

## Спутниковые данные для исследования динамики поверхностного слоя Черного моря: альтиметрия на регулярной сетке и ИК-изображения высокого разрешения

А. И. Мизюк\*, Г. К. Коротаев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

\*E-mail: artem.mizyuk@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 07.12.2018 г.

**Цель.** За период более 20 лет получено весьма детальное представление об изменчивости уровня Мирового океана и его отдельных акваторий на основе спутниковых альтиметрических наблюдений. Их преимуществом является возможность достаточно быстрой оценки скоростей поверхностных течений на синоптических масштабах. Альтернативный метод исследования поверхностной динамики – оценка движений по последовательности спутниковых изображений поверхности моря в видимом/инфракрасном диапазонах. Цель данной работы – сопоставить результаты применения двух указанных методик для анализа типичной циркуляции вод верхнего слоя Черного моря.

**Методы и результаты.** С использованием результатов обработки последовательных ИК-изображений сенсора NOAA/AVHRR, а также данных об аномалии уровня моря Службы мониторинга состояния морской среды Copernicus на регулярной сетке (уровень обработки L4) и вдольтрековых измерений (уровень обработки L3) исследуется структура полей течений в северо-западной части Черного моря зимой 1999 г. Скорости поверхностных течений определяются на основе поля полного уровня моря, которое рассчитывается с использованием двух версий средней динамической топографии. Для сравнения картированных массивов альтиметрии и результатов обработки последовательности изображений предложена процедура восстановления уровня моря по компонентам скоростей течений. Демонстрируются результаты сравнения особенностей восстановленной по двум методикам приповерхностной циркуляции вод, в частности положения антициклонического вихря в северо-западной части Черного моря. Отмечается несоответствие между положениями центра вихря в полях уровня моря, построенных по данным альтиметрии и путем обработки последовательности изображений в инфракрасном диапазоне. Исследуется эволюция вихря по данным об аномалиях уровня моря. Его движение происходит скачкообразно, что может быть результатом применения используемой процедуры оптимальной интерполяции.

**Выводы.** Отмечается, что продукт спутниковой альтиметрии системы Copernicus, построенный на регулярной сетке, для бассейна Черного моря должен использоваться с учетом предоставляемой информации об ошибках интерполяции.

**Ключевые слова:** спутниковая альтиметрия, анализ последовательности изображений, оценка движения, мезомасштабная изменчивость, Черное море, Copernicus.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность заведующему отделом дистанционных методов исследований ФГБУН МГИ канд. физ.-мат. наук С. В. Станичному за предоставленные спутниковые ИК-изображения сенсора NOAA/AVHRR. Работа выполнена в Морском гидрофизическом институте РАН при финансовой поддержке РНФ (грант № 17-77-30001).

**Для цитирования:** Мизюк А. И., Коротаев Г. К. Спутниковые данные для исследования динамики поверхностного слоя Черного моря: альтиметрия на регулярной сетке и ИК-изображения высокого разрешения // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 3. С. 233–247. doi:10.22449/0233-7584-2019-3-233-247

# Dynamics of the Black Sea Upper Layer Based on Satellite Data: Gridded Altimetry versus High Resolution IR Images

A. I. Mizyuk\*, G. K. Korotaev

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

*\*e-mail: artem.mizyuk@mhi-ras.ru*

*Purpose.* During more than 20 years, very detailed notions of the sea level variability in the World Ocean and its particular parts have been obtained based on satellite altimetry observations. Their advantage consists in possibility of a fairly rapid assessment of the surface currents' velocities at synoptic scales. The alternative method for studying surface dynamics is estimation of the motions using a sequence of visible/infrared (IR) satellite images of the sea surface. The purpose of the present study is to compare the results obtained from application of two described methods used to analyze general circulation of the Black Sea surface layer.

*Methods and Results.* The structure of the current fields in the northwestern Black Sea in winter, 1999 is investigated using the results of analysis of the IR image sequence from the NOAA/AVHRR sensors, as well as the gridded sea level anomaly data (processing level L4) and the along-track measurements (level processing L3) from the Copernicus Marine Environment Monitoring Service. The surface currents' velocities are estimated based on the sea level field, which is calculated using two versions of mean dynamic topography. To compare the gridded altimetry and the results of the image sequence processing, a simple procedure is proposed for reconstructing the sea level using the current velocities' components.

The results of reconstructing the surface circulation features by two methods were compared and demonstrated, in particular, the anticyclonic eddy locations in the northwestern part of the Black Sea. It is noted that the locations of the eddy center in the sea level fields reconstructed from the altimetry data and by processing of the IR image sequence are different. Evolution of the eddy is investigated using the sea level anomaly data. It is shown that its motion is rather intermittent in time that can be a result of applying the procedure of optimal interpolation.

*Conclusions.* It is noted that the gridded satellite altimetry product from the CMEMS, being applied to the Black Sea basin, should be used with due regard for the provided information on the mapping errors.

**Keywords:** satellite altimetry, image sequence analysis, motion estimation, mesoscale variability, Black Sea, Copernicus.

**Acknowledgements:** the authors are thankful to the Head of the Remote Sensing Department, FSBSI MHI, Ph.D. S. V. Stanichny for providing satellite IR images of the NOAA/AVHRR sensors. The investigation is carried out in Marine Hydrophysical Institute, RAS, with financial support of the Russian Science Foundation (grant No. 17-77-30001).

**For citation:** Mizyuk, A.I. and Korotaev, G.K., 2019. Dynamics of the Black Sea Upper Layer Based on Satellite Data: Gridded Altimetry versus High Resolution IR Images. *Physical Oceanography*, [e-journal] 26(3), pp. 214-224. doi:10.22449/1573-160X-2019-3-214-224

## 1. Введение

Исследования динамики океана главным образом опираются на данные наблюдений. С начала 90-х гг. прошлого века значительно увеличилось количество наблюдений морской поверхности с искусственных спутников Земли (ИСЗ), что позволяет детально исследовать изменчивость полей морских бассейнов.

Особо следует отметить спутниковые альтиметрические измерения, которые дают информацию о важном параметре – уровне моря, – характеризующем геострофические течения в верхнем слое океана. Начиная с 1992 г. запущено большое количество спутников, снабженных альтиметрами [1, 2]. Поскольку облачность не препятствует проведению этих измерений, они однородны по

пространству и регулярны по времени. Это особенно важно для таких акваторий, как Черное море, где в середине 90-х гг. судовые океанографические наблюдения практически не выполнялись.

За период более 20 лет в рамках проекта AVISO+ (<https://www.aviso.altimetry.fr/>) на основе альтиметрических наблюдений получено детальное представление об изменчивости уровня Мирового океана и его отдельных акваторий [3–5]. Впоследствии накопленные в рамках этого проекта альтиметрические наблюдения и полученные на их основе продукты вошли в состав систем непрерывного анализа и прогноза состояния океана (СНАПО), например Службы мониторинга морской среды проекта *Copernicus* (*Copernicus Marine Environment Monitoring Service* \*, или сокращенно *CMEMS*), в рамках тематических центров обработки данных. Усвоение данных альтиметрических наблюдений в моделях общей циркуляции океана позволяет значительно улучшить качество анализа и прогноза состояния океанов и морей [6, 7].

Большим преимуществом альтиметрических измерений является возможность быстрой оценки скорости поверхностных течений на основе уравнений геострофического баланса [8, 9], который хорошо выполняется вдали от берегов.

Центр спутниковой альтиметрии *CMEMS* предоставляет массив данных *DUACS* \*\* (*Data Unification and Altimeter Combination System*), содержащий наблюдения вдоль треков и на регулярной сетке для глобального океана (разрешение 14 км и 0,25° соответственно). Создаются также продукты с улучшенным пространственным разрешением для отдельных бассейнов. Для акватории Черного моря их горизонтальное разрешение составляет 7 км и 0,125° ( $\approx 14$  км). Такого разрешения достаточно для исследований синоптической изменчивости глубоководной части моря, где внутренний бароклинный радиус деформации Россби находится в диапазоне 20–25 км [10].

Альтернативный метод исследований поверхностных течений на масштабах свыше 200 м основан на использовании спутниковых изображений поверхности моря в видимом или инфракрасном (ИК) диапазонах. Поле скоростей течений восстанавливается в результате обработки последовательности безоблачных снимков в предположении, что яркость изображения переносится течениями. При этом для описания переноса контрастов в поле излучения, как правило, используется уравнение переноса – диффузии [11–14].

В работе [13] восстановление скорости поверхностных течений основано на процедуре вариационной ассимиляции данных с применением сопряженных уравнений. На основе предложенной методики по данным о яркости излучения в отдельных районах Черного моря построены карты полей скорости течений и радиационной температуры. Реконструированные течения оказались более интенсивными, чем оцененные по альтиметрическим данным.

В данной работе проведен дополнительный анализ поля скорости течений, полученной в работе [13], для ее сопоставления со спутниковыми альтиметрическими измерениями уровня моря. Показано, что в Черном море продукты альтиметрии *DUACS/CMEMS* на регулярной сетке могут неверно интерпретировать синоптические процессы в тех районах, где треки ИСЗ относительно редко распределены во времени и пространстве.

\* URL: <http://marine.copernicus.eu/> (дата обращения: 30.04.2019).

\*\* URL: <https://duacs.cls.fr/> (дата обращения: 30.04.2019).

В разделе 2 приводится описание массивов (в том числе скорости течений), полученных в результате применения алгоритма вариационной ассимиляции из работы [13], которые использовались для анализа одного из событий проявления Севастопольского антициклона. Предложена и реализована простая процедура оценки поля уровня моря по результатам обработки последовательности изображений. В разделе 3 детально проанализированы особенности пространственной изменчивости полей уровня моря, построенных по данным спутниковой альтиметрии на регулярной сетке и рассчитанных на основе обработки последовательности изображений в ИК-диапазоне. Последний раздел посвящен обсуждению результатов сравнения и некоторых особенностей процедуры, используемой для объективного анализа массива аномалий уровня моря.

## 2. Данные и методы

В настоящей работе по различным данным наблюдений \* исследуется характерная картина течений верхнего слоя Черного моря в его северо-западной части в декабре 1999 г. Основным массивом, позволяющим получить оценку скоростей для исследуемого региона, являются аномалии уровня моря *DUACS* на регулярной сетке (уровень обработки *L4*) системы *CMEMS* \*\* [15]. Использован массив, распространяемый в режиме «с задержкой времени» (ре-процессинг, повторная обработка). При такой процедуре обработки становится возможным уточнить поля аномалий, привлекая для построения карт данные, которые являются формально будущими (по отношению к текущей дате). Таким образом, результат на текущие сутки строится с привлечением предыдущих и последующих альтиметрических измерений. Процедура интерполяции приведена в [16], а основные параметры и анализ результатов ее применения для океана в [15]. Отметим, что корреляционные масштабы отдельно для Черного моря в последней работе не представлены. Более детальной информации для этого района авторам найти не удалось, и можно предположить, что такое исследование в Черноморском бассейне, взятом отдельно от глобального океана, не проводилось. Выходное разрешение продукта составляет  $0,125^\circ \times 0,125^\circ$ , что в меридиональном направлении составляет  $\approx 14$  км.

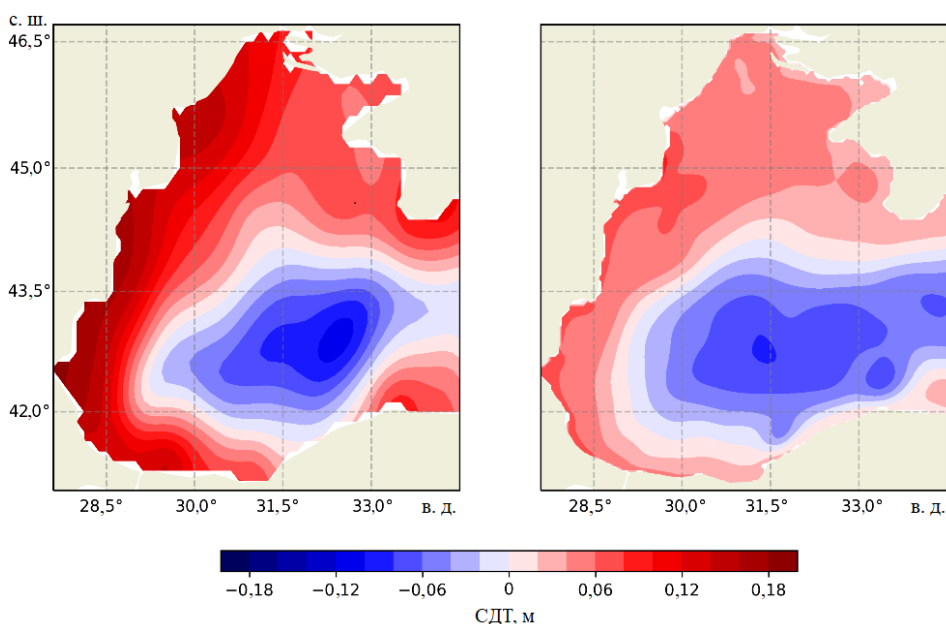
Для определения скоростей поверхностных течений необходимо поле полного уровня моря, которое можно рассчитать, используя простую формулу:  $\zeta_{DUACS} = \zeta_a + \langle \zeta \rangle$ , где  $\zeta_a$  – аномалия уровня моря,  $\langle \zeta \rangle$  – средняя динамическая топография (СДТ). Предполагается, что СДТ есть некоторая инвариантная поверхность, построенная осреднением информации об уровне моря за длительный период [9]. От этой поверхности спутники отсчитывают величину возвышения (аномалию). Такая топография на основе архивных гидрологических измерений была построена в работе [17] (СДТ<sub>1</sub>).

---

\* Исследование выполнено с использованием данных Морской службы *Copernicus* ЕС.

\*\* URL: <http://marine.copernicus.eu/> (дата обращения: 31.04.2017).

Другой способ определения СДТ – временное осреднение результатов долгосрочных модельных расчетов климатической циркуляции с усвоением данных наблюдений. Для этого здесь мы использовали массив из работы [18] (СДТ<sub>2</sub>). Различия отмеченных инвариантов для исследуемой части Черного моря демонстрируются на рис. 1. Массивы СДТ<sub>1</sub> и СДТ<sub>2</sub> имеют сходные структуры в виде восточного циклонического круговорота. При этом СДТ<sub>1</sub> на основе данных измерений характеризуется более высокими градиентами от берега в глубоководную часть моря.



**Р и с. 1.** Средняя динамическая топография (в м) в западной части Черного моря: слева – по данным измерений из работы [17]; справа – по результатам численного моделирования [18]  
**F i g. 1.** Mean dynamic topography (m) in the western Black Sea: to the left – based on the measurements from [17]; to the right – based on the results of numerical modeling [18]

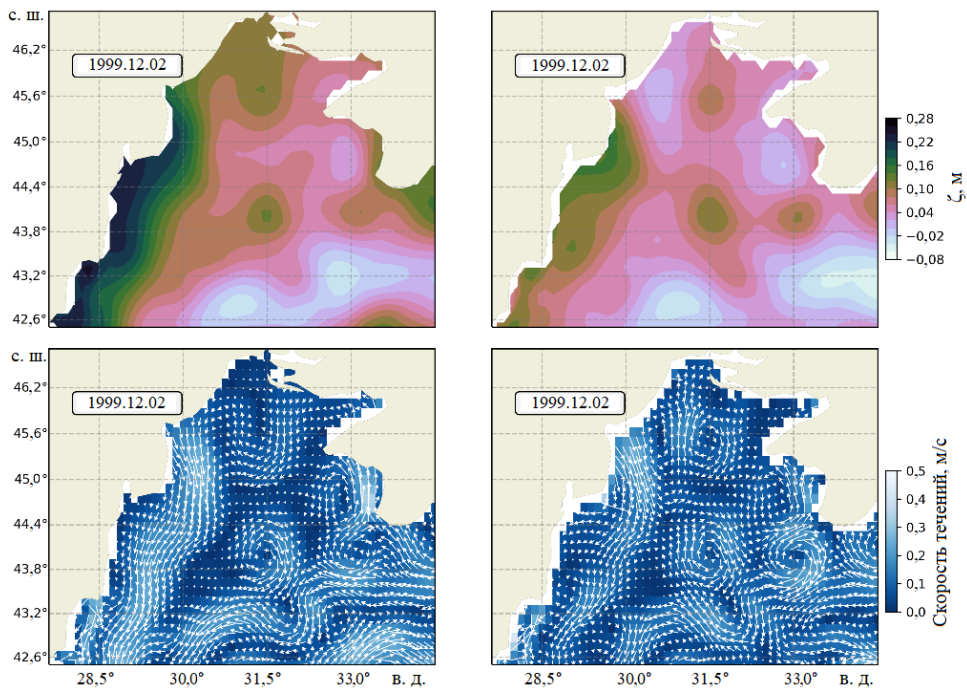
Мы проанализировали результаты применения обеих методик расчета СДТ (рис. 2). Использование разных вариантов СДТ качественно не повлияло на реконструированные поля полного уровня моря. Видно, что структуры полей уровня качественно схожи. Отметим, что вихри в картах воспроизведены только благодаря использованию данных об аномалии *DUACS/CMEMS L4*, поскольку в полях СДТ таких структур нет. Наблюдаются различия в численных значениях. Особенно заметна разница у румынского побережья, она обусловлена большим перепадом в поле СДТ<sub>1</sub> между глубоководной и прибрежной частями моря.

Скорости течений оценивались на основе уравнений геострофического баланса

$$u_g = -\frac{g}{f} \frac{\partial \zeta_{DUACS}}{\partial y},$$

$$v_g = -\frac{g}{f} \frac{\partial \zeta_{DUACS}}{\partial x},$$

где  $u_g, v_g$ , – геострофические скорости течений;  $g$  – ускорение свободного падения;  $f$  – параметр Кориолиса. Визуализация поля скоростей течений более наглядно подтверждает согласование полей уровня (рис. 2, внизу). Положение вихрей и направление их вращения на полученных картах в основном совпадает, за исключением прибрежной области северо-западного шельфа. Здесь, как отмечалось ранее, точность альтиметрических массивов невелика и геострофическое соотношение не выполняется. Большой градиент у побережья Румынии сформировал только более интенсивное вдольбереговое течение, при этом структуры полей скорости по СДТ<sub>1</sub> и СДТ<sub>2</sub> в отмеченной акватории достаточно неплохо согласуются. Анализ временных серий поля уровня в другие даты показал аналогичную картину. Поскольку результаты анализа принципиально не отличались, спутниковые изображения [13] сопоставляются с альтиметрическими измерениями (полученными с применением СДТ<sub>2</sub>).

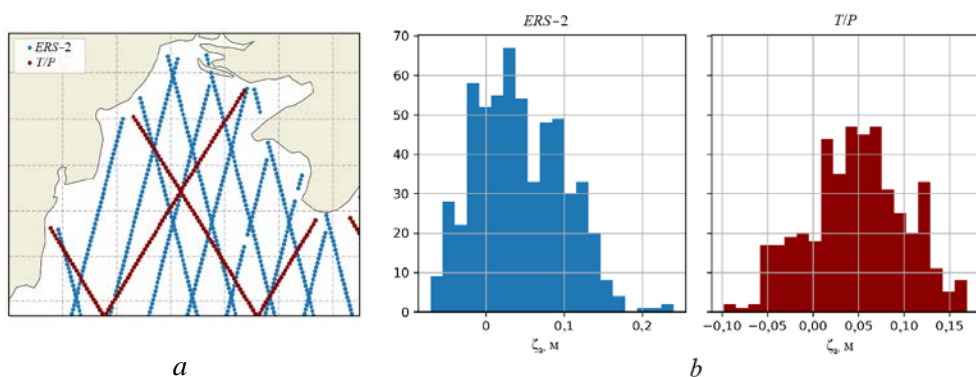


**Р и с. 2.** Поля уровня моря (в м) (вверху) и рассчитанные по ним скорости течений (в м/с) (внизу) на основе измерений *DUACS/CMEMS L4* и СДТ<sub>2</sub> [17] (слева), *DUACS/CMEMS L4* и СДТ<sub>1</sub> [18] (справа). Стрелками показано направление течений, масштаб длины стрелок одинаковый

**Fig. 2.** Sea level fields (m) (above) and the currents' velocities calculated using these fields (m/s) (below) based on the *DUACS/CMEMS L4* and *MDT<sub>2</sub>* measurements [17] (to the left) and the *DUACS/CMEMS L4* and *MDT<sub>1</sub>* ones [18] (to the right). The currents' direction is shown by the arrows; the scales of the arrows' lengths are the same

Особенности процедуры объективного анализа, использованной для построения аномалий уровня на регулярной сетке, исследованы с привлечением вдольтрековых альтиметрических измерений *DUACS*\* службы *CMEMS* уровня обработки *L3*. Этот массив, как и *DUACS/CMEMS L4*, является репроцессингом и предоставляется в режиме «с задержкой по времени». В работе мы использовали данные за ноябрь – декабрь 1999 г. Их пространственное разрешение составляет 7 км.

В этот период измерения выполнялись спутниками *ERS-2* и *TOPEX/Poseidon (T/P)*. Треки *ERS-2* покрывают акваторию моря более плотно, чем треки *T/P*, с расстоянием между треками порядка 60 км. Удаленность друг от друга треков *T/P* выше, по сравнению с треками *ERS-2*, более чем в три раза (рис. 3, *a*). На рис. 3, *b* представлены гистограммы распределения измерений за исследуемый период по каждому из спутников, поскольку пространственное положение измерений не позволяет судить о полном объеме имеющихся данных. Отметим, что объем данных *ERS-2* больше приблизительно на 20%, чем объем данных *T/P* (547 и 447 измерений соответственно).



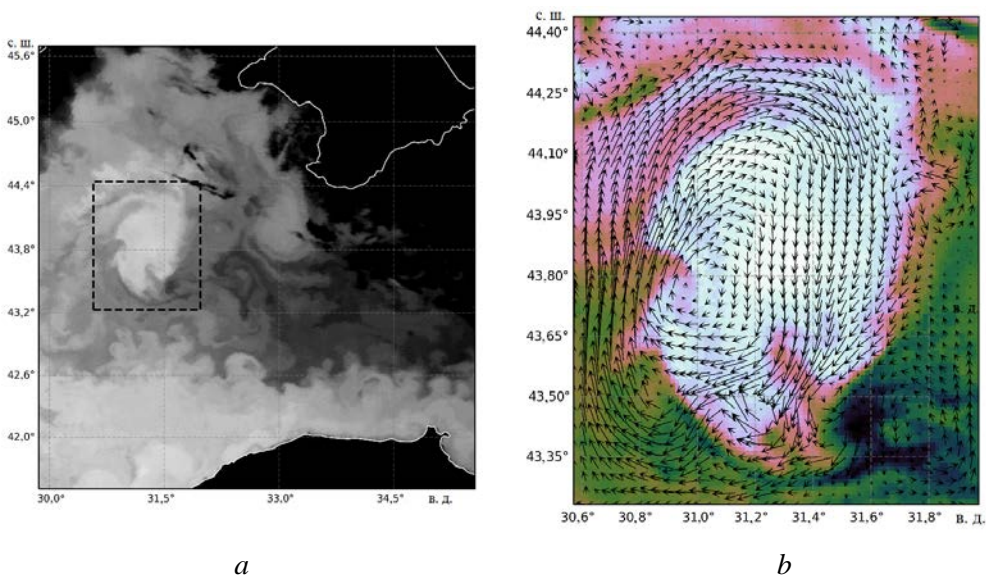
**Р и с. 3.** Альтиметрические измерения *DUACS/CMEMS* с ноября по декабрь 1999 г. вдоль треков спутников *ERS-2* и *T/P* в исследуемом районе: *a* – пространственное положение треков измерений; *b* – гистограммы распределения измерений за весь период для каждого спутника  
**F i g. 3.** *DUACS/CMEMS* altimetry measurements in November–December, 1999 along the *ERS-2* and *T/P* tracks in the region under study: *a* – spatial position of the measurements’ tracks; *b* – histograms of the measurements’ distribution for the whole period for each satellite

Данные сканирующего ИК-радиометра *NOAA/AVHRR* служат независимым источником информации о структуре течений в исследуемой акватории. Алгоритм оценки скоростей течений на основе последовательных изображений, как было отмечено, предложен в работе [13]. На рис. 4, *a* демонстрируется фрагмент одного изображения из серии снимков, датированного 2 декабря 1999 г. Благодаря пространственному разрешению 1 км можно наблюдать ряд проявлений мезомасштабных процессов как в шельфовой зоне, так и в глубоководной части моря. На изображении хорошо выражено большое количество динамических структур у Анатолийского побережья. У юго-западной оконечности Крымского п-ова видно формирование Севастопольского антициклона. Несколько ранее сформировавшийся, более ярко выраженный анти-

\* URL: <http://marine.copernicus.eu/> (дата обращения: 23.03.2017).



циклонический вихрь уже оторвался от побережья и движется вдоль свала глубин. На рисунке он выделен пунктирным прямоугольником, увеличенное изображение выделенной области приведено на рис. 4, *b*. При детальном рассмотрении здесь прослеживаются более мелкие пространственные структуры. Поле скоростей течений, восстановленное в результате применения алгоритма из работы [13], также представлено на рис. 4, *b*. Отметим, что скорости течений достаточно хорошо согласованы со спутниковым изображением.



**Р и с. 4.** Яркостная температура поверхности моря по данным сенсора *NOAA/AVHRR* на 2 декабря 1999 г. [13] (*a*); увеличенное изображение выделенной области (градиент) и восстановленные поля скоростей течений [13] (стрелки) (*b*)

**F i g. 4.** Brightness temperature of the sea surface based on the *NOAA/AVHRR* sensor data on December 2, 1999 [13] (*a*); zoom of the marked area (gradient) and the reconstructed fields of the currents' velocities [13] (arrows) (*b*)

Достоверность восстановленных по алгоритму из работы [13] полей подтверждается тем, что в рассматриваемой области в полях уровня и геострофических скоростей по данным *DUACS L4* за эту же дату также наблюдается антициклон (см. рис. 2). Сравнение его положения по данным *DUACS L4* с результатами анализа ИК-изображений, а также подробное сопоставление двух полей уровня рассмотрим в разделе 3.

Сравнение картированных массивов альтиметрии *DUACS/CMEMS* и результатов обработки ИК-изображений *NOAA/AVHRR* удобно проводить, если восстановить уровень моря по информации о горизонтальных компонентах скорости течений. Для этого применим следующие соотношения. Введем функцию тока  $\psi$  такую, что

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = \frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (1)$$

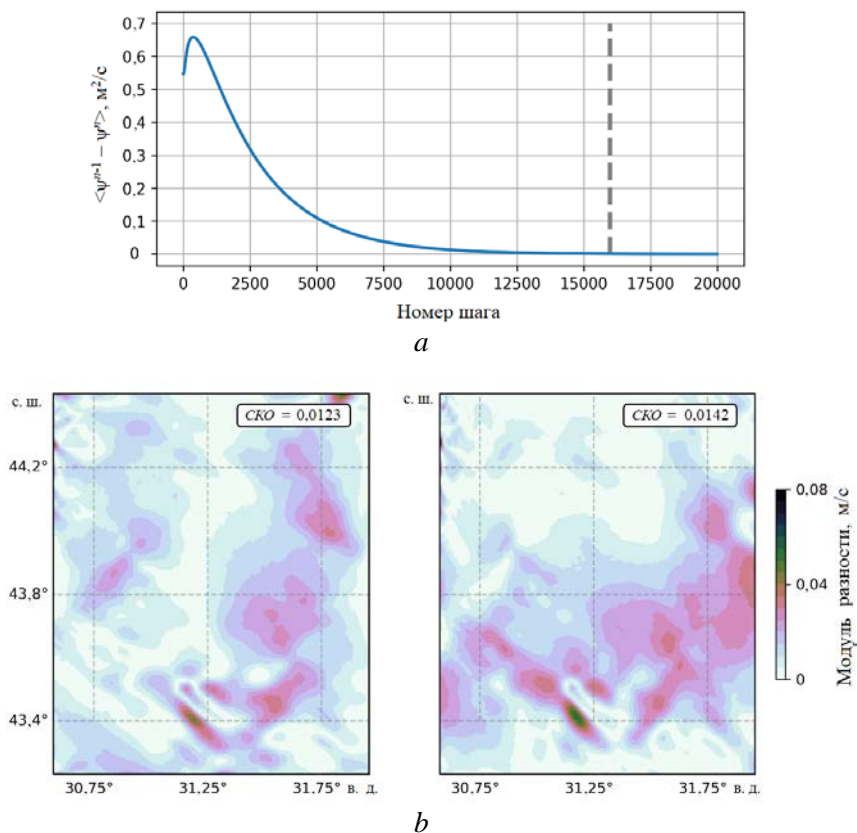


Далее воспользуемся уравнением расчета функции тока из завихренности поля скорости

$$\Delta\psi = \omega, \quad (2)$$

где  $\omega$  – завихренность поля скорости, которая в нашем двумерном случае имеет только  $z$ -компоненту:  $\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ . Уравнение (2) – эллиптическое

уравнение Пуассона. Для его решения на границе области задавалось условие Неймана. Уравнение решалось численно методом конечных разностей. Итерационная процедура решения использовала 20000 итераций. При этом поведение со временем средней по акватории разности между решениями уравнения (2) в моменты времени  $n$  и  $(n - 1)$  показывает, что в момент времени  $n \approx 16000$  решение примерно достигло стационарного состояния с величиной отклонения  $\varepsilon \leq 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$  (рис. 5, *a*).



**Р и с. 5.** Оценка сходимости и анализ точности процедуры расчета функции тока: *a* – поведение со временем средней по акватории разности функций тока ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) в моменты времени  $n$  и  $(n - 1)$  ( $\varepsilon = \psi^n - \psi^{n-1}$ ); *b* – модули разностей  $|u - u_{\text{est}}|$  (слева) и  $|v - v_{\text{est}}|$  (справа)

**F i g. 5.** Estimation of convergence and analysis of accuracy of the stream function calculation: *a* – time behavior of the area-average difference of the stream functions ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) on the time moments  $n$  and  $(n - 1)$  ( $\varepsilon = \psi^n - \psi^{n-1}$ ); *b* – absolute differences  $|u - u_{\text{est}}|$  (to the left) and  $|v - v_{\text{est}}|$  (to the right)

Для проверки точности процедуры были оценены компоненты скоростей течений  $u_{est}$  и  $v_{est}$  по рассчитанной функции тока с использованием соотношения типа (1). В качестве характеристики ошибок оценки были выбраны модули отклонений  $|u - u_{est}|$  и  $|v - v_{est}|$ , представленные на рис. 5, *b*. Как видно, рассчитанные скорости достаточно хорошо согласуются с результатами работы [13]. Отличие наблюдается только в областях с ярко выраженными мелкомасштабными структурами. Среднеквадратические отклонения (СКО) рассчитанных скоростей от оценок работы [13] не превышают 0,0142 м/с.

Уровень моря выражается через функцию тока по формуле

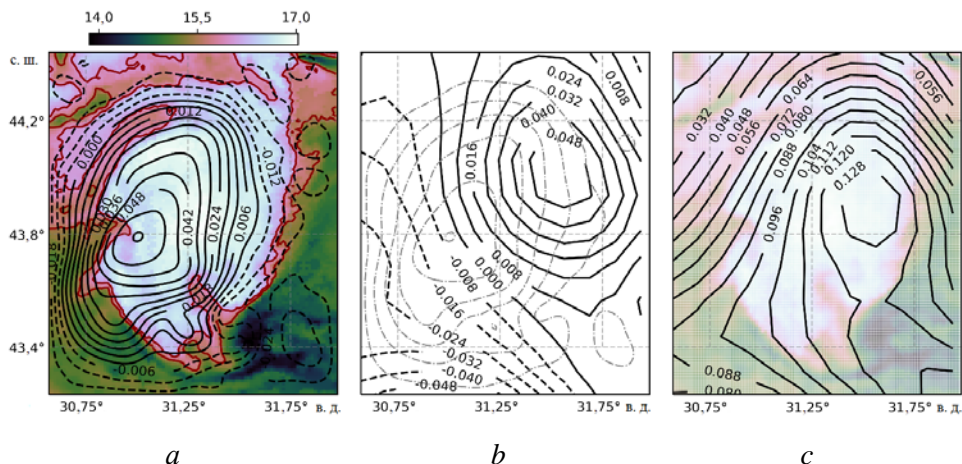
$$\zeta = \frac{f}{g} \psi. \quad (3)$$

Для сопоставления с картированными данными полного уровня, полученными на основе массивов *DUACS/CMEMS*, из приведенной характеристики было вычтено пространственное среднее.

## 2. Результаты

Рассмотрим более подробно уровень моря, восстановленный из уравнения (3), совместно с полями скорости из работы [13]. Оба поля довольно хорошо согласуются с полем температуры (рис. 6, *a*; 4, *b*). Об этом можно судить по выделенной на карте изотерме (красная изолиния), которая отражает движение водных масс по периферии с образованием более мелкомасштабных динамических структур. Например, в северной части рис. 6, *a* располагается холодный филамент длиной  $\sim 80$  км, вытянутый вдоль изолиний уровня, т. е. вдоль направления движения воды. Еще один филамент (около  $43,8^\circ$  с. ш.,  $30,8^\circ$  в. д.), вероятно, находится близко к центру вихря, поскольку имеет незначительную протяженность ( $\sim 20$  км). Его небольшой размер соответствует малой скорости движения в этой точке (рис. 6, *a*). Локальный минимум температуры можно наблюдать также в юго-восточной части исследуемой акватории. Вероятной причиной этого может быть мелкомасштабный циклонический вихрь, который наблюдается в полях скоростей течений и в поле уровня.

Рассмотрим теперь пространственную изменчивость поля уровня по данным *DUACS/CMEMS* (см. рис. 4, *b*). Для наглядности на карту нанесены некоторые изолинии уровня, рассчитанного по значениям скоростей течений из работы [13]. Картированные данные спутниковой альтиметрии показывают, что положение вихря смещено на северо-восток относительно центра пятна теплой воды на спутниковом изображении. Мелкомасштабные структуры в полях спутниковой альтиметрии не проявляются, и сами поля выглядят достаточно сглаженными. Напомним, что вихрь проявляется в поле уровня только при учете аномалий из архива *DUACS*, поскольку в СДТ в этой области вихревые структуры отсутствуют (см. рис. 3; 6, *a*). Центр вихря в поле аномалий смещен к периферии пятна теплой воды (рис. 6, *c*). Добавление поверхности СДТ к полю аномалий лишь незначительно изменило его положение. (рис. 6, *b*, *c*).

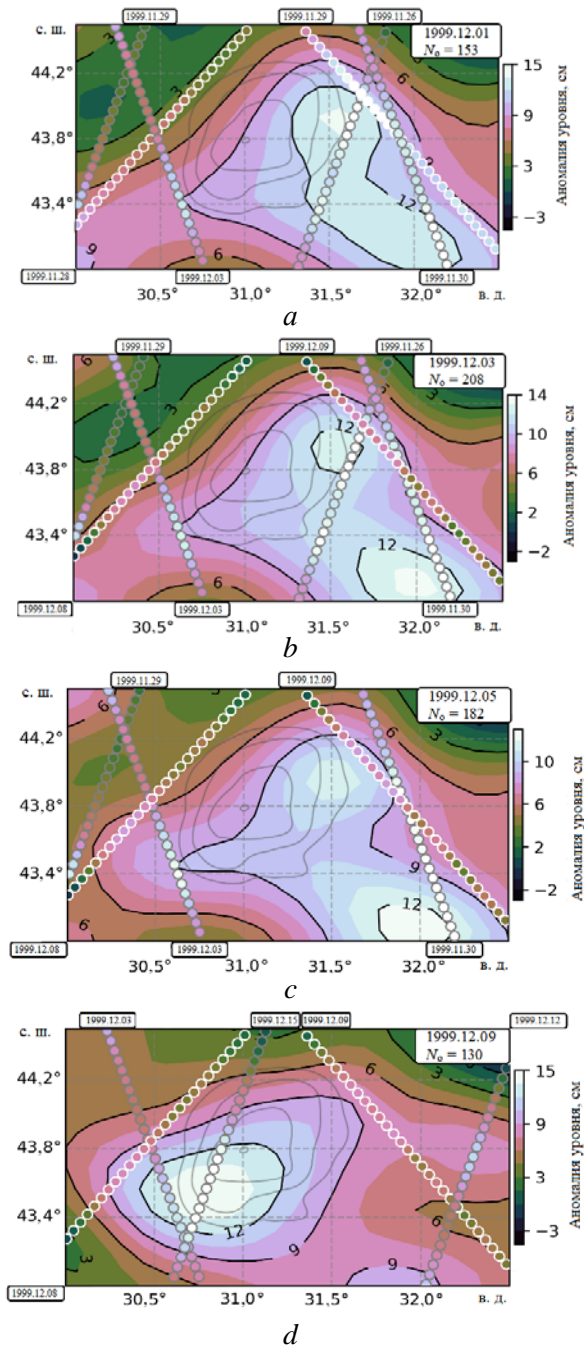


**Р и с. 6.** Сравнение результатов обработки ИК-изображений и данных *DUACS/CMEMS L4*: *a* – температура поверхности и уровень моря (черные изолинии) 2 декабря 1999 г. по данным сканера *NOAA/AVHRR* из работы [13]; *b* – уровень моря (черные изолинии) по данным *DUACS/CMEMS* и СДТ<sub>2</sub>; *c* – аномалия уровня моря на регулярной сетке по данным *DUACS/CMEMS*

**F i g. 6.** Comparison of the results of the IR images and *DUACS/CMEMS L4* data processing: *a* – surface temperature and sea level (black isolines) on December 2, 1999 based on the *NOAA/AVHRR* scanner data from [13]; *b* – sea level (black isolines) based on the *DUACS/CMEMS* and *MDT<sub>2</sub>* data; *c* – gridded sea level anomaly based on the *DUACS/CMEMS* data

Рассмотрим также результаты ретроспективного анализа гидрологических полей Черного моря. При проведении этого анализа усваивались данные вдольтрековых альтиметрических измерений в модели циркуляции вод бассейна. Поле уровня моря, построенное в результате реанализа, соответствует восстановленному по альтиметрии на регулярной сетке с помощью интерполяции. Коэффициент взаимной корреляции полей достигает 0,7. Здесь тоже наблюдается смещение структуры в поле уровня моря относительно поля температуры. Отметим, что при проведении и реанализа, и интерполяции используются альтиметрические наблюдения как до, так и после текущего момента времени.

Чтобы выяснить причину несоответствия между положениями центра вихря в полях уровня моря, построенных по данным альтиметрии и путем обработки последовательности ИК-изображений поверхности моря, исследуем его эволюцию в поле аномалий уровня. Анализ последовательных карт показал, что в отдельные моменты времени происходит скачкообразное смещение центра вихря (рис. 7). Это вызвано плохим распределением во времени и по пространству вдольтрековых измерений (см. рис. 4). Недостаточное пространственное и временное покрытие треков для построения карт на регулярной сетке такого разрешения усугубляется использованием пространственно-временной гауссовой корреляционной функции с параметрами, характерными для масштабов океана.



**Р и с. 7.** Эволюция поля аномалий уровня моря (см) по данным *DUACS/CMEMS* в начале декабря 1999 г. для исследуемой акватории. Шаг черных изолиний – 3 см. Кружками обозначены положения точек измерений вдоль треков спутников: с серым контуром – спутника *ERS-2*, с белым контуром – спутника *T/P*.  $N_0$  – число измерений в пределах временного окна  $\pm 7$  сут от текущей даты. Серые изолинии – положение вихря по данным *NOAA/AVHRR* [13]

**F i g. 7.** Evolution of the sea level anomalies' field (cm) based on the *DUACS/CMEMS* data in early December, 1999 for the water area under study. The step of the black isolines is 3 cm. Circles denote positions of the measurement points along the satellite tracks: with grey outline – the *ERS-2* satellite, with white outline – the *T/P* satellite.  $N_0$  – number of measurements within the time period  $\pm 7$  days from a current date. Grey isolines – the eddy position based on the *NOAA/AVHRR* data [13]

Исследуемый антициклон наблюдается на карте аномалии и 1 декабря 1999 г. (рис. 7, *a*). На рис. 7 также представлены вдольтрековые альтиметрические измерения, попадающие во временное окно  $\pm 7$  сут для каждой даты. Это окно было выбрано для репрезентативности, поскольку здесь измерения будут иметь относительный вес выше 0,8. Очевидно, что такая структура в поле аномалий проявилась благодаря наличию треков альтиметрических спутников в северо-восточной части исследуемой области: около точки ( $44^\circ$  с. ш.,  $31,75^\circ$  в. д.) пересекаются три трека. Таким образом можно объяснить смещение вихря в северо-восточном направлении, отмеченное ранее. Интенсивность вихря снижается к 3 декабря (рис. 7, *b*) по причине того, что один из отмеченных треков *ERS-2* имеет меньший вес при процедуре интерполяции. А 12 декабря 1999 г. мы наблюдаем появление нового трека спутника *T/P* в восточной части карты. На рис. 7, *b* новый трек перекрывает предыдущие от *T/P* и от *ERS-2*. Видно, что он содержит новые значения измерений.

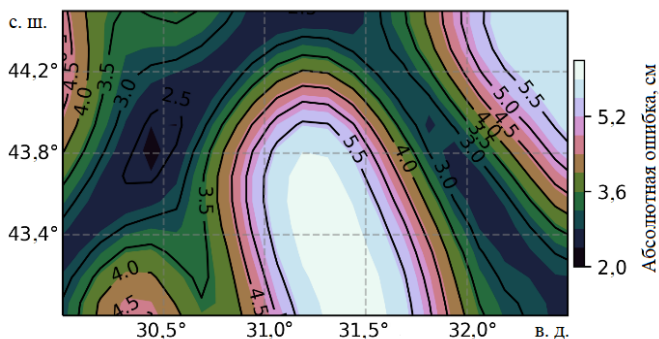
Изолиния «12 см» внутри исследуемого антициклона пропадает на изображении от 5 декабря (рис. 7, *c*), что говорит о влиянии поступившей информации на результат процедуры интерполяции. В юго-западной части акватории за счет вклада измерений *ERS-2*, которые присутствовали на картах и до этого, наблюдается формирование новой динамической структуры. Однако здесь вес этих измерений возрастает. Кроме того, конфигурация спутниковых траекторий меняется, их становится меньше. Окончательно новый вихрь в юго-восточной части формируется в поле аномалий уже 7 декабря. Интенсификацию этого вихря и полное исчезновение первоначального, наблюдавшегося в поле аномалий ранее, можно наблюдать уже 9 декабря (рис. 7, *d*). Мы видим, что 5–9 декабря нет треков, которые покрывали бы центральную область карты (от  $31^\circ$  в. д. до  $31,5^\circ$  в. д.) в нашем временном окне (14 сут). Очевидно, что ошибка интерполяции в этой области должна быть значительной.

В целом представленные поля аномалии уровня демонстрируют перемещение антициклона, которое выглядит несколько неестественным. Нельзя точно определить, являются ли эти две структуры (рис. 7, *c* и *d*) проявлением одного процесса или двух разных, происходящих друг за другом.

### 3. Обсуждение

Проведенный анализ показывает, что к использованию стандартных альтиметрических продуктов в Черном море, а возможно, и в ряде других окраинных морей нужно относиться с определенной осторожностью. Альтиметрические миссии ориентированы в основном на воспроизведение синоптической изменчивости открытого океана, причем это относится не только к разрешению спутниковых измерений вдоль треков, но и к расположению самих треков в пространстве и во времени. Снимки, сделанные только двумя альтиметрами (как это было в декабре 1999 г.) на орбите, позволяют удовлетворительно идентифицировать характеристики вихревых образований в океане, где радиус Россби имеет величину 40–50 км. Однако, как показывают результаты реанализа, в Черном море, где радиус Россби в два раза меньше, даже улучшение вдольтрекового разрешения в отдельных случаях не позволит адекватно оценивать непрерывную эволюцию вихревых образований.

Данное утверждение демонстрирует карта формальной ошибки интерполяции, предоставляемой в массиве *DUACS/CMEMS*. Как видно, в отмеченной ранее области от 31° в. д. до 31,5° в. д. эта ошибка в 2,5–3 раза выше, чем на пути спутниковых треков (рис. 8).



**Р и с. 8.** Средняя за период 1–10 декабря 1999 г. формальная ошибка построения карты аномалии уровня моря *DUACS/CMEMS*

**Fig. 8.** Formal mapping error (average for December 1–10, 1999) of the *DUACS/CMEMS* sea level anomaly

Несмотря на то что в последующие годы число альтиметрических миссий возросло, нужно аккуратно использовать массивы альтиметрических наблюдений, особенно проинтерполированные на регулярную сетку, для усвоения в моделях и их валидации или для анализа динамики поверхностного слоя Черного моря. При ассимиляции спутниковых альтиметрических наблюдений в модели циркуляции Черного моря необходимо учитывать структуру возможных ошибок, аналогичных представленным на рис. 8.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Satellite Altimetry and Earth Sciences : A Handbook of Techniques and Applications / Eds. L.-L. Fu, A. Cazenave. San Diego : Academic Press, 2001. 463 p. (International Geophysics Series, vol. 69).
2. *Fu L. L., Le Traon P.-Y.* Satellite altimetry and ocean dynamics // *Comptes Rendus Geoscience*. 2006. Vol. 338, iss. 14–15. P. 1063–1076. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.05.015>
3. Satellite altimetry-based sea level at global and regional scales / M. Ablain [et al.] // *Surveys in Geophysics*. 2017. Vol. 38, iss. 1. P. 7–31. <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9389-8>
4. *Morrow R., Le Traon P.-Y.* Recent advances in observing mesoscale ocean dynamics with satellite altimetry // *Advances in Space Research*. 2012. Vol. 50, iss. 8. P. 1062–1076. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.09.033>
5. *Xu Y., Li J., Dong S.* Ocean circulation from altimetry: Progresses and challenges // *Ocean Circulation and El Nino: New Research* / Eds. J. A. Long, D. S. Wells. New York, USA : Nova Science Publishers, 2009. Chapter 3. P. 71–97. URL: [https://www.aoml.noaa.gov/phod/docs/OceanFromAltimetry-Xu\\_et\\_al.pdf](https://www.aoml.noaa.gov/phod/docs/OceanFromAltimetry-Xu_et_al.pdf) (date of access: 30.04.2019).
6. Assimilating along-track altimetric observations through local hydrostatic adjustment in a Global Ocean variational assimilation system / A. Storto [et al.] // *Monthly Weather Review*. 2011. Vol. 139, no. 3. P. 738–754. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3350.1>

7. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system / G. K. Korotaev [et al.] // *Ocean Science*. 2011. Vol. 7, iss. 5. P. 629–649. <https://doi.org/10.5194/os-7-629-2011>
8. Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data / G. Korotaev [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. Vol. 108, iss. C4. 3122. <https://doi.org/10.1029/2002JC001508>
9. *Kubryakov A. A., Stanichny S. V.* Mesoscale eddies in the Black Sea from satellite altimetry data // *Oceanology*. Vol. 55, iss. 1. P. 56–67. <https://doi.org/10.1134/S0001437015010105>
10. Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейфтерным данным / В. М. Журбас [и др.] // *Океанология*. 2004. Т. 44, № 1. С. 34–48. URL: <http://naukarus.com/tsirkulyatsiya-vod-i-harakteristiki-raznomasshtabnyh-techeniy-v-verhnem-sloe-chernogo-morya-po-drifternym-dannym> (дата обращения: 20.03.2019).
11. *Béréziat D., Herlin I., Younes L.* A generalized optical flow constraint and its physical interpretation // *Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2000 (Cat. No.PR00662)*. Hilton Head Island, SC : IEEE, 2000. Vol. 2. P. 487–492. doi:10.1109/CVPR.2000.854890
12. Data assimilation of satellite images within an oceanographic circulation model / E. Huot [et al.] // *2006 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing Proceedings*. Toulouse, France : IEEE, 2006. P. II-II. doi:10.1109/ICASSP.2006.1660330
13. Retrieving ocean surface current by 4-D variational assimilation of sea surface temperature images / G. Korotaev [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. 112, iss. 4. P. 1464–1475. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.04.020>
14. *Kubryakov A., Plotnikov E., Stanichny S.* Reconstructing large- and mesoscale dynamics in the Black Sea region from satellite imagery and altimetry data – a comparison of two methods // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, iss. 2. Article 239. <https://doi.org/10.3390/rs10020239>
15. DUACS DT2014: the new multi-mission altimeter data set reprocessed over 20 years / M.-I. Pujol [et al.] // *Ocean Science*. 2016. Vol. 12, iss. 5. P. 1067–1090. <https://doi.org/10.5194/os-12-1067-2016>
16. *Bretherton F. P., Davis R. E., Fandry C. B.* A technique for objective analysis and design of oceanographic experiments applied to MODE-73 // *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1976. Vol. 23, iss. 7. P. 559–582. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(76\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0011-7471(76)90001-2)
17. *Kubryakov A. A., Stanichny S. V.* Reconstruction of mean dynamic topography of the Black Sea for altimetry measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012. Vol. 48, iss. 9. P. 973–979. <https://doi.org/10.1134/S0001433812090095>
18. Ассимиляция климатических гидрологических данных в модели Черного моря на основе алгоритма адаптивной статистики ошибок прогноза / В. В. Кныш [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2008. № 1. С. 26–37. URL: [http://mgfj.ras.ru/images/files/2008/01/200801\\_03.pdf](http://mgfj.ras.ru/images/files/2008/01/200801_03.pdf) (дата обращения: 20.03.2019).

*Об авторах:*

**Мизюк Артем Игоревич**, старший научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4885-354X**, **ResearcherID: C-6125-2016**, [artem.mizyuk@mhi-ras.ru](mailto:artem.mizyuk@mhi-ras.ru)

**Коротаев Геннадий Константинович**, научный руководитель ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, **ResearcherID: K-3408-2017**, [gkorotaev@gmail.com](mailto:gkorotaev@gmail.com)