

---

---

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

---

---

**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ  
ГЕОСТРОФИЧЕСКОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ЧЕРНОГО МОРЯ  
ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ НА ОСНОВЕ  
СОПОСТАВЛЕНИЯ С ДРИФТЕРНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ**

© 2013 г. А. А. Кубряков\*, С. В. Станичный

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь*

\*E-mail: arskubr@gmail.com

Поступила в редакцию 19.07.2012 г.

Комбинированные измерения спутниковых альтиметров позволяют определять аномалии уровневой поверхности Черного моря на регулярной сетке с высоким пространственным разрешением, составляющим  $1/8^\circ$ . В работе по этим данным были восстановлены массивы полных геострофических скоростей течений в бассейне Черного моря, которые были сопоставлены с дрейферными измерениями скоростей течений за 1999–2007 гг. Сопоставление было проведено как для всего массива дрейферных измерений (~110000 измерений), так и для каждого дрейфера отдельно. Для восстановления скоростей были использованы два различных массива средней динамической топографии (СДТ): синтетическая и климатическая средняя динамическая топография. Результаты сопоставления показали, что использование синтетической СДТ предпочтительнее для расчета геострофических скоростей. Скорости, рассчитанные по данным спутниковой альтиметрии, с достаточно высокой степенью точности согласуются со скоростями, полученным по данным контактных измерений.

**Ключевые слова:** спутниковая альтиметрия, дрейферы, валидация, циркуляция, высокое разрешение, Черное море

DOI: 10.7868/S0205961413020061

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время спутниковая альтиметрия является единственным средством исследования, позволяющим регулярно получать информацию о динамике Мирового океана и, в частности, бассейна Черного моря.

Современные спутниковые альтиметры определяют высоту морской поверхности с высокой точностью ~2 см (Cheney et al., 1994). Эти данные могут быть использованы для определения динамической топографии морской поверхности и расчета поверхностных геострофических скоростей течений в бассейне. Комбинированные измерения, полученные вдоль треков нескольких альтиметрических спутников, позволяют с помощью разработанных в (Le Traon et al., 2001; Pascual et al., 2006) алгоритмов восстанавливать аномалии уровня моря на регулярной сетке. Карты аномалии уровня доступны каждые семь дней (delayed time products) и имеют пространственное разрешение  $1/3^\circ$  для Мирового океана (<http://www.aviso.oceanobs.com/>). Сравнительно недавно, благодаря работе французской компании CLS (Collecte Localisation Satellites), стали доступны

региональные массивы альтиметрических данных для районов Черного и Средиземного морей с более высоким пространственным разрешением  $1/8^\circ$ .

Однако для расчета полей геострофической циркуляции по этим данным необходимо перейти от альтиметрических аномалий уровня моря к полной динамической топографии морской поверхности. Для этого к аномалиям уровня необходимо прибавить поле средней динамической топографии (СДТ), представляющее собой осредненное поле реального уровня за 1993–1999 гг. (Fu, Cazenave, 2001). Скорости течений, определяемые по данным альтиметрии, существенно зависят от используемой СДТ. Зачастую СДТ оказывается определяющим параметром при восстановлении реальных полей скорости (Hernandez et al., 2001).

Цель данной работы – оценка качества полей поверхностных геострофических скоростей Черного моря, восстановленных по данным альтиметрии с высоким пространственным разрешением, на основе сопоставления с результатами дрейферных экспериментов и анализ вклада вли-

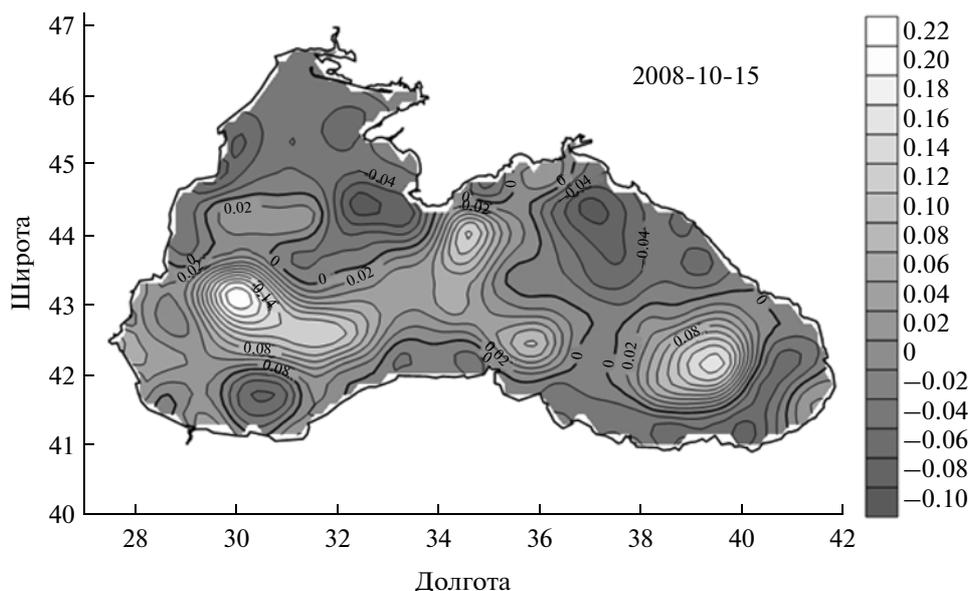


Рис. 1. Пример карты аномалий уровня, полученной по данным альтиметрии за 15.10.2008 г.

яния средней динамической топографии на качество воспроизведения этих полей.

Для решения поставленной задачи по альтиметрическим измерениям были рассчитаны поля поверхностной геострофической скорости течений в Черноморском бассейне за 1992–2010 гг. с пространственным разрешением  $1/8^\circ$  и временным – семь дней. При этом полная динамическая топография, необходимая для расчета, определялась с использованием двух различных полей СДТ – синтетической средней динамической топографии (ССДТ), полученной на основе комбинирования альтиметрических и контактных измерений (Кубряков, Станичный, 2011), и климатической средней динамической топографии (КСДТ), восстановленной на основе модельного расчета с ассимиляцией данных гидрологических зондирований (Кныш и др., 2005).

В настоящее время существует несколько работ, в которых проводилась валидация альтиметрических скоростей в различных районах Мирового океана: в работах (Rio, Hernandez, 2004; Rio et al., 2007) проводится сопоставление всего массива данных, полученных по измерениям дрейфтеров для акватории Мирового океана; в работах (Ichikawa et al., 1995; Uchida et al., 1998) оценки качества сопоставления даются на основании измерений одного буя в районе Тихого океана. Однако для бассейна Черного моря, для которого пространственное разрешение картированных альтиметрических данных выше, чем в океанических бассейнах, таких работ выполнено не было. Валидация, выполненная в этой работе, позволит оценить качество восстанавливаемых по данным

альтиметрии скоростей в Черноморском бассейне и, кроме того, определить возможности использования альтиметрических данных с более высоким пространственным разрешением.

#### ВОССТАНОВЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ

Для расчета скоростей по данным спутниковой альтиметрии использовался массив аномалий уровня моря за 1992–2010 гг. на регулярной сетке, полученный по комбинированным вдольтрековым измерениям современных альтиметров со спутников Jason-1, Jason-2, Envisat, Topex/Poseidon, GFO (Le Traon et al., 2001; Pascual et al., 2006) (рис. 1). При создании массивов в исходные альтиметрические данные были введены традиционные для таких измерений коррекции (Fu, Cazenave, 2001).

В данной работе использовался региональный массив данных, разработанный в CLS специально для Черного моря. Его основным отличием от глобального массива является более высокое пространственное разрешение данных: региональные карты аномалий уровня для Черного моря имеют пространственное разрешение  $1/8^\circ$  по сравнению с  $1/3^\circ$  для глобальных карт (<http://www.aviso.oceanobs.com/>). Временное разрешение картированных данных составляет семь дней (delayed time).

Абсолютная динамическая топография определялась как сумма аномалии уровня и средней динамической топографии. Как было указано вы-

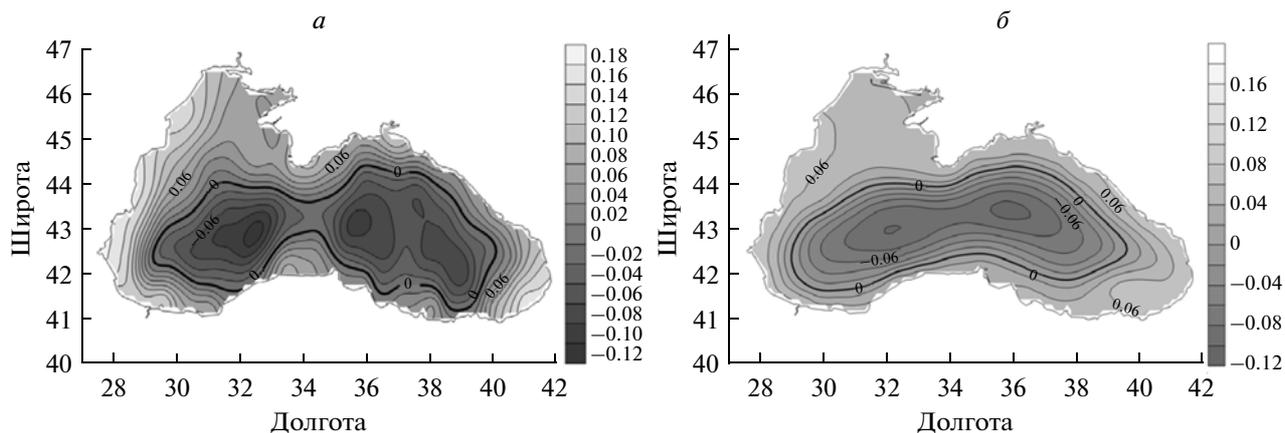


Рис. 2. Средние динамические топографии Черного моря: *a* – синтетическая (ССДТ); *б* – климатическая (КСДТ).

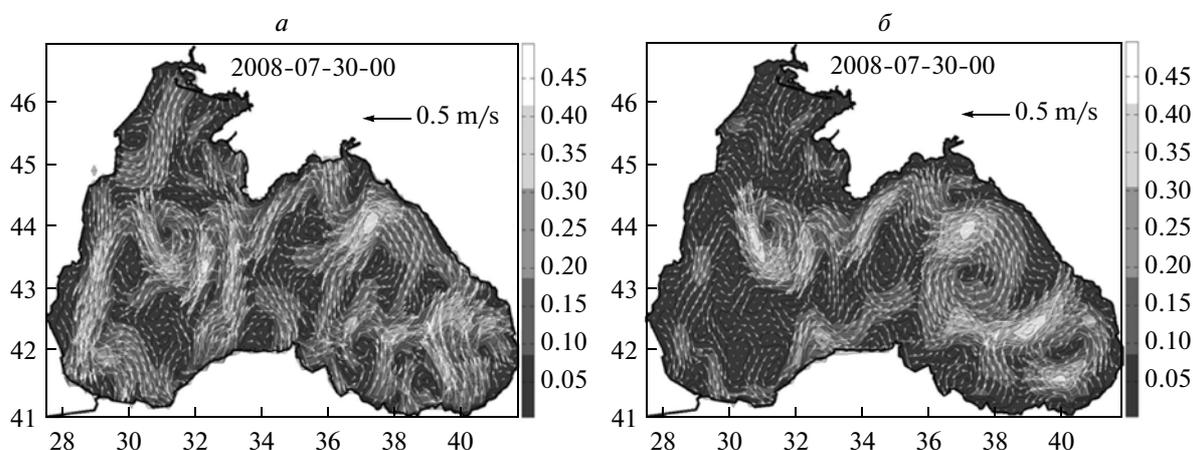


Рис. 3. Поля скоростей, полученных по данным альтиметрии за 30.07.2008 г.: *a* – с использованием ССДТ; *б* – с использованием КСДТ.

ше, для анализа были использованы две различных СДТ:

1) средняя динамическая топография, восстановленная “синтетическим” методом на основе сопоставления данных SVP-дрифтеров, судовых гидрологических съемок и альтиметрических измерений (Кубряков, Станичный, 2011) (рис. 2*а*);

2) средняя динамическая топография, полученная при помощи модельного расчета климатической циркуляции с ассимиляцией гидрологических данных. Для расчета использовались трехмерная нелинейная модель циркуляции Черного моря, разработанная в Морском гидрофизическом институте, и климатический массив гидрологических съемок за период 1950–2004 гг. (Кныш и др., 2005) (рис. 2*б*).

Используя полученные массивы абсолютной динамической топографии, из уравнений геострофического баланса были рассчитаны поверхност-

ные скорости геострофических течений с временным разрешением семь дней на сетке  $1/8^\circ \times 1/8^\circ$ :

$$u_g = -\frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial y}; \quad v_g = \frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial x},$$

где  $u_g, v_g$  – геострофические скорости;  $g = 9.8$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;  $f = 10^{-4}$  с – параметр Кориолиса.

На рис. 3 изображен пример полей рассчитанных скоростей за 30 июля 2008 г. с использованием различных СДТ. Как видно из примера, полученные карты существенно отличаются друг от друга, особенно в терминах амплитуд течений. Более подробно эти различия будут рассмотрены несколько позже.

## ДРИФТЕРНЫЕ ДАННЫЕ

Для валидации полученных полей течений использовались данные дрифтеров с 1999 по 2007 гг. Основным инструментом являлся SVP-В-дрифт-

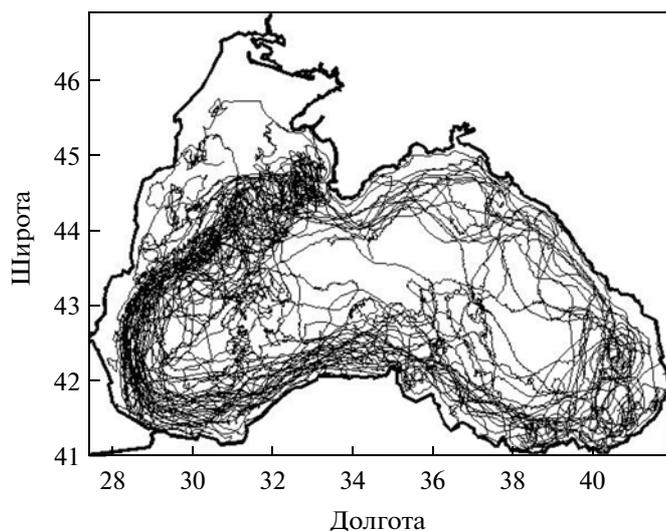


Рис. 4. Траектории дрейфа 51 буя разных типов, раз-  
вернутых в Черном море в период октябрь 1999–де-  
кабрь 2007 гг.

тер и его модификации (Motyzhev et al., 2000). Дрифтер имеет подводный парус 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.

Спутники системы “Аргос” определяют местоположение дрифтера с разрешением не хуже нескольких десятков метров. На рис. 4 изображены траектории дрейфа этих буюв.

Измерения покрывают практически всю акваторию Черного моря, наибольшая часть их находится на периферии в районе ОЧТ. Исходное временное разрешение данных составляет 1–6 часов. Всего использовались данные 51 дрифтера, что соответствует более чем 110000 измерений скорости.

По данным о местоположении дрифтеров  $r(t)$  были вычислены полные скорости течений  $V$ :

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

Инерционная компонента скорости дрифтера были отфильтрована скользящим средним. Окно фильтра выбиралось так, чтобы оно совпадало с периодом инерционных колебаний в Черном море ~17 ч, определяющимся по формуле

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

где  $\varphi$  – широта (для Черного моря она находится в диапазоне 41°–48° с.ш.).

### СОПОСТАВЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ

Для сопоставления скорости, рассчитанные по данным альтиметрии, были проинтерполирова-

ны на момент времени и местоположения контактных измерений скорости. Далее было проведено статистическое сопоставление рядов дрифтерных и альтиметрических скоростей как для всего массива данных, так и для каждого буя индивидуально.

Взаимные коэффициенты корреляции между контактными и спутниковыми измерениями скорости оказались практически одинаковы для обеих средних динамических топографий и составили:  $K_x = 0.76$  – для зональной компоненты скорости и  $K_y = 0.63$  – для меридиональной. Величина среднеквадратичного отклонения (СКО) составляет 0.086 м/с в случае применения ССДТ для восстановления геострофических скоростей, и 0.089 м/с – для КСДТ.

Сопоставление показало, что альтиметрические данные лучше воспроизводят зональную компоненту скорости движения дрифтера (ось  $x$  направлена на восток, ось  $y$  – на север). Коэффициенты корреляции для  $x$ -компоненты в среднем на 0.1 выше, чем для  $y$ -компоненты скорости дрифтера. Несмотря на это, СКО для меридиональной составляющей (0.083 м/с) меньше, чем для зональной компоненты скорости (0.09 м/с). Такое распределение статистических характеристик может быть обусловлено особенностями структуры циркуляции Черного моря. Дрифтеры, в большей своей массе, захваченные основным черноморским течением (ОЧТ), движутся по периферии Черноморского бассейна, вытянутого в зональном направлении. Вследствие этого на наиболее значительных промежутках пути дрифтера меридиональная скорость буя близка к нулю. Поэтому коэффициенты взаимной корреляции  $y$ -компоненты скорости оказываются чувствительными к незначительным ошибкам в определении скорости по данным альтиметра. В свою очередь высокие амплитуды зональной компоненты скорости приводят к увеличению стандартного отклонения. Кроме того, в интенсивном струйном течении при определении компоненты скорости, поперечной к потоку, увеличивается вклад нелинейных адвекционных членов в скорость буя, который в данной работе не учитывается.

Для более детальной оценки качества восстановления скоростей и определения источников несоответствий дальнейший анализ был проведен для каждого буя индивидуально. Для всех дрифтеров были рассчитаны коэффициенты покомпонентной корреляции, стандартное отклонение и разница средних амплитуд скоростей. Результаты (для некоторых буюв) представлены в таблице, из которой видно, что для большинства дрейфующих буюв получены значимые коэффициенты корреляции. Наиболее высокие значения корреляции получены для дрифтеров № 49169 и № 16336, для них они по обоим компонентам близки к 0.9 (табли-

Статистические характеристики сопоставления скоростей, полученных по данным альтиметрии с различными СДТ, и по данным дрейферных измерений

№	$K_x$		$K_y$		Стандартное отклонение, м/с		Разница средних скоростей, м/с	
	ССДТ	КСДТ	ССДТ	КСДТ	ССДТ	КСДТ	ССДТ	КСДТ
16333	0.842	0.828	0.784	0.723	0.119	0.139	-0.085	-0.110
16336	0.899	0.911	0.805	0.763	0.116	0.139	-0.075	-0.098
16337	0.845	0.810	0.660	0.640	0.109	0.110	-0.042	-0.082
34253	0.801	0.775	0.724	0.655	0.061	0.066	0.021	0.025
34832	0.863	0.795	0.632	0.701	0.086	0.115	-0.049	-0.056
40419	0.802	0.810	0.901	0.846	0.071	0.093	-0.010	-0.083
35502	0.802	0.803	0.630	0.641	0.133	0.151	-0.066	-0.096
40422	0.802	0.841	0.765	0.742	0.120	0.109	-0.105	-0.090
49169	0.895	0.878	0.918	0.918	0.052	0.052	-0.013	-0.020

ца). На рис. 5 построены траектории и скорости этих дрейферов. Показаны зональные и меридиональные компоненты скорости: полученные по данным дрейферов – серой линией, по данным альтиметрии с использованием ССДТ – черной пунктирной линией, а с использованием КСДТ – черной сплошной линией.

Эти два буя описывают различные типы движений: первый из них движется в потоке ОЧТ, а второй захвачен мощным антициклоническим вихрем, движущимся с севера на юг вдоль струи ОЧТ. Альтиметрические данные с высокой степенью точности воспроизводят амплитуды и направления для обоих типов движения (рис. 5).

На рис. 6 построены диаграммы взаимных коэффициентов корреляции между альтиметрическими и дрейферными скоростями для различных буев. Как видно из рис. 6, для наибольшего количества дрейферов коэффициент корреляции для зональной компоненты скорости составляет 0.7–0.9, для меридиональной – 0.6–0.7, т.е. для статистически значимого количества дрейферов спутниковая альтиметрия воспроизводит скорости с хорошей точностью.

Однако следует отметить, что для некоторых дрейферов коэффициенты корреляций малы. По нашему мнению, одной из возможных причин такого несоответствия может являться разное временное разрешение данных – несколько часов для дрейферных измерений и одна неделя для альтиметрических.

#### ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНОГО ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДАННЫХ НА РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ

Картированные альтиметрические аномалии уровня моря рассчитываются с дискретностью семь дней. Для их построения используется про-

странственно-временная интерполяция измерений нескольких альтиметрических спутников за временной интервал  $\pm 10$  дней (подробнее см. (Le Traon et al., 2001)). Поэтому скорости, рассчитанные по этим данным, являются в некоторой степени сглаженными по времени. Колебания геострофической скорости, на интервале менее семи дней, оказывающие влияние на перемещение буя, не могут быть учтены по этим данным. Изменчивость геострофической циркуляции на этих периодах приводит к занижению коэффициентов взаимной корреляции и увеличению СКО.

Для получения оценок амплитуд изменчивости геострофической скорости на таких временных масштабах по альтиметрическим данным были рассчитаны структурные функции скорости  $S(i)$  (корень из дисперсии приращений), т.е. СТО, как функция временного интервала от разницы между измерениями

$$S(i) = \sqrt{\frac{\sum (v_t - v_{t+i})^2}{n}}; \quad i = 7, 14, 21, \dots,$$

где:  $t, i$  – время измерения в днях;  $v$  – скорость в точке;  $n$  – количество измерений (рис. 7). Структурная функция, полученная таким образом, характеризует масштабы изменчивости скорости на соответствующих временных интервалах.

Значения структурной функции на недельном интервале варьируют в зависимости от координаты измерений: максимальные значения  $S(7)$  0.07–0.08 м/с приходятся на известные районы с повышенной синоптической активностью – так называемые зоны “квазистационарных” Севастопольского, Батумского и других антициклонов; в районе ОЧТ  $S(7)$  равна 0.05–0.06 м/с, а в центральной части минимальна и составляет 0.03–0.04 м/с. Поскольку большинство дрейфер-

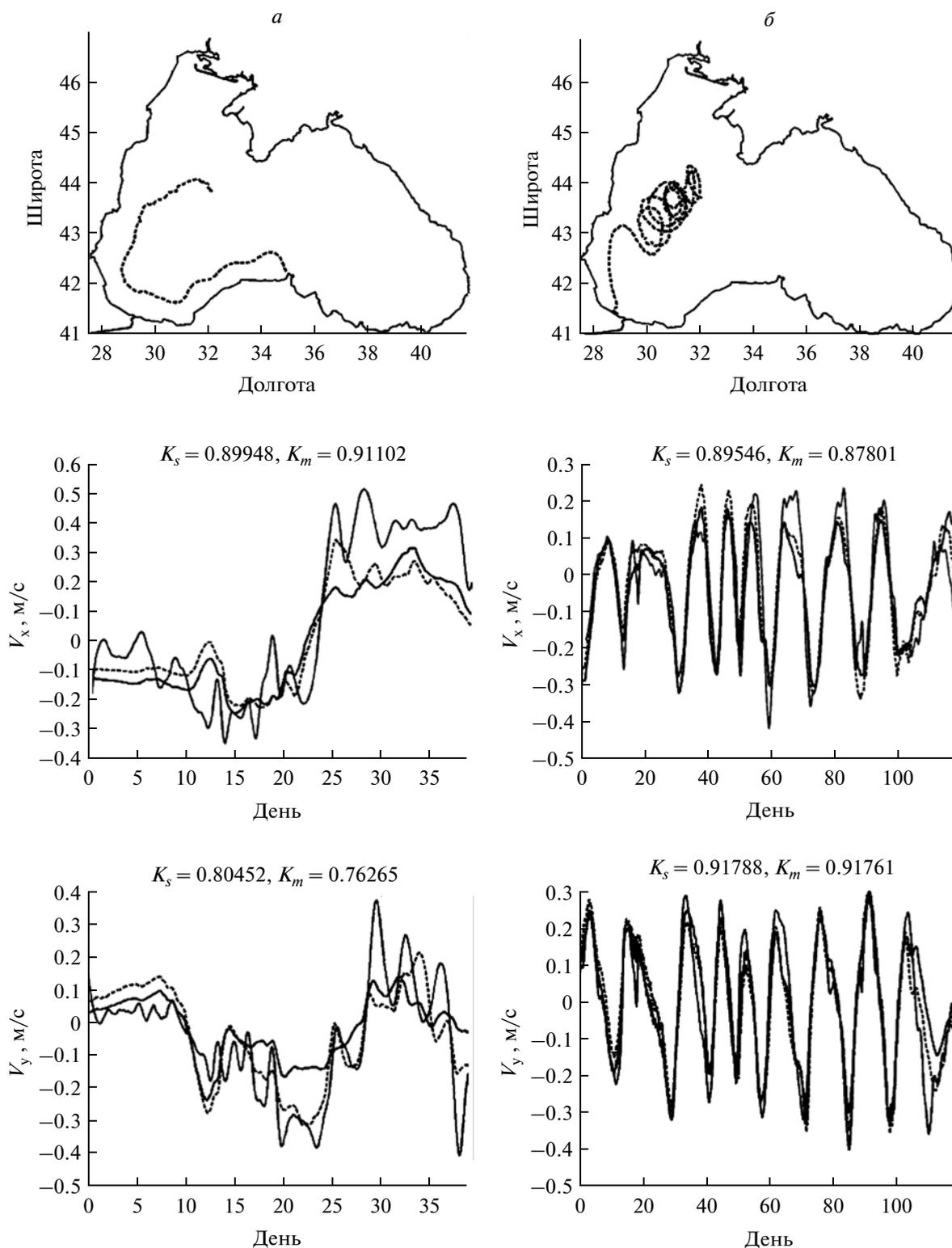


Рис. 5. Траектории (верхний ряд), зональные (средний ряд) и меридиональные (нижний ряд) компоненты скорости для дрейфтеров: а – № 49169; б – № 16336.

ных измерений находится в районе ОЧТ, можно считать, что погрешность измерений, связанная с различным временным разрешением данных,

равна 0.055 м/с, что составляет более чем половину величины среднего СКО, равного 0.09 м/с, т.е. основная часть величины СКО между дрейфтер-

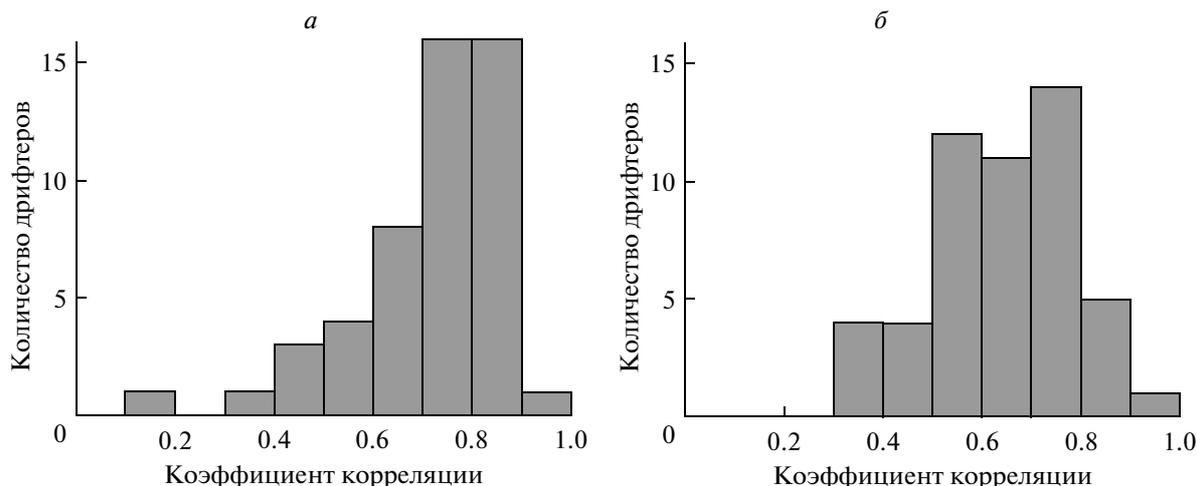


Рис. 6. Диаграммы взаимных коэффициентов корреляции между альтиметрическими и дрейферными скоростями для зональной (а) и меридиональной (б) компонент для различных дрейфтеров.

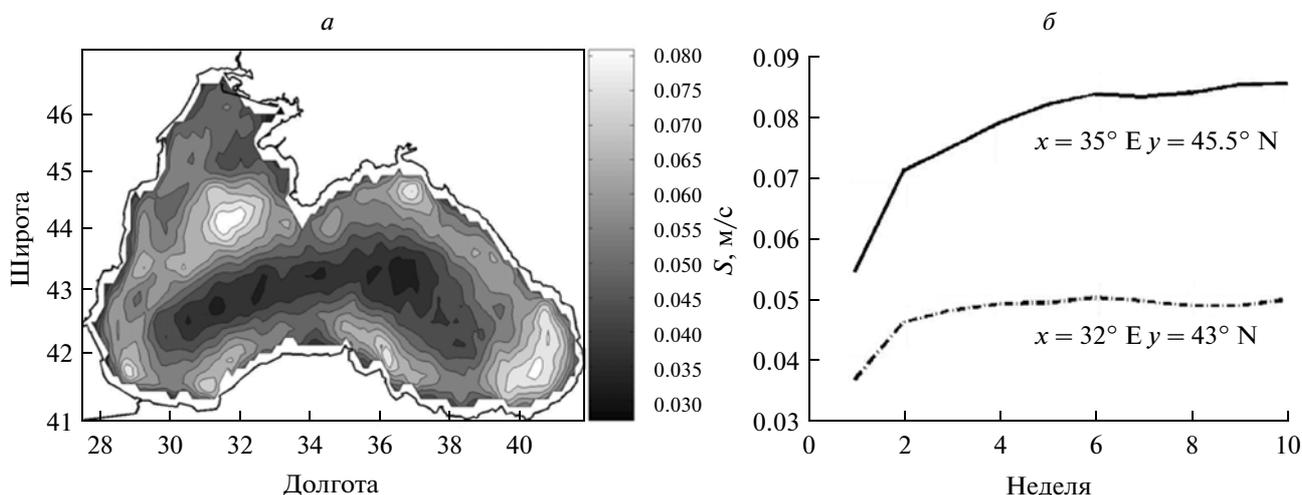


Рис. 7. Структурная функция скорости  $S$  (м/с), восстановленной по данным альтиметрии: а – для недельного интервала; б – для точек с координатами  $32^\circ$  в.д.,  $43^\circ$  с.ш. (пунктир) и  $35^\circ$  в.д.,  $45.5^\circ$  с.ш. (сплошная).

ными и альтиметрическими измерениями может быть объяснена изменчивостью геострофической скорости на периодах менее семи дней.

Для анализа влияния этого фактора на результаты сопоставления ряды скорости были сглажены семидневным низкочастотным фильтром, и далее было проведено сопоставление сглаженных рядов. В сопоставлении не участвовали дрейферы, время жизни которых составляло менее трех недель, т.е. меньше длины тройного окна фильтра. Всего были проанализированы данные 44 дрейфтеров.

Средние коэффициенты корреляции для обеих компонент выросли на 0.07, для зональной компоненты  $K_x = 0.8$ ; меридиональной  $K_y = 0.71$ ; СТО упало до 0.063 м/с. По диаграммам взаимных корреляций (рис. 8) видно, что более чем для 32 из 44  $K_x$  превосходит значение 0.8, для 16 дрейфтеров

$K_y$  имело очень высокие значения корреляций: 0.9–1.0. Для  $y$ -компоненты основное число коэффициентов корреляции сосредоточено в интервале 0.8–0.9. Таким образом, для скоростей, сглаженных семидневным фильтром, большинство коэффициентов корреляции очень высоко, что говорит о высоком качестве воспроизведения циркуляции альтиметрическими данными на синоптических и более долгопериодных временных масштабах.

#### ВЛИЯНИЕ СРЕДНЕЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОГРАФИИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ

Оценим влияние средней динамической топографии на восстановление скоростей течений по

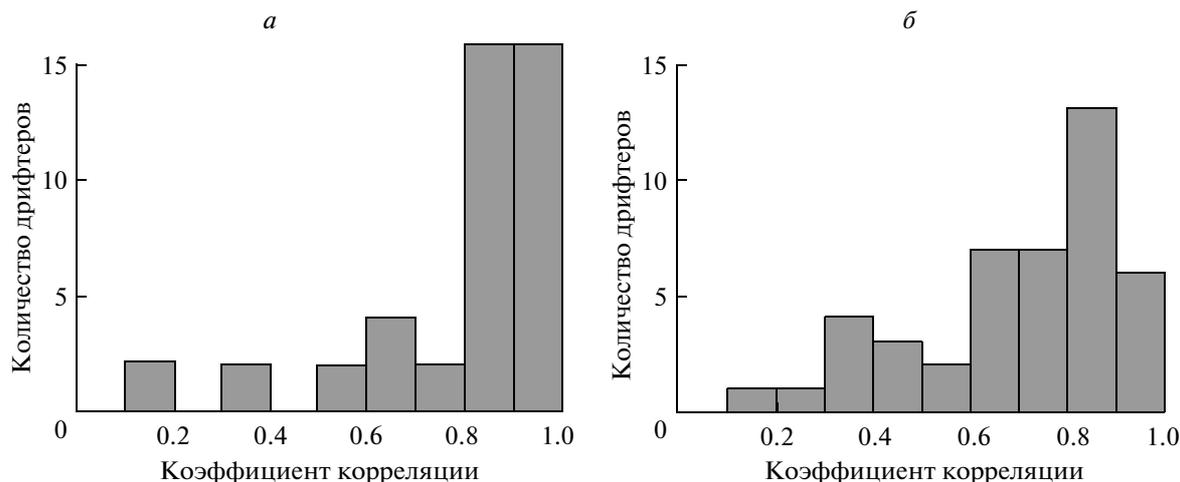


Рис. 8. Диаграммы взаимных коэффициентов корреляции между сглаженными семидневным низкочастотным фильтром альтиметрическими и дрейферными скоростями для: *a* – зональной, *b* – меридиональной компонент.

данным спутниковой альтиметрии. Взаимные коэффициенты корреляции между контактными и спутниковыми измерениями скорости оказались практически одинаковы для обеих средних динамических топографий и равны  $K_x = 0.76$  для зональной компоненты скорости и  $K_y = 0.63$  для меридиональной.

Наибольшее различие в результатах сопоставления заметно при анализе средних амплитуд скоростей движения дрейфера. Среднее по всем буям значение амплитуды скорости по данным контактных измерений равно 0.199 м/с, что при-

мерно соответствует оценкам скорости ОЧТ, полученным в (Poulain et al., 2005). Средняя амплитуда скорости, рассчитанной по данным альтиметрии, с использованием ССДТ составляет 0.168 м/с, КСДТ – 0.146 м/с.

Аналогичные оценки были выполнены также и для каждого буя индивидуально. На рис. 9 изображена диаграмма рассеяния для средних амплитуд, полученных по альтиметрическим и контактным данным с применением двух различных полей СДТ, и соответствующие линии регрессии, рассчитанные методом наименьших квадратов. Коэффициент регрессии, в случае использования ССДТ, равен 1.08 и значительно ближе к единице по сравнению с коэффициентом 1.27, полученным при использовании КСДТ. Ошибки определения коэффициентов регрессии составляют  $\sim 0.04$ .

Рассчитанные коэффициенты регрессии больше единицы для обеих СДТ, т.е. средние амплитуды, рассчитанные по данным альтиметра, меньше, чем амплитуды дрейферных скоростей. Это является в первую очередь следствием того, что на парус буя оказывает влияние не только геострофическая компонента течений, но и дрейфовая компонента, которую необходимо каким-либо образом учитывать. Тем не менее величины амплитуд, полученных с применением ССДТ, ближе к реальным значениям. В то же время применение более сглаженной КСДТ приводит к получению более заниженных амплитуд скоростей течений.

И средняя, и индивидуальная, практически для каждого дрейфера, амплитуды скорости, полученные с использованием ССДТ, ближе к значениям, рассчитанным по контактным измерениям. Таким образом, ССДТ лучше воспроизводит реальные амплитуды скоростей течений и ее использование более предпочтительно при вос-

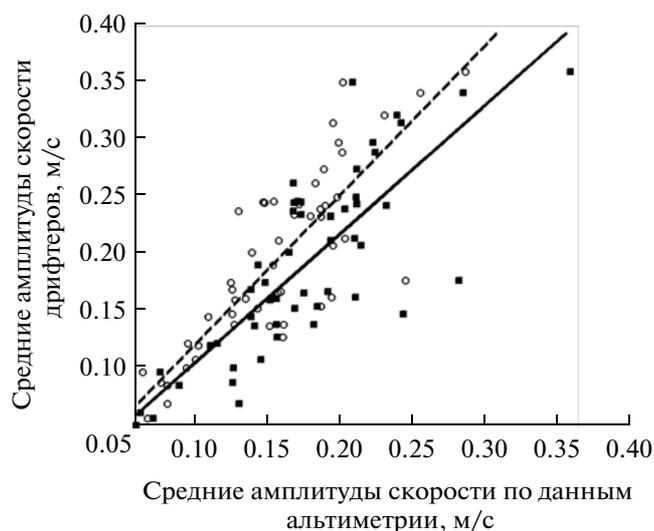


Рис. 9. Диаграмма рассеяния средних амплитуд скорости, восстановленной по дрейферным и альтиметрическим измерениям, и соответствующие линии регрессии: с использованием ССДТ (квадратные маркеры, сплошная линия) и КСДТ (круглые маркеры, пунктирная линия).

становлении циркуляции Черного моря с помощью спутниковой альтиметрии.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на основе массива дрейферных данных за 1999–2007 гг. была проведена валидация скоростей течений, полученных по спутниковым альтиметрическим данным. Для расчета скоростей течений по альтиметрическим измерениям использовались две различных средних динамических топографии: ССДТ, полученная на основе сопоставления контактных и альтиметрических измерений (Кубряков, Станичный, 2011), и КСДТ, восстановленная при помощи модельного расчета климатической циркуляции с ассимиляцией гидрологических данных (Кныш и др., 2005). Статистическое сопоставление рядов дрейферных и альтиметрических скоростей было проведено как для всего массива данных, так и для каждого буя индивидуально.

Сопоставление показало, что альтиметрические измерения позволяют восстанавливать амплитуды скоростей и структуру циркуляции Черного моря с хорошей точностью как для струйных течений, так и для вихревых образований.

Альтиметрические данные лучше воспроизводят зональную компоненту движения дрейфера, коэффициенты корреляции для  $x$ -компоненты в среднем на 0.1 выше, чем для  $y$ -компоненты скорости дрейфера. Для большей части (33 из 52 дрейферов) всех измерений коэффициент взаимной корреляции для зональной компоненты превышает 0.7, а для меридиональной 0.6. Для сглаженных семидневным фильтром временных рядов более чем для 32 из 44 дрейферов  $K_x$  превосходит значение 0.8, для 16 дрейферов  $K_x$  составляет более 0.9 — очень высокие значения корреляций. Для  $y$ -компоненты основное число коэффициентов корреляции сосредоточено в интервале 0.7–0.8.

Некоторые различия в скоростях, восстановленных по контактным и спутниковым данным, могут быть связаны с влиянием пространственно-временной интерполяции при построении карт альтиметрических аномалий уровня.

Для анализа вклада этого фактора были построены структурные функции геострофических скоростей и оценены характерные масштабы изменчивости геострофической скорости на недельных временных интервалах. Они составили 0.07–0.08 м/с в районах с повышенной мезомасштабной активностью — в зонах Севастопольского, Батумского и других антициклонов; 0.03–0.04 м/с — в центральной части Черного моря; 0.05–0.06 м/с — в районе ОЧТ, что примерно соответствует половине величины стандартного отклонения (0.086 м/с) между рядами скорости.

Сопоставление амплитуд средних скоростей показало преимущество использования ССДТ над КСДТ при восстановлении циркуляции Черного моря с помощью альтиметрических данных. Использование ССДТ приводит к получению амплитуд скоростей, близких к реальным, в отличие от более сглаженной КСДТ, использование которой может приводить к занижению скоростей течений в Черном море. Это в первую очередь связано с тем, что для создания КСДТ использовался климатический массив гидрологических съемок за более долгий период 1950–2004 гг.

Современные спутниковые альтиметры позволяют получать регулярные измерения уровневой поверхности на всей акватории Черного моря с высоким пространственным разрешением. Валидация, проведенная в этой работе, показывает, что скорости, рассчитанные по этим измерениям, соответствуют реальным скоростям течений и могут быть использованы для оценки поверхностной циркуляции Черного моря при решении широкого круга океанографических и прикладных задач.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кныш В.В., Кортаев Г.К., Демышев С.Г., Белокопытов В.Н.* Долговременные изменения термохалинных и динамических характеристик Черного моря по климатическим данным температуры и солёности и их ассимиляции в модели // Морской гидрофиз. журн. 2005. № 3. С. 11–30.
- Кубряков А.А., Станичный С.В.* Восстановление средней динамической топографии Черного моря для альтиметрических измерений // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 4. С. 1–7.
- Cheney R., Miller L., Agreen R., Doyle N., Lillibridge J.* TOPEX/POSEIDON: The 2-cm solution // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. № C12. P. 24555–24563.
- Fu L.L., Cazenave A.* Satellite Altimetry and Earth Sciences // A handbook of Techniques and Applications. International Geophysics series, Academic Press, 2001. V. 69.
- Hernandez F., Schaeffer P., Rio M.H., Tamagnan D., Le Traon P.Y.* Mean dynamic topography for satellite altimetry: Two approaches, from oceanographic data or satellite gravimetry // Journees Luxembourgeoises de Geodynamique. 2001. V. 89. P. 19–25.
- Ichikawa K., Imawaki S., Ishii H.* Comparison of surface velocities determined from altimeter and drifting buoy data // J. Oceanogr. 1995. V. 51. P. 729–740.
- Le Traon P.Y., Dibarboure G., Ducet N.* Use of a High-Resolution Model to Analyze the Mapping Capabilities of Multiple-Altitude Missions // J. Atmos. Oceanic Technol. 2001. V. 18. P. 1277–1288.
- Motyzhov S.V., Poulain P.M., Zatsepin A.G., Fayos C., Kostianoy A.G., Maximenko N.A., Poyarkov S.G., Soloviev D.M., Stanichny S.V.* New phase of drifter experiment in the Black Sea. // DBCP Technical Document Series WMO. Geneva, 2000. V. 17. P. 116–128.

*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. V. 109.

*Rio M.H., Poulain P.M., Pascal A., Mauri E., Larnicol G., Santoleri R.* A mean dynamic topography of the Mediterranean Sea computed from altimeter data, in situ measurements and a general circulation model // *J. Marine Systems.* 2007. V. 65. P. 484–508.

*Pascual A., Faugere Y., Larnicol G., Le Traon P.Y.* Improved description of the ocean mesoscale variability by combining

four satellite altimeters // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. № L02611. doi:10.1029/2005GL024633.

*Poulain P.M., Barbanti R., Motychev S., Zatsepin A.* Statistical description of the Black Sea near-surface circulation using drifters in 1999–2003 // *Deep Sea Research Pt I: Oceanogr. Res. Pap.* 2005. V. 52. № 12. P. 2250–2274.

*Uchida H., Imawaki S., Hu J.H.* Comparison of Kuroshio surface velocities derived from satellite altimeter and drifting buoy data // *J. Oceanogr.* 1998. V. 54. P. 115–122.

## Quality Estimation of the Altimetry-Derived Surface Geostrophic Currents in the Black Sea from the Comparison with Drifting Buoy Measurements

A. A. Kubryakov, S. V. Stanichny

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

The combined measurements of the satellite altimeters allow to determine the sea level anomalies of the Black Sea on the regular grid with high spatial resolution  $1/8^\circ$ . In this article the surface geostrophic current reconstructed from these data is comprised with the velocities, computed from drifting buoy measurements during 1999–2007. The comparison was made as for total array of in-situ data (consist of ~110000 measurements), as for each buoy individually. For the reconstruction of the altimetry-derived velocity we use two different fields of the Mean Dynamic Topography (MDT): the synthetic and climatic mean dynamic topography. The comparison show that the usage of the synthetic MDT leads to a better results when comprising to the in-situ data. In general, the altimetry-derived velocities have a rather good accuracy, and are in good agreement with the drifting buoy measurements.

**Keywords:** satellite altimetry, circulation, drifting buoys, high-resolution altimetry data, Black Sea