моря φ лежит в диапазоне 41° – 48° .

Для того чтобы исключить экмановскую дрейфовую компоненту скорости, из массива данных были отброшены измерения, которые приходились на ситуации с сильным ветровым воздействием. При этом предполагалось, что дрейфовая компонента на глубине залегания паруса дрейфтера — 15 м пренебрежимо мала, если скорость ветра в момент времени в точке измерения не превосходила 5 м/с. Дрейфтерные измерения при скорости ветра, больше 5 м/с, не учитывались. Для этого использовались данные NCEP (National Centers for Environmental Prediction) о ветре на 1-градусной равномерной сетке с шестичасовым интервалом за период 1998–2005 гг. (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/Ancillary/Meteorological/>).

Для получения оценок градиента средней динамической топографии в точке были выбраны квазисинхронные измерения скоростей дрейфтеров и аномалий уровня моря с параметрами выборки $\Delta r = 25$ км, $\Delta t = 5$ дней. Эти параметры приблизительно соответствуют основным масштабам пространственной и временной синоптической изменчивости для Черного моря. По данным альтиметрических измерений АУП, используя уравнения геострофического

баланса, были вычислены проекции аномалий геострофических скоростей \vec{v}' на направление, перпендикулярное направлению трека спутника. После этого были вычислены разности между геострофическими скоростями дрейфтеров \vec{v} , спроецированными на направление \vec{v}' , и аномалиями \vec{v}' . Оценки $\vec{V}(r)$ — средней геострофической скорости были получены для каждой точки альтиметрических треков, в которых существовали квазисинхронные измерения альтиметрии и скоростей дрейфтеров. При наличии двух или более квазисинхронных измерений в точке оценка $\vec{V}(r)$ определялась как среднее от всех выбранных разностей.

Полученные значения градиента средней динамической топографии были аппроксимированы вдоль треков полиномами различных степеней. На рис. 2 изображены распределения скоростей для нескольких различных треков спутника Topex/Poseidon. Для перехода от градиентов уровня $V(r)$ к уровню $H(r)$ полученные полиномы были проинтегрированы (рис. 3).

Константы интегрирования $C_{1...N}$ (здесь N — число треков) определялись из условия минимума разностей уровня в точках пересечения треков. Для определения $C_{1...N}$ был разработан алгоритм, основанный на работе рекурсивной функции. Пусть для каждой точки пересечения треков i и j задан уровень l_{ij} . На нулевом шаге ($m = 0$) работы алгоритма набор констант $C_{1...N}$ ($t = 0$) определяется как осредненное

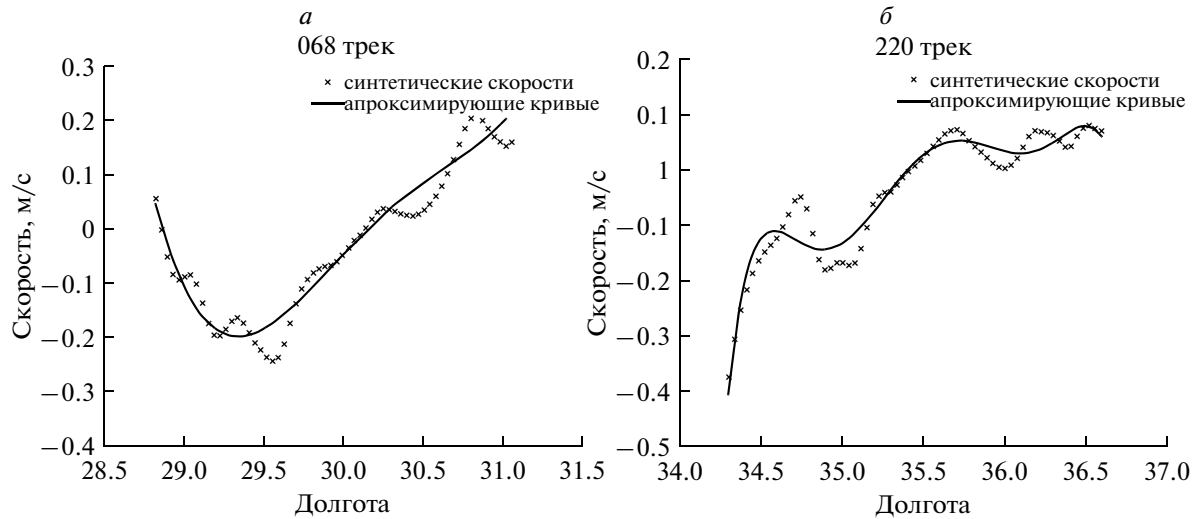


Рис. 2. Изменчивость “синтетической” скорости по данным дрейфтеров и соответствующие аппроксимирующие кривые: *a* – для 68 трека; *б* – для 220 трека спутника Jason-1 в Черном море.

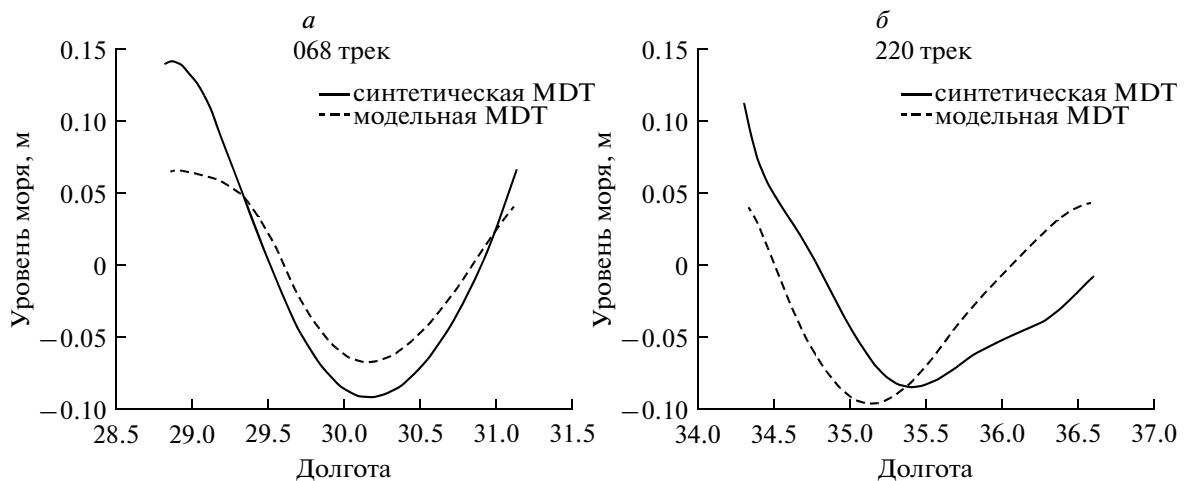


Рис. 3. Изменчивость “синтетической” и модельной средней динамической топографии, полученные по данным дрейфтеров: *a* – для 68 трека; *б* – для 220 трека спутника Jason-1 в Черном море.

значение сигнала по каждому треку. Задача сводится к нахождению таких C_i , при которых сумма D по всем трекам суммарной разности уровня S_i в точках пересечения треков минимальна.

$$D = \sum_i^N S_i = \sum_i^N \sum_j^N ((l_{ij} + C_i) - (l_{ji} + C_j)).$$

Для решения этой задачи на каждом шаге m рассчитывались значения S_i и определялся номер трека n , для которого S_i максимальна. Константа C_n определялась как

$$C_n(m) = C_n(m-1) - \langle S_i(m-1) \rangle.$$

Полученный набор коэффициентов $C_{1...n...N}$ использовался для дальнейшего расчета сумм S_i и кор-

ректировки коэффициентов на следующем шаге. На шаге $m = 1000$ значения сумм S_i и D не превышают 10^{-5} м.

Для определения средней динамической топографии по данным вертикального зондирования температуры и солёности динамическим методом была восстановлена топография h , относительно глубины 300 м. Предполагалось, что ниже этой глубины скорости движения жидкости пренебрежимо малы по сравнению с движениями в верхних слоях. Используя те же параметры выборки, были отобраны квазисинхронные измерения альтиметрии h' и получены оценки $H(r) = h(t, r) - h'(t, r)$. Для каждого трека полученные значения были аппроксимированы полиномами 5–7 степеней (рис. 4).

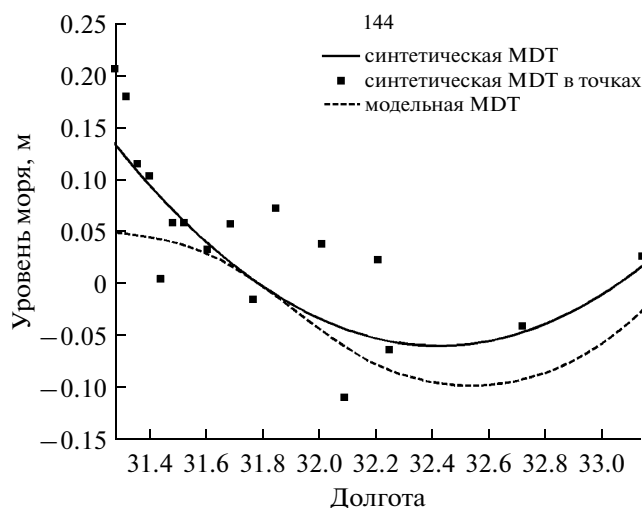


Рис. 4. Изменчивость “синтетической” и модельной средней динамической топографии, полученные по данным судовых съемок на 144 трассе.

Усредняя профили СДТ, полученные по судовым съемкам и по дрейфтерным данным были построены разрезы средней динамической топографии Черного моря вдоль трекков. Далее эти значения были интерполированы (экстраполированы) на сетку $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ для всего бассейна Черного моря с помощью кригинг-интерполяции (рис. 5).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как показали результаты расчетов, полученное поле отражает основные особенности динамики Черного моря, но и имеет ряд отличий по сравнению с данными топографии, восстановленной с по-

мощью модели динамики моря (Кныш и др., 2002) (рис. 6). Отметим, что эти отличия могут быть результатом не только особенностей поля течений в Черном море, но и спецификой получения альтиметрических данных. Полученное поле СДТ является, в общем смысле, некоторым полем, при добавлении к которому значений АУП, можно наилучшим образом восстановить абсолютную динамическую топографию.

Так как основные данные о СДТ были получены для глубоководной части, а значения СДТ в прибрежных районах в основном получены в результате экстраполяции, именно в прибрежных районах следует ожидать максимальных ошибок, и коррек-

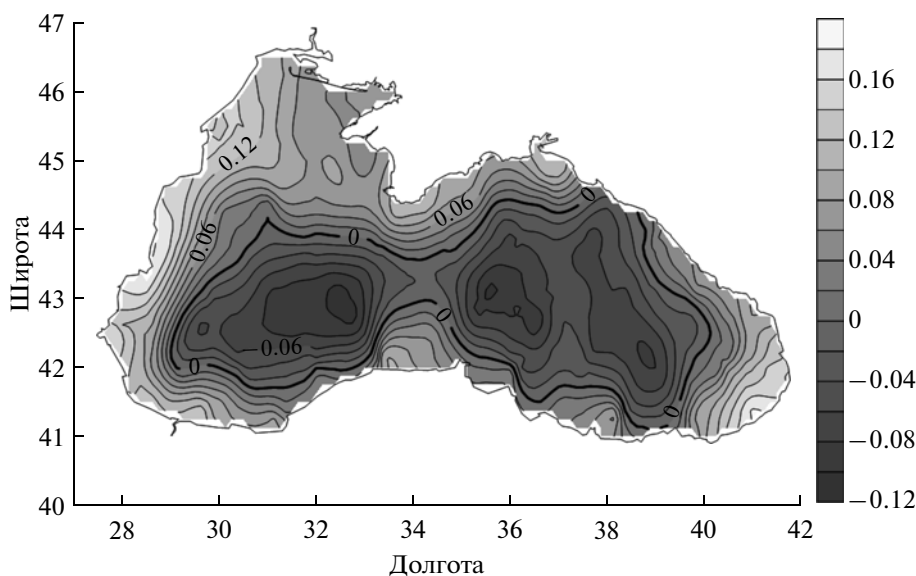


Рис. 5. “Синтетическая” средняя динамическая топография.

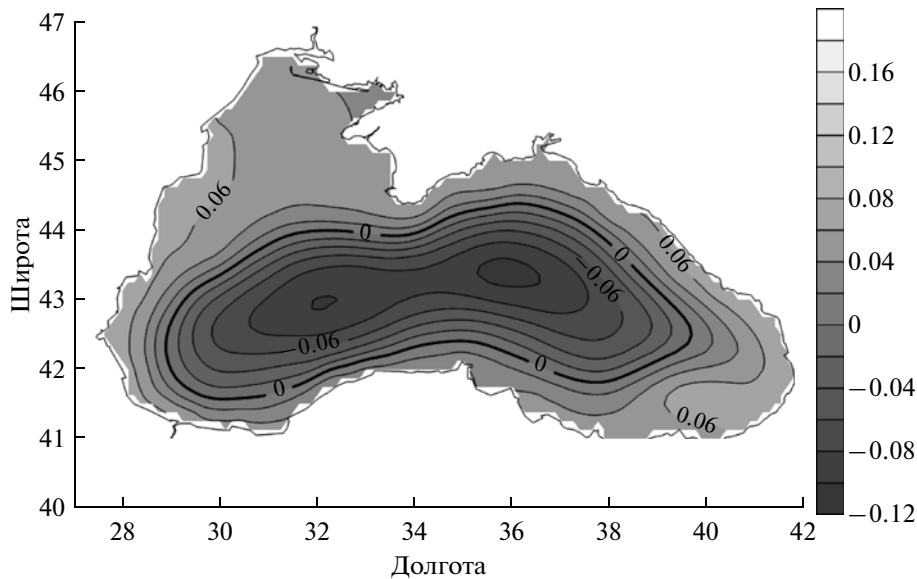


Рис. 6. “Модельная” средняя динамическая топография (Кныш и др., 2002).

ция СДТ в этих зонах требует приложения дополнительных исследований.

Для проверки точности СДТ было проведено сопоставление альтиметрических данных с динамической топографией, рассчитанной по неиспользуемым ранее при построении СДТ вертикальным профилям плотности, полученным в ходе судовых зондирований. Общая выборка квазисинхронных измерений состояла из 28 профилей полученных в различных районах моря в разные сезоны. На рис. 7 представлены диаграммы рассеяния между спутниковыми и судовыми измерениями с использовани-

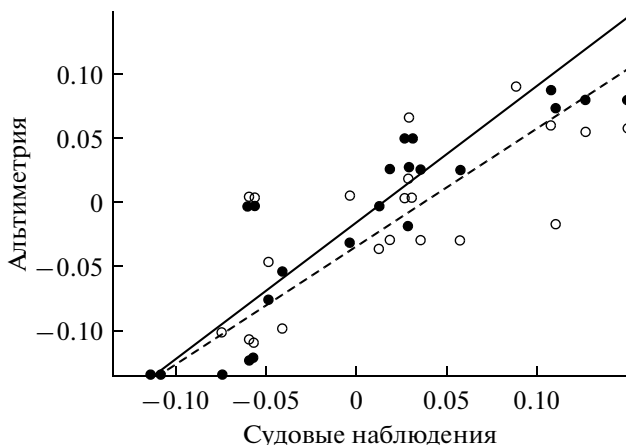


Рис. 7. Диаграммы рассеяния измерений динамической топографии, восстановленной по спутниковым и судовым измерениям и соответствующие линии регрессии с использованием “синтетической” СДТ (сплошная линия и маркеры) и средней модельной топографии (пунктирная линия, пустые маркеры). Коэффициенты корреляции $k_1 = 0.87$, $k_2 = 0.79$. Дисперсия $d_1 = 0.048$ м; $d_2 = 0.055$ м.

ем синтетической СДТ и средней модельной топографии.

Вычисленные коэффициенты регрессии равны 0.92 и 1.06, коэффициенты корреляции равны 0.79 и 0.87, дисперсия отклонений 0.055 м и 0.048 м для модельной и “синтетической” средней динамической топографии, соответственно. Таким образом, “синтетическая” СДТ позволяет восстанавливать поля динамической топографии и геострофических скоростей с большей точностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была реализована методика восстановления средней динамической топографии на основе совместного анализа контактных и альтиметрических данных, с помощью которой была получена “синтетическая” СДТ для Черного моря.

Сопоставление альтиметрического уровня моря с независимыми измерениями динамических высот показало увеличение корреляции и уменьшение дисперсии для “синтетической” СДТ по сравнению с топографией, полученной в более ранних работах.

Таким образом, полученная в нашей работе СДТ может быть применена для восстановления полей динамической топографии и геострофических скоростей с большей точностью.

Основные направления дальнейшей работы по улучшению качества восстановления уровня моря на основе данных об альтиметрических аномалиях уровня будут сосредоточены на проблемах восстановления СДТ в прибрежных районах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кныш В.В., Демьяшев С.Г., Коротаев Г.К.* Методика реконструкции климатической сезонной циркуляции Черного моря на основе ассимиляции гидрологических данных в модели // Морской гидрофиз. журн. 2002. № 2. С. 36–52.
- Коротаев Г.К., Саенко О.А., и др.* Точность, методология и некоторые результаты ассимиляции альтиметрических данных ТОРЕХ/POSEIDON в модели общей циркуляции Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 3. С. 3–17.
- Belokopytov V.* Ocean Station Tool: Software package for processing and analysis of oceanographic data // Proc. Intern. Marine Data and Information Conference – IMDIS. May 31 – June 3, 2005. Brest, France. 2005. P. 67.
- Fu L.L., Cazenave A.* Satellite Altimetry and Earth Sciences // A handbook of techniques and applications. Int. Geophys. Series. Academic Press, 2001. V. 69.
- Hernandez F., Calvez M.H. et al.* Surface Moyenne Océanique: Support scientifique à la mission altimétrique Jason-1, et à une mission micro-satellite altimétrique // Rapport d'avancement. Rapport n°CLS/DOS/NT/00.313. édité par CLS, 2000.
- Hernandez F., Schaeffer P. et al.* Mean dynamic topography for satellite altimetry: Two approaches, from oceanographic data or satellite gravimetry // Journees luxembourgeoises de geodynamique. № 89. Munsbach, Luxembourg, 2001. P. 19–25.
- Johannessen J.A., Balmino G., et al.* The European Gravity field and Steady-state ocean circulation explorer satellite mission: its impact on geophysics // Survey Geophys. 2003. № 24. С. 339–386.
- Korotaev G., Saenko O., Koblinsky C.* Satellite altimetry observations of the Black Sea level // J. Geophys. Res. 2001 V. 106. № C1. P. 917–933.
- Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P.* World Ocean Database // National Oceanogr. Data Center. 1998.
- LeGrand P., Schrama E.J.O., Tournadre J.* An inverse estimate of the dynamic topography of the ocean // Geophys. Res. Lett. 2003. № 30. P. 1062.
- Motyzhev S.V., Poulain P.M., Zatsepin A.G. et al.* New phase of drifter experiment in the Black Sea // DBCP Techn. Doc. Ser. WMO, Geneva, 2000. № 17. P. 116–128.
- Rio M.H.* Combinaison de données in situ, altimétriques et gravimétriques pour l'estimation d'une topographie dynamique moyenne globale. 2003 // Ed. CLS. PhD Thesis, University Paul Sabatier (Toulouse III, France), 2003. P. 260.
- Rio M.H., Hernandez F.* A mean dynamic topography computed over the world ocean from altimetry, in situ measurements, and a geoid model // J. Geophys. Res. 2004. № 109.
- Rio M.H., Poulain P.M. et al.* A Mean Dynamic Topography of the Mediterranean Sea computed from altimetric data, in-situ measurements and a general circulation model // J. Marine Systems. 2007. № 65. P. 484–508.

Reconstruction of Mean Dynamic Topography of the Black Sea for Altimetry Measurements

A. A. Kubryakov, S. V. Stanichny

Marine Hydrophysical Institute, National Academy of Sciences of Ukraine, Sevastopol

In this study we determine Mean Dynamic Topography (MDT) of Black Sea for reconstruction of dynamic topography and geostrophic circulation from altimetry data. The method based on combine usage of SVP-drifters, hydrological profiles and sea level anomalies, received from Topex/Poseidon mission. Validation of generated MDT show greater correlation with independent in-situ measurements compare to previous versions of MDT.

Keywords: satellite altimetry data, dynamic topography, sea level anomalies, Black Sea