

А.А. Кубряков, С.В. Станичный, Е.В. Плотников

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь*

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЙ СКОРОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

В работе двумя различными дистанционными методами: по данным спутниковой альтиметрии и по последовательным сериям изображений морской поверхности, полученным с помощью спутниковых радиометров были восстановлены поля поверхностных скоростей течений. Показана эффективность обоих методов для описания мезомасштабных особенностей циркуляции Черного моря, вызванных вихревыми структурами и струйными течениями. Продемонстрированы преимущества и недостатки рассматриваемых способов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *поверхностные течения, альтиметрия, спутниковые изображения, дистанционные методы.*

**Введение.** Скорости течений являются определяющим параметром, необходимым для определения и прогноза циркуляции Мирового океана и решения целого ряда задач современной океанологии: исследования транспорта тепла и примесей, динамики мезомасштабных вихрей и многих других. Кроме этого такие данные востребованы при решении большого количества других прикладных задач: обеспечение безопасности судоходства и добычи и транспорта нефти, моделирования динамики и прогноза распространения загрязнений на морской поверхности и т.д.

Прямые измерения скоростей течений с помощью контактных методов не обеспечивают существенного пространственного покрытия изучаемых акваторий. Альтернативой контактным методам являются дистанционные методы зондирования океана из космоса, которые позволяют проводить регулярные измерения на всей акватории Мирового океана.

В данной работе рассмотрены два метода, позволяющие восстановить скорости течений по спутниковым данным:

- использование спутниковой альтиметрии для определения скоростей градиентных течений [1];
- использование последовательности изображений Черного моря, получаемых с помощью спутниковых радиометров в видимом и инфракрасном (ИК-) диапазонах [2 – 4].

Каждый из этих способов имеет свои преимущества и недостатки.

Так, расчет по последовательным изображениям невозможен при отсутствии выраженных градиентов температуры или оптических свойств поверхности, трансформируемых течениями. Также существенным мешающим фактором является наличие облачности. Основное преимущество такого метода – возможность получить высокое пространственное разрешение.

Альтиметрический метод не зависит от наличия облачности, но имеет худшее пространственное разрешение.

Целью работы является сопоставление пространственных полей течений, полученных упомянутыми способами для Черного моря.

### Используемые данные.

Для сопоставления были отобраны две ситуации с хорошо выраженными на картах температуры квазистационарными вихревыми структурами и одна с переносом вихревой структуры струйным течением, показанные на рис. 1:

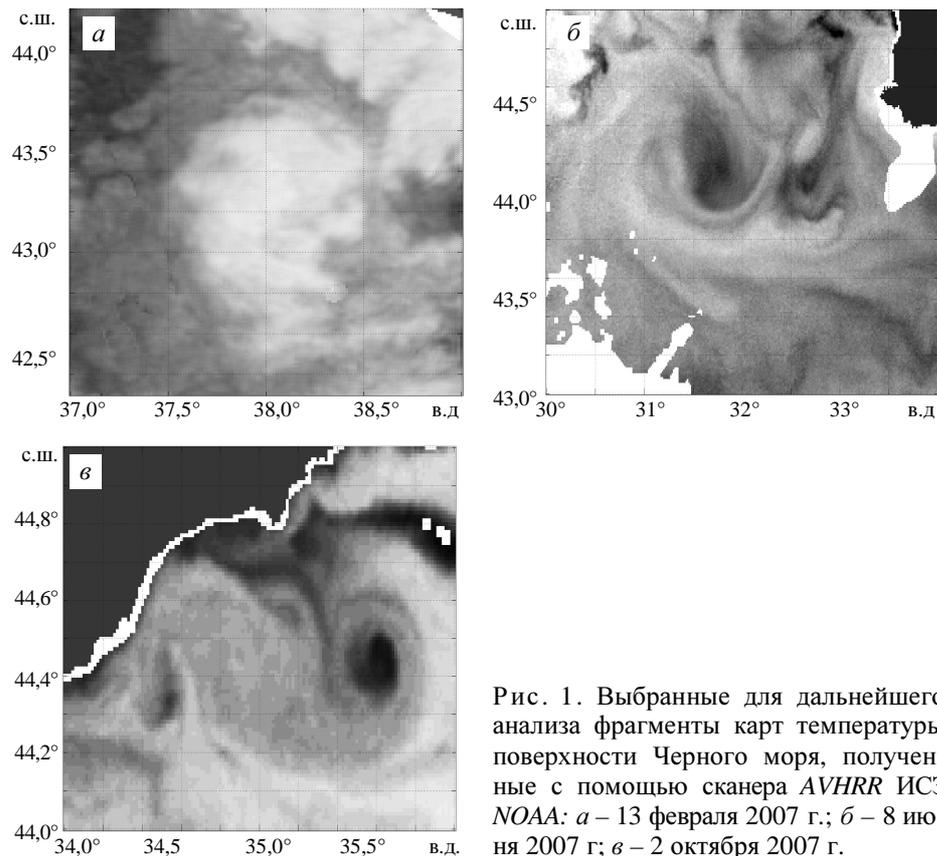


Рис. 1. Выбранные для дальнейшего анализа фрагменты карт температуры поверхности Черного моря, полученные с помощью сканера AVHRR ИСЗ NOAA: а – 13 февраля 2007 г.; б – 8 июня 2007 г.; в – 2 октября 2007 г.

*а) Вихревое образование в северо-восточной части Черного моря 13 февраля 2007 г.*

Для определения поверхностных скоростей по данным альтиметрии для данной ситуации были использованы региональные карты аномалий уровня на сетке  $1/8$  градуса за 07.02.2007 г. и 14.02.2007 г., представленные на сайте AVISO. Эти данные были линейно интерполированы на 13.02.2007 г. 00:00 (UTC).

Для расчета поверхностных скоростей были использованы снимки поверхностной температуры Черного моря, полученные сканером AVHRR ИСЗ NOAA 13.02.2007 г. 18:40 (UTC), 13.02.2007 г. 23:15 (UTC), 14.02.2007 г. 8:36 (UTC) и 14.02.2007 г. 10:42 (UTC).

*б) Вихревое образование в северо-западной части Черного моря к западу от Крымского полуострова, наблюдавшееся 8 июня 2007 г.*

Использовались региональные карты аномалий уровня на сетке  $1/8$  градуса за 06.06.2007 г. и 13.06.2007 г., представленные на сайте

AVISO. Эти данные были линейно проинтерполированы на 08.02.2007 г. 00:00 (UTC).

Для расчета поверхностных скоростей были использованы снимки поверхностной температуры акватории Черного моря, полученные с ИСЗ NOAA 08.06.2007 г. 8:07(UTC), 08.06.2007 г. 11:11 (UTC), 08.06.2007 19:28 (UTC) и 08.06.2007 г. 23:34 (UTC)

в) Вихревая структура в струйном течении возле юго-западного побережья Крыма 2 октября 2007 года

Использовались региональные карты аномалий уровня на сетке  $\frac{1}{8}$  градуса за 26.09.2007 г. и 03.10.2007 г., представленные на сайте AVISO. Эти данные были линейно проинтерполированы на 02.10.2007 00:00 (UTC).

Для расчета поверхностных скоростей были использованы снимки поверхностной температуры акватории Черного моря, полученные с помощью сканера AVHRR ИСЗ NOAA 01.10.2007 г. 11:28 (UTC), 01.10.2007 г. 18:33 (UTC), 01.10.2007 г. 23:50 (UTC), 02.10.2007 г. 8:29 (UTC) и 02.10.2007 г. 19:49 (UTC).

#### Методы расчета скоростей.

а) Спутниковая альтиметрия.

Для расчета скоростей по данным спутниковой альтиметрии использовались регулярные данные об аномалиях уровня моря на сетке, имеющей шаг по широте и долготе  $0,125^\circ \times 0,125^\circ$  соответственно, с временным разрешением 7 дней за 1995 – 2009 гг. [5, 6], полученные по вдольтрековым данным современных спутниковых альтиметрических миссий Jason-1, Jason-2, Envisat, TOPEX/Poseidon и GFO.

На рис. 2 в качестве примера показана карта аномалий уровня Черного моря, полученная по данным альтиметрической съемки, выполненной 15 октября 2008 г.

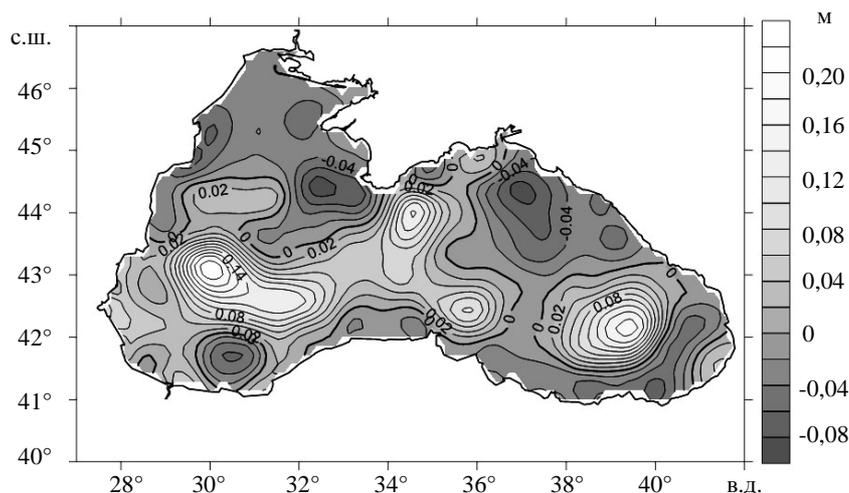


Рис. 2. Пример карты аномалий уровня Черного моря по данным альтиметрической съемки, выполненной 15 октября 2008 г.

При создании массивов в исходные альтиметрические данные были введены традиционные для таких измерений поправки на ошибки измерения высоты орбиты спутника, коррекции на инструментальные ошибки, на возмущения за счет влажной тропосферы, сухой тропосферы, ионосферных эффектов [7].

Абсолютная динамическая топография  $h$  была получена как сумма аномалий уровня и средней динамической топографии. В работе использовалась средняя динамическая топография Черного моря, восстановленная на основе сопоставления данных *SVP*-дрифтеров, судовых гидрологических съемок и альтиметрических измерений [8] (см. рис. 3).

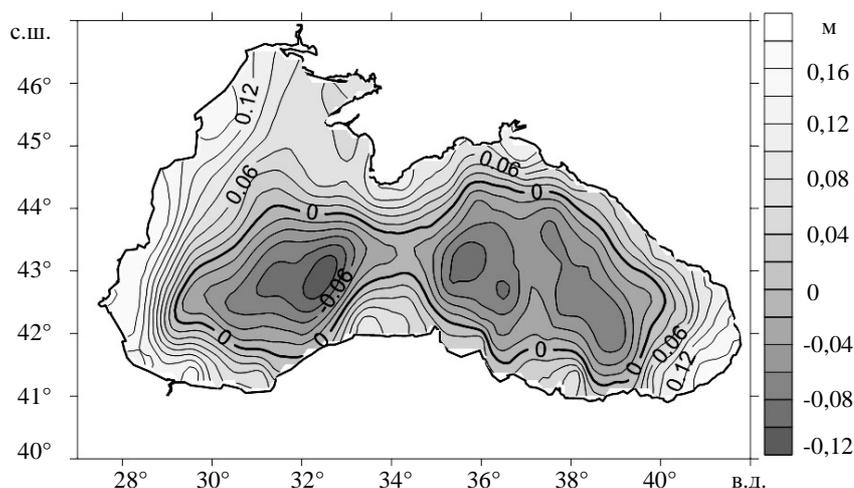


Рис. 3. Средняя динамическая топография Черного моря, полученная в работе [8] «синтетическим» методом.

Из уравнений геострофического баланса по градиентам динамической топографии  $h$  определяют скорости течений в геострофическом приближении:

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

здесь  $u_g, v_g$  – геострофические скорости;  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;  $f = 10^{-4}$  с<sup>-1</sup> – параметр Кориолиса.

*б) Вариационный метод.*

Для расчетов полей скорости поверхностных течений может быть использован анализ временных серий спутниковых изображений поверхности акватории в ИК-диапазоне. Достоинствами этого источника данных являются полное пространственное покрытие изучаемых сцен, хорошее пространственное разрешение получаемых изображений. Недостатками – часто возникающие искажения в данных, которые могут быть очень значительными. Причиной таких искажений является непрозрачность в ИК-диапазоне таких атмосферных образований, как облачность или атмосферный туман. Также, из-за возникновения в условиях малых ветров в дневное время про-

гревов поверхностного слоя, в соответствующих фрагментах карт температур могут наблюдаться завышенные значения. Кроме того, методики расчета полей скоростей по сериям изображений сводятся к решению обратной задачи и накладывают на качество данных дополнительные требования.

В данной работе использовались данные сканера AVHRR, относящиеся к акватории Черного моря. В типичном случае серия содержит от 3 до 5 цифровых карт температур, относящихся к временному интервалу, не превышающему 3-х суток. Карты не должны содержать временные перепады значений, причиной которых не является перенос. Фрагменты, содержащие искажения, должны составлять незначительную часть площади по сравнению с общей рассматриваемой сценой. Заметим, что данным требованиям удовлетворяет лишь небольшая часть имеющихся серий изображений, что затрудняет расчет полей скоростей течений на регулярной основе. Подробнее этот вопрос рассмотрен нами ранее в работе [2].

Использованный алгоритм восстановления полей скорости по сериям изображений является реализацией широко распространенных вариационных методов определения динамических характеристик движущихся объектов по временным сериям наблюдений их пространственного расположения (см., например, [9]).

Опишем кратко суть методики. Пусть  $\{\hat{T}_k\}_{k=1}^N$  – последовательность полей радиационной температуры, относящихся к сканируемой области  $\Omega$ . Решение задачи заключается в отыскании таких  $u$ ,  $v$ ,  $T_0$ , что решение  $T$  уравнения переноса

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y}$$

с начальным условием  $T = T_0$  минимизирует функционал

$$J(\hat{T}, T, u, v) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \int_{\Omega} (T(t_k) - \hat{T}(t_k))^2 ds + \\ + \frac{a}{2} \int_{\Omega} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 ds + \frac{b}{2} \int_{\Omega} \left( \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right) ds$$

здесь  $u$  и  $v$  – искомые компоненты поля скорости;  $a$ ,  $b$  – константы, эмпирически подбираемые для каждого расчета. Поле скорости подразумевается стационарным. Подробности о решении задачи можно найти в работе [4].

**Анализ результатов.** На рис. 4 – рис. 9 приведены расчетные данные для трех рассматриваемых нами случаев: поля течений и меридиональный разрез через центр наблюдаемого вихревого образования.

В первом случае (13 февраля 2007, см. рис. 4) в полях течений восстановленных обоими методами достаточно хорошо проявляется антициклоничес-

кий (АЦ-) вихрь с характерными размерами порядка 100 км. Положение центров вихря совпадает на обеих картах, а разрез скорости дает приблизительно одинаковые величины зональной компоненты скорости – от 15 до 17 см/с (см. рис. 5).

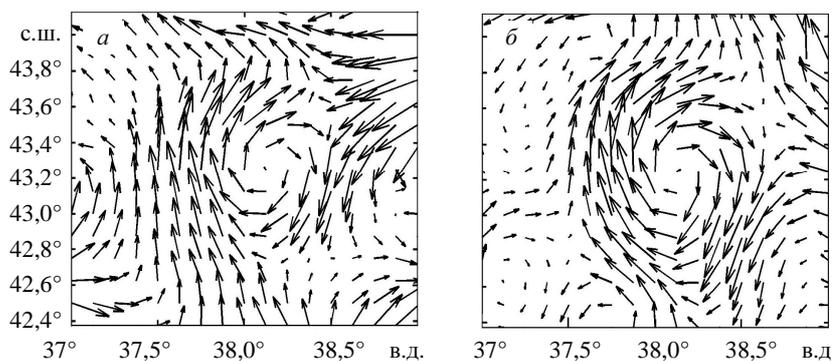


Рис. 4. Скорости течений за 13 февраля 2007 г. для первого случая, полученные: *a* – по последовательным изображениям; *б* – по данным альтиметрии.

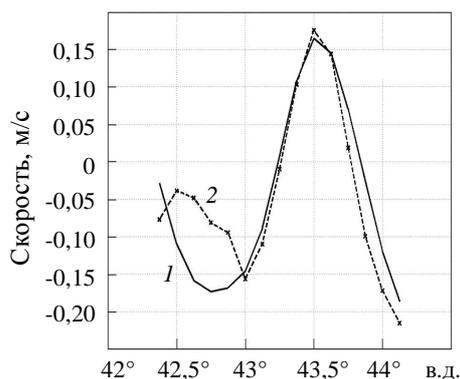


Рис. 5. Меридиональные разрезы зональной компоненты скорости для первого случая по меридиану  $38,125^\circ$  в.д., полученные по данным альтиметрии (1) и по последовательным изображениям (2).

Отметим, что некоторое пространственное несоответствие на периферии вихря может быть следствием временного и пространственного рассогласования данных, а также ошибками восстановления скоростей по последовательным изображениям в зонах с малыми температурными контрастами или их отсутствием. В общем, оба метода точно воспроизвели как геометрические, так и кинематические характеристики интенсивного антициклонического вихря.

Во втором случае (8 июня 2007 года, см. рис. 6) на восстановленных полях течений наблюдается более сложная структура с АЦ-вихрем диаметром порядка 80 км, присоединенным на северо-восточной периферии циклоническим вихрем меньшего размера (40 км) и интенсивным циклоническим меандром на южной периферии АЦ-вихря. Как видно данных, приведенных на рис. 6, все описанные основные черты поля течений достаточно хорошо воспроизводятся обоими методами. Однако, по последовательным изображениям в зонах с малыми контрастами температуры и наличием частичной облачности получены меньшие значения скоростей в сравнении с альтиметрическим методом.

Этот факт отображается на меридиональном разрезе (см., рис. 7) – если амплитуды компоненты скорости в АЦ-вихре достаточно хорошо совпадают, то в южной части разреза наблюдается рассогласование по амплитуде, хотя характер изменчивости воспроизводится одинаково.

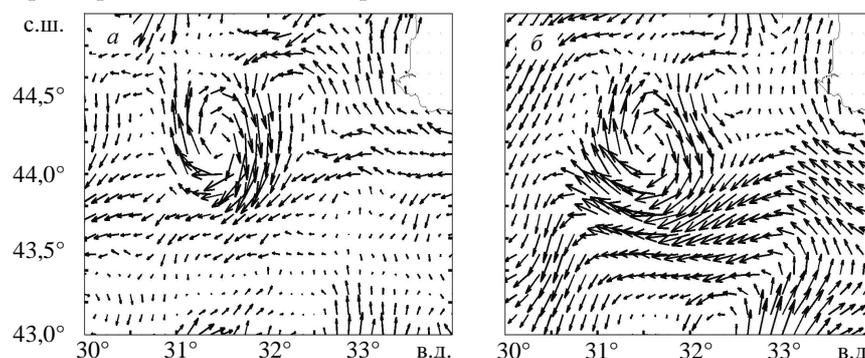


Рис. 6. Скорости течений за 8 июня 2007 г. для второго случая, полученные: *a* – по последовательным изображениям; *b* – по данным альтиметрии.

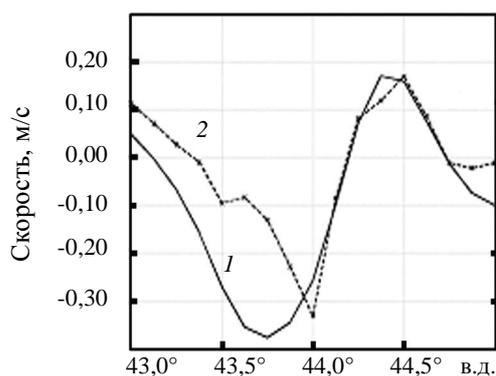


Рис. 7. Меридиональные разрезы зональной компоненты скорости для второго случая по меридиану 31,5° в.д., полученные по данным альтиметрии (1) и по последовательным изображениям (2).

Третий случай (2 октября 2007 года, см. рис. 8 и рис. 9) представляет ситуацию, когда вихревое образование переносится потоком ОЧТ.

В этом случае наблюдаемые в температуре «вихревые структуры» слабо отображаются в поле течений, так как имеют меньшие скорости по сравнению со скоростями ОЧТ и переносятся потоком как единое целое. Наиболее проявляющееся в температуре циклоническое образование с холодным центром практически не проявляется в поле течений. Меридиональный разрез показывает одинаковый перепад компоненты скорости вдоль разреза, однако, в силу худшего пространственного разрешения альтиметрические данные не выделяют вихревой структуры, а на данных скорости, восстановленной по последовательным изображениям, проявляются аномалии, вызванные вихревой структурой, переносимой потоком.

**Заключение.** Рассмотрены в сопоставлении два метода восстановления полей поверхностных течений по данным дистанционного зондирования – альтиметрический (рассчитывающий поле геострофических скоростей по измеренной динамической топографии) и вариационный (базирующийся на основе анализа последовательных изображений).

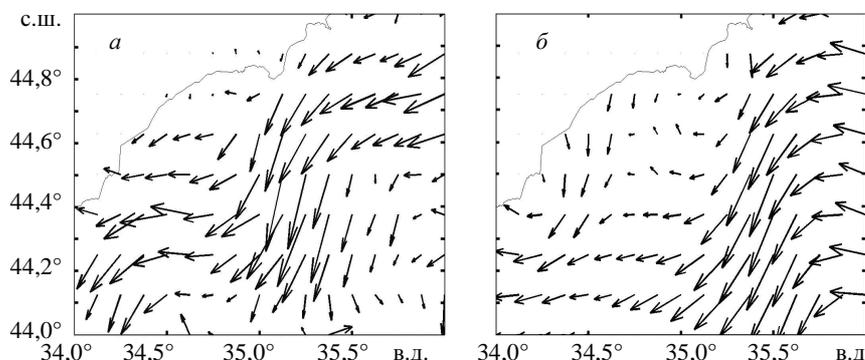


Рис. 8. Скорости течений за 2 октября 2007 г. для первого случая, полученные: *a* – по последовательным изображениям; *б* – по данным альтиметрии.

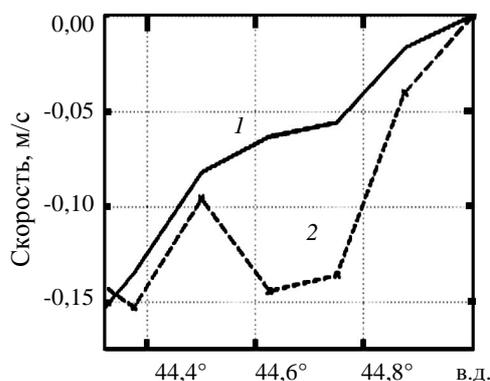


Рис. 9. Меридиональные разрезы зональной компоненты скорости для первого случая по меридиану 35,25° в.д., полученные по данным альтиметрии (1) и по последовательным изображениям (2).

Показана эффективность обоих методов для описания мезомасштабных особенностей циркуляции Черного моря, вызванных вихревыми структурами и струйными течениями. Продемонстрированы преимущества и недостатки рассматриваемых способов. Так, вариационный метод дает ошибки в зонах малых градиентов, а альтиметрический в силу худшего пространственного разрешения не выделяет мелкомасштабные особенности.

Оба метода могут быть использованы для оценки скоростей поверхностных течений при решении широкого круга океанографических и прикладных задач.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Le Traon, P.-Y. and Morrow R.A.*. Ocean currents and mesoscale eddies. Satellite Altimetry and Earth sciences. A Handbook of Techniques and Applications, – Academic Press. – 2001, № 69 (edit. L.-L. Fu and A. Cazenave). – P.171-215.
2. *Плотников Е.В., Коротаев Г.К.* О расчете полей скоростей поверхностных течений по сериям спутниковых изображений в ИК – диапазоне, относящихся к Черному морю // Сб. науч. трудов / Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2009. – С. 176-179.
3. *Бабий В.И., Погребной А.Е., Ратнер Ю.Б., Станичный С. В.* Возможности восстановления поля скорости поверхностных течений по спутниковым данным

- (на примере Черного моря) // Сб. науч. трудов / Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2002. – С. 254-261.
4. *Korotaev, G. K., E. Huot, F.-X. Le Dimet, I. Herlinc, S.V. Stanichny, D.M. Solovyev and L. Wu* Retrieving ocean surface current by 4-D variational assimilation of sea surface temperature images // *Remote Sensing of Environment*. – 2007 – № 112. – P. 1464-1475.
  5. *Le Traon, P.-Y., Dibarboure G. and Ducet N.* Use of a High-Resolution Model to Analyze the Mapping Capabilities of Multiple-Altimeter Missions // *J. Atmos. Oceanic Technol.* – 2001, № 18. – P. 1277-1288.
  6. *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, № 2. – P. 1-16.
  7. *Satellite Altimetry and the Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications.* Fu L.-L. and Cazenave A. (Eds.). – San Diego CA.: Academic Press, 2001. – 463 p.
  8. *Кубряков А.А., Станичный С.В.* Восстановление средней динамической топографии Черного моря для альтиметрических измерений // *Исследование Земли из космоса*. – 2011, № 4. – С. 1-7.
  9. *Horn B.K.P. and Schunck B.G.* Determining optical flow // *Artif. Intell.* – 1981, № 17. – P. 185-203.

Материал поступил в редакцию 21.03.2011 г.

После доработки 20.07.2011 г.