

О восстановлении мезомасштабных структур полей скорости поверхностных течений Чёрного моря при помощи вариационной ассимиляции последовательностей спутниковых изображений NOAA AVHRR в ИК-диапазоне

Е. В. Плотников, А. Л. Холод, А. А. Кубряков

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299013, Россия
E-mail: ev.plotnikov@yandex.ru*

Информация о полях скорости поверхностных морских течений является востребованной при решении широкого круга океанологических задач. На сегодняшний день основными источниками этих данных являются спутниковые альтиметрические измерения и результаты расчётов с использованием морских гидродинамических моделей. Кроме этого, в последние годы всё чаще используются методы восстановления полей скорости при помощи анализа последовательностей спутниковых изображений в оптическом и инфракрасном (ИК) диапазонах. В силу отсутствия эталонных данных о поверхностном потоке актуальной задачей является анализ точности расчётов на основе сопоставления имеющихся результатов, полученных из разных источников. В статье представлены результаты синхронизированных расчётов полей скорости поверхностных течений в акватории Чёрного моря с использованием трёх источников данных. Расчёты проводились для двух ситуаций с минимальным присутствием облачности. Для каждой из них были получены: 1) поле скорости, рассчитанное по сериям снимков NOAA AVHRR в ИК-диапазоне с использованием методики четырёхмерной вариационной ассимиляции; 2) модельное поле, соответствующее глубине 2,5 м; 3) геострофическая компонента скорости поверхностного потока, определённая с использованием спутниковой альтиметрии. Продемонстрированы сходства и различия мезомасштабных структур в полученных полях. Статья может быть интересна специалистам в области морской гидродинамики, а также всем интересующимся алгоритмами восстановления скорости движения объектов на земной поверхности по сериям спутниковых снимков.

Ключевые слова: оптический поток, вариационная ассимиляция данных, бассейновая циркуляция Чёрного моря, данные AVHRR, поверхностные морские течения, спутниковая альтиметрия

Одобрена к печати: 31.03.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-215-226

Введение

Поля скорости поверхностных течений являются одним из важнейших параметров при изучении океанических процессов. Они используются для ассимиляции в прогностических моделях, мониторинга распространения загрязнений, в том числе нефтяных, и применения во многих других вопросах. Однако имеющиеся на сегодняшний день контактные измерения в силу низкого пространственного и временного разрешения не удовлетворяют требованиям большинства оперативных океанологических задач. В качестве альтернативы могут использоваться данные, получаемые при анализе результатов спутникового зондирования, а также расчёты на основе численных гидродинамических моделей.

Так, для решения описанной задачи широко используются измерения спутниковых альтиметров. На основе этих измерений рассчитываются поля геострофической компоненты полей скорости течений, которая в условиях слабых ветров вносит основной вклад в формирование поверхностной динамики. В работах (Коротаев и др., 1998; Кубряков, Станичный, 2013а, б; Avsar et al., 2016; Stanev et al., 2000) показано, что эти поля достаточно хорошо соотносятся с данными контактных измерений поверхностных скоростей. Получаемые на регулярной основе альтиметрические карты течений имеют разрешение порядка 12 км (для акватории Чёрного моря) и используются для изучения широкомасштабных и мезомасштабных динамических процессов и их влияния на бассейновую экосистему (Fu, Cazenave, 2000).

Другим подходом является вычисление параметров оптического потока с использованием серий спутниковых изображений в оптическом и инфракрасном (ИК) диапазонах, относящихся к одному и тому же фрагменту морской поверхности и достаточно малому временному интервалу. Соответствующие методики оценки полей скоростей начали разрабатываться в 80-х гг. прошлого века (Horn, Schunck, 1981; Kelly, 1989; Kelly, Strub, 1992; Lucas, Kanade, 1981) и на сегодняшний день представляют собой развитый инструментарий, достаточно эффективно решающий описанную задачу при благоприятствующих синоптических условиях. Основными такими условиями являются отсутствие значительных по площади облачных образований над сканируемым районом морской акватории, а также наличие ярко выраженных контрастных структур в текстурах изображений. Преимущество этих методов в том, что они позволяют возможность получать карты скорости поверхностных течений с высоким разрешением, что с учётом больших объёмов накопленных спутниковых данных открывает возможности для изучения мелкомасштабной динамики морских акваторий. Указанные подходы, как правило, основаны на обращении уравнения оптического потока (см. например, работы (Béréziat, Herlin, 2012; Chen, 2011; Korotaev et al., 2008)) или используют как основу метод максимальной кросс-корреляции (см. например, исследования (Алексанин и др., 2013; Matthews, Emery, 2009; Qazi et al., 2014)).

Кроме анализа спутниковых снимков для оценки поверхностных скоростей можно использовать данные, получаемые при помощи гидродинамических моделей. Численные прогностические модели основаны на решении системы примитивных уравнений с усвоением метеорологического форсинга. Трёхмерные поля скорости являются выходными параметрами. Таким образом, данные, соответствующие верхнему горизонту модельной сетки, могут служить для оценки поверхностной динамики.

Одним из основных затруднений, возникающих при разработке и усовершенствовании описанных подходов, является отсутствие априорных данных о полях скорости поверхностных течений. В силу этого обстоятельства возникает необходимость в качественном и, по возможности, количественном сопоставлении результатов, полученных из независимых источников. Для отдельных фрагментов Чёрного моря уже проводились сопоставления полей, получаемых при помощи вариационной ассимиляции серий спутниковых снимков с геострофической компонентой, построенной при помощи альтиметрических данных (Kubryakov et al., 2018). Целью данной работы является оценка воспроизводимости мезомасштабных структур в полях поверхностных скоростей, рассчитанных на основе анализа последовательностей спутниковых изображений для региона, покрывающего практически всю Черноморскую акваторию, с данными альтиметрии и численного моделирования. В статье продемонстрированы две ситуации, для которых произведены расчёты по описанным выше методикам. Рассмотрены сходства и различия в мезомасштабных структурах полученных полей поверхностной скорости, а также в структуре основного черноморского течения (ОЧТ).

Методики и данные

Геострофические поля поверхностной скорости

Спутниковые альтиметры используются для расчёта расстояния между спутником и морской поверхностью. На основе этих данных можно вычислить высоту морской поверхности над отсчётным эллипсоидом (Sea Surface Height — SSH). Точность таких измерений на сегодняшний день достигла 2–5 см, однако она существенно снижается в прибрежной зоне. Поверхностная геострофическая скорость через уравнение геострофического баланса связана с градиентами динамической топографии моря, которая не равна SSH (Nerem et al., 1994). Высота геоида относительно отсчётного эллипсоида является основной частью пространственной изменчивости SSH и должна быть вычтена из SSH для расчёта динамической топографии. Эта задача по-прежнему остаётся актуальной, поскольку современные спутниковые гравиметрические данные имеют недостаточное пространственное разрешение для оке-

анографических потребностей (Maximenko et al., 2009; Rio, Hernandez, 2004). Чтобы избежать этой проблемы, измерения альтиметрии распространяются в виде аномалий уровня моря (Sea Level Anomalies — SLA), которые определяются как отклонения полной динамической топографии от средней динамической топографии, усреднённой за период 1993–2012 гг. (Mean Dynamic Topography — MDT). Таким образом, полная динамическая топография равна сумме MDT и SLA.

В данной работе использовалась синтетическая MDT Чёрного моря, вычисленная при помощи альтиметрической информации, данных дрейфующих буёв и гидрологических измерений (Kubryakov, Stanichny, 2011). Объединение измерений с двух или более спутников позволяет ежедневно получать карты аномалий уровня моря (Mapped Sea Level Anomaly — MSLA) из альтиметрических треков. Пространственное разрешение этих данных составляет $1/4^\circ$ для района Мирового океана. Однако для Черноморского региона были разработаны специальные методы, которые позволяют получать региональный пакет данных SLA с разрешением в $1/8^\circ$. Используемая в работе MSLA была произведена системой Ssalto/Duacs и размещена на AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data, Архив альтиметрической информации) при поддержке Национального центра космических исследований Франции (*фр.* Centre National d'Études Spatiales — CNES) (<http://www.aviso.oceanobs.com/duacs/>). Процедура картирования основана на пространственно-временной оптимальной интерполяции, которая может быть причиной дополнительных ошибок и сглаживания полей SLA. Эти ошибки могут быть особенно значительными в прибрежных районах. В тех фрагментах прибрежных районов, где недоступны данные вдоль треков, значения MDLA вычисляются при помощи экстраполяции, в результате чего не учитывается довольно сложная прибрежная динамика. Градиенты абсолютной динамической топографии позволяют определить компоненты геострофической скорости через уравнения геострофического баланса:

$$u_g = -\frac{g}{f} \cdot \frac{\partial h}{\partial y}, \quad v_g = \frac{g}{f} \cdot \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (1)$$

где u_g и v_g — зональная и меридиональная компоненты геострофической скорости; x и y — долгота и широта; $f = 10^{-4}$ — параметр Кориолиса; g — ускорение свободного падения. Перед вычислением геострофической скорости из поля уровня исключалась высокочастотная баротропная часть сигнала и влияние эффекта обратного барометра. Это делается с использованием баротропных моделей (Chelton et al., 2011), что в последние годы значительно улучшило их качество (Volkov et al., 2007). Геострофические скорости, полученные с помощью альтиметрии, в Чёрном море были валидированы в ряде работ с использованием гидрологических данных, дрейфовых измерений и спутниковых снимков (Кубряков, Станичный, 2013а; Kubryakov et al., 2016). Проверка продемонстрировала достаточно хорошее качество альтиметрических данных для качественной и количественной оценки поверхностных течений черноморской акватории. Так, коэффициенты корреляции между дрейфтерными и спутниковыми измерениями составили 0,76 для зональной компоненты скорости и 0,63 — для меридиональной. Соответствующие среднеквадратические отклонения равны 0,09 и 0,083 м/с.

Вариационная ассимиляция карт температуры по данным AVHRR

Методика расчёта скорости поверхностных течений с использованием четырёхмерной вариационной ассимиляции спутниковых изображений (Korotaev et al., 2008) основана на анализе пространственно-временной изменчивости контрастных структур в используемых полях от изображения к изображению. В случае если интенсивность сигнала изменяется во времени в основном за счёт горизонтальной адвекции, компоненты скорости и термодинамической температуры можно связать уравнением оптического потока:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (2)$$

где T — яркостная температура поверхности моря; u и v — зональная и меридиональная компоненты скорости течения. Уравнение (2) является базовым для дифференциальных методов расчёта оптического потока. Так как его нельзя решить в силу так называемой апертурной проблемы, для связи наблюдаемых и рассчитываемых значений яркостной температуры, а также описания предположения о гладкости искомых полей скорости вводится целевой функционал в виде:

$$J(T, u, v) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \int_{\Omega} (T(t_k) - T_{obs}(t_k))^2 ds + \frac{\alpha}{2} \int_{\Omega} |\text{grad}(V)|^2 ds + \frac{\beta}{2} \int_{\Omega} \text{div}(V)^2 ds, \quad (3)$$

где Ω — рассматриваемый фрагмент морской поверхности; $V = (u, v)$ — поле скорости; $T(t)$ — моделируемая яркостная температура; T_{obs} — карты спутниковой яркостной температуры; N — число этих карт; α и β — эмпирические константы; t_k — моменты времени съёмки. Для определения искомых u и v необходимо решить вариационную задачу, которая заключается в нахождении решения уравнения (2), минимизирующего функционал (3).

Для решения этой задачи используется сопряжённая система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} + \frac{\partial(u\tilde{T})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tilde{T})}{\partial y} + T - T_{obs} = 0, \\ \frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} - \tilde{T} \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha \Delta(u) + \beta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right) = 0, \\ \frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} - \tilde{T} \frac{\partial T}{\partial y} + \alpha \Delta(v) + \beta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Можно показать, что если $T(t)$ является решением (2) с некоторыми наперёд заданными $T(t_0)$, u , v , то значения $\tilde{T}(t_0)$, $\tilde{u}(t_0)$, $\tilde{v}(t_0)$, полученные при помощи обратного по времени интегрирования системы (4) с нулевыми начальными условиями при $t = t_N$, равны градиенту функционала J в точке $(T(t_0), u, v)$. Зная градиент, можно применить стандартные итеративные методики для решения вариационной задачи. В данной работе использовался метод квазиградиентного спуска (Gilbert, Lemaréchal, 2006). Расчётный процесс состоит из следующих шагов:

- 1) выбор начальных значений T_0 , u_0 и v_0 ;
- 2) интегрирование уравнения (2) и нахождение $T(t)$ для любого t , а также расчёт значения J ;
- 3) интегрирование системы (4);
- 4) нахождение новых значений T_0 , u_0 и v_0 как точки локального минимума J при помощи процедуры, реализующей метод квазиградиентного спуска;
- 5) переход к п. 2, если заданное число итераций не достигнуто, иначе $V = (u_0, v_0)$ берётся в качестве конечного результата.

Численное решение уравнений (2)–(4) производится при помощи эйлеровской конечно-разностной схемы. Значения температуры относятся к центру ячеек расчётной сетки, компоненты скорости — к краям. В качестве начальных условий при решении (2) для первой итерации берутся значения $T_0 = T_{obs}(t_1)$, $u_0 = 0$, $v_0 = 0$. Эмпирические константы α и β выбираются интерактивно в зависимости от ситуации. При этом высокие значения этих параметров приводят к сильно сглаженному результирующему полю скорости, а при слишком заниженных значениях поля будут содержать фрагменты с аномально высокими модулями градиента. Как правило, необходимое число итераций не превосходит 1000. Фильтрация облачности на изображениях производится с использованием стандартного порогового алгоритма (Плотников, 2009).

Гидродинамическая модель

Вихреразрешающая гидродинамическая модель Чёрного моря (Коротаев и др., 2016; Demyshev, 2012) разработана в Морском гидрофизическом институте и базируется на системе примитивных уравнений. Горизонтальная вязкость и диффузия параметризованы бигармоническим оператором. Вертикальная вязкость и вертикальные коэффициенты диффузии рассчитываются по модели Меллора–Ямады с уровнем замыкания 2,5. Уравнение состояния морской воды записывается с точностью до квадратичных членов по температуре и солёности.

Для расчётов по модели используются данные об атмосферном воздействии (форсинг) системы SKIRON, предоставленные группой по атмосферному моделированию и прогнозу погоды Афинского национального университета. В модели ассимилируются спутниковые измерения температуры поверхности моря, поступающие из тематического центра подготовки данных OSI TAC (Ocean Sea Ice Thematic Center) системы Европейских центров морских прогнозов Copernicus, что позволяет скорректировать ошибки в данных о потоках тепла, получаемых с выхода атмосферной модели. В модели также усваиваются аномалии уровня морской поверхности, поступающие из тематического центра подготовки данных альтиметрических измерений SL TAC (Sea Level Thematic Center). Для корректного учёта поглощения коротковолновой солнечной радиации в верхнем слое моря используется поле коэффициента диффузного ослабления света. Выходные поля имеют пространственное разрешение 5×5 км по горизонтали, по вертикали данные представлены на 38 нерегулярных уровнях от поверхности — 2,5 м, до дна Чёрного моря — 2100 м. В работе используются мгновенные поля скоростей течений, дискретность которых по времени составляет 3 ч.

Результаты

Расчёты проводились для фрагмента морской поверхности, покрывающего большую часть черноморской акватории. Были взяты две метеорологические ситуации, сохраняющиеся на протяжении приблизительно суток и характеризующиеся практически полным отсутствием облачности для выбранного региона. Следует отметить, что такие случаи достаточно редки.

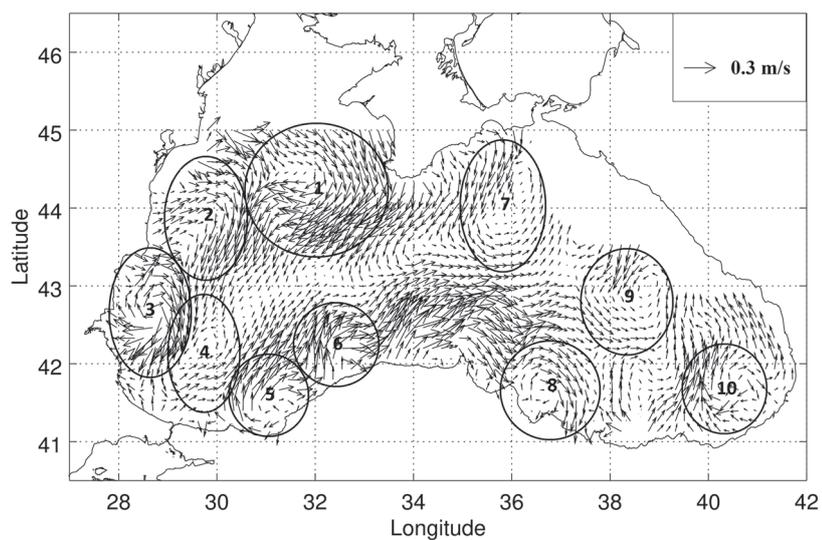
Для расчётов с использованием вариационной ассимиляции были взяты серии карт яркостной температуры, построенные по данным NOAA AVHRR с разрешением 1,1 км. В каждой серии содержится четыре изображения с разбросом по времени, не превышающим одни сутки. Был проведён ряд расчётов с различными сглаживающими коэффициентами с целью подобрать оптимальные значения, при которых получающиеся поля скорости не являются чрезмерно сглаженными, а также не содержат аномально завышенных значений градиентов. Рассматриваемый географический фрагмент был ограничен координатами $41\text{--}45^\circ$ с. ш. и $27,5\text{--}42^\circ$ в. д. В первой ситуации вариационная ассимиляция проводилась по съёмкам на моменты времени 01:05, 07:46, 12:40, 19:09 22.07.2013; во второй — 08:27, 12:41, 18:11 19.07.2013 и 00:55 20.07.2013 (UTC).

Модельные поля были построены осреднением всех имеющихся данных, относящихся к верхнему уровню модельной сетки (глубина 2,5 м) для временного промежутка, определяемого моментами съёмки спутниковых изображений. Разрешение составляет 5 км. Выбранные поля геострофической скорости относятся по времени к полуночи в промежутках, определяемых временными интервалами спутниковых данных. Разрешение — 12,5 км.

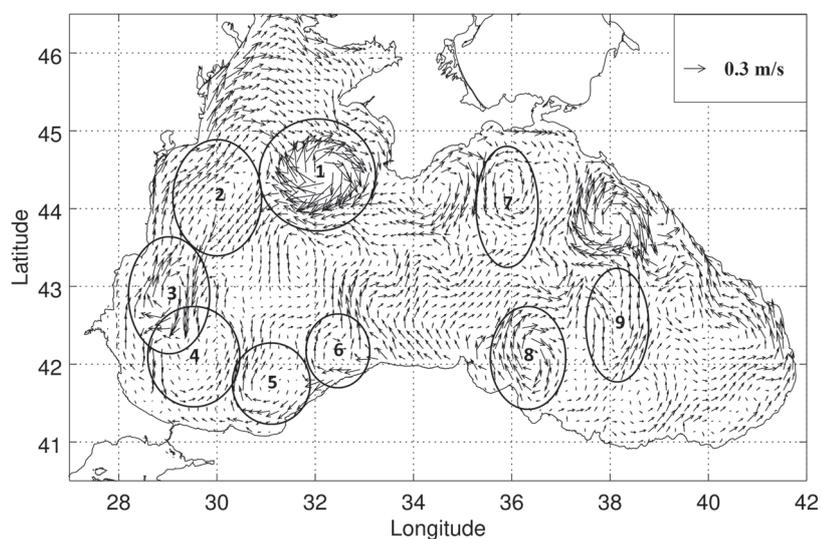
Окончательные результаты получены интерполяцией всех данных на модельную сетку.

Ситуация 1

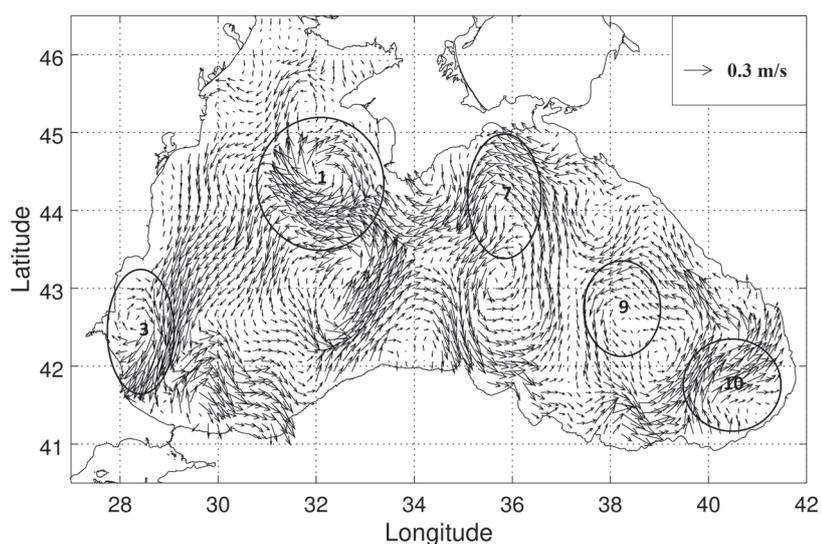
На *рис. 1а* (см. с. 220) отмечены наиболее выделяющиеся вихревые структуры в поле скоростей, построенном по серии изображений (далее — поле 4Dvar). Визуально в модельном поле на *рис. 2б* (см. с. 221) им соответствуют структуры 1–9.



a

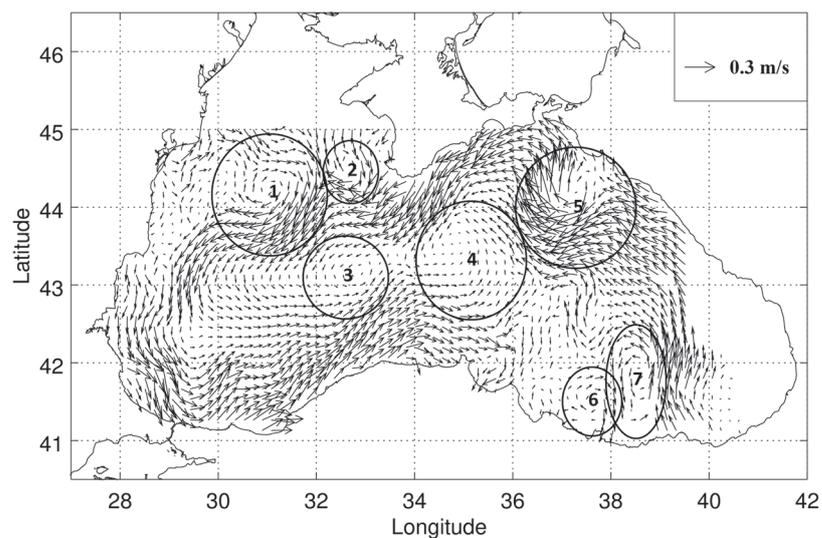


б

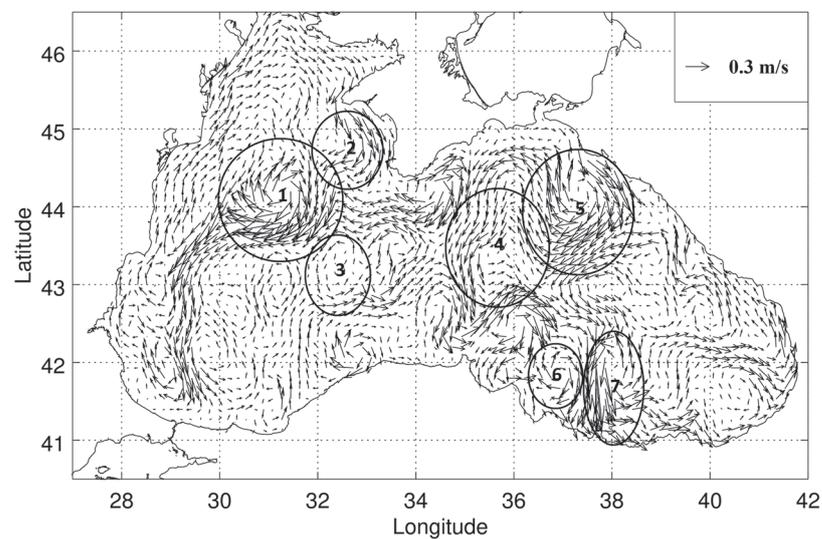


в

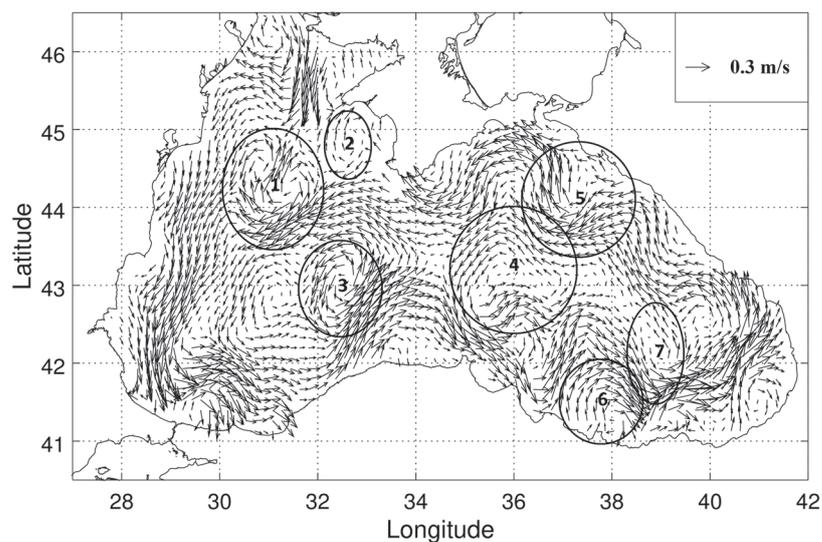
Рис. 1. Ситуация 1: *a* — поле, построенное по сериям ИК-снимков; *б* — модельные данные; *в* — геострофическая компонента



a



б



в

Рис. 2. Ситуация 2: *a* — поле, построенное по сериям ИК-снимков; *б* — модельные данные; *в* — геострофическая компонента

При этом центры вихрей 1, 2, 5, 6, 9 совпадают в большей степени, чем центры остальных (особенно 8-го). Структуры вихрей сходны в той или иной степени. Обращает внимание наличие большого количества вихревых структур в модельном поле, неразличимых в полях 4Dvar и геострофической скорости. Образований в поле геострофической скорости, схожих со структурами в поле 4Dvar, меньше. Вихри 1 и 3 в высокой степени схожи по строению. Вихрям 7, 9 и 10 в поле 4Dvar соответствуют образования с хорошо выделяющимся меандрированием струй, образующих вихревые структуры. Различия в абсолютных значениях и углах направлений визуально сходны с таковыми при сравнении полей, полученных по последовательностям изображений и модели.

Ситуация 2

Характер соответствия полей скорости, изображённых на *рис. 2*, в целом близок к таковому для ситуации 1 с оговоркой, что наиболее выделяющиеся структуры в поле 4Dvar также хорошо различимы в поле геострофической скорости в отличие от ситуации 1. Центры вихревых структур 1, 3, 5 слабо смещены для всех трёх полей, центры вихрей 6 практически совпадают на *рис. 1а* и *с*, а на *рис. 1б* центр значительно смещён на запад. Центр структуры 7 в модельном поле смещён на запад, а в поле геострофической скорости — на северо-восток по сравнению с полем 4Dvar. Абсолютные значения скоростей для вихрей 3, 4, 6 значительно меньше в поле 4Dvar, чем в двух других. В остальных случаях они визуально достаточно близки.

Таким образом, для обеих ситуаций характерна схожесть наиболее выделяющихся мезомасштабных структур в поле 4Dvar с образованиями в соответствующих фрагментах полей поверхностной скорости, рассчитанных по модели и альтиметрическим данным. При этом наблюдаются более или менее выраженные различия этих образований от поля к полю, в частности сдвиги. Кроме того, довольно обширные фрагменты полей 4Dvar не коррелируют с фрагментами в двух других полях. Отдельно следует отметить выраженность ОЧТ на картах 4Dvar в обеих ситуациях.

Выводы

В настоящей работе демонстрируются поля скорости поверхностных течений в акватории Чёрного моря, рассчитанные на основе анализа последовательностей изображений AVHRR в ИК-диапазоне, а также используемые для сопоставления данные альтиметрии и результаты численного моделирования. Рассматривались как воспроизводимость мезомасштабных вихревых структур, так и структура полей в целом. На построенных полях путём эмпирической оценки были выявлены сходства и различия на мезомасштабном уровне. Выявлено, что основные вихревые образования в большинстве случаев коррелируют друг с другом, хотя и различаются в определённой степени по положению и структуре. В некоторых фрагментах схожие структуры присутствуют в двух полях и отсутствуют в третьем. В обеих ситуациях в полях скоростей, построенных по серии изображений, отчётливо выражена структура основного черноморского течения. В целом можно утверждать, что полученные результаты свидетельствуют об эффективности методики четырёхмерной вариационной ассимиляции изображений для восстановления мезомасштабных структур в полях скорости поверхностных морских течений. При этом качество воспроизведения выше в прибрежных зонах. Особенно явно это заметно в районе северного побережья Турции. В центре акватории поля менее информативны, чем поля из других источников, используемых для сопоставления.

Основными причинами различий в структурах полей являются следующие обстоятельства: пространственно-временные расхождения в исходных данных, различные физические принципы используемых подходов. В частности, исходные данные имеют разное разрешение. Помимо этого, модельные данные относятся к глубине 2,5 м, в то время как карты яркостной температуры описывают состояние верхнего скин-слоя. Поля скорости, получаемые по альтиметрическим данным, не учитывают ветровую компоненту, а вариационная ассими-

лация ИК-изображений имеет ограничения применимости, формальное описание которых для конкретных последовательностей снимков представляется затруднительным. Кроме того, эффективность данной методики, судя по всему, снижается при применении с использованием данных со значительными пространственными масштабами и фиксированными (для всей сцены) коэффициентами сглаживания результирующих полей.

Отдельно стоит отметить, что поля скорости поверхностных течений, полученные с использованием какой-либо из методик, не могут считаться эталонными.

Литература

1. *Алексанин А. И., Алексанина М. Г., Карнацкий А. Ю.* Автоматический расчет скоростей поверхностных течений океана по последовательности спутниковых изображений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10. № 2. С. 131–142.
2. *Коротаев Г. К., Саенко О. А., Коблински Ч. Д., Демьшев С. Г., Кныш В. В.* Оценка точности, методика и некоторые результаты усвоения альтиметрических данных TOPEX/POSEIDON в модели общей циркуляции Черного моря // *Исслед. Земли из космоса*. 1998. № 3. С. 3–17.
3. *Коротаев Г. К., Ратнер Ю. Б., Иванчик М. В.* Оперативная система диагноза и прогноза гидрофизических характеристик Черного моря // *Изв. Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52. № 5. С. 609–617.
4. *Кубряков А. А., Станичный С. В.* (2013а) Оценка качества восстановления поверхностной геострофической циркуляции Черного моря по данным спутниковой альтиметрии на основе сопоставления с дрейферными измерениями // *Исслед. Земли из космоса*. 2013. № 3. С. 3–12.
5. *Кубряков А. А., Станичный С. В.* (2013б) Тренды уровня Черного моря по контактному и альтиметрическому наблюдениям // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 5. С. 48–55.
6. *Плотников Е. В.* Методика выделения облачности для данных сканера AVHRR, относящихся к Черному морю // *Морской гидрофиз. журн.* 2009. № 3. С. 69–76.
7. *Avsar N. B., Jin S., Kutoglu H., Gurbuz G.* Sea level change along the Black Sea coast from satellite altimetry, tide gauge and GPS observations // *Geodesy and Geodynamics*. 2016. V. 7. No. 1. P. 50–55.
8. *Bérézjat D., Herlin I.* Non-linear observation equation for motion estimation // *Proc. 19th IEEE Intern. Conf. Image Processing*. 2012. P. 1521–1524.
9. *Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Progress in Oceanography*. 2011. V. 91. No. 2. P. 167–216.
10. *Chen W.* Nonlinear inverse model for velocity estimation from an image sequence // *J. Geophysical Research*. 2011. V. 116. No. C6.
11. *Demyshev S. G.* A numerical model of online forecasting Black Sea currents // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012. V. 48. No. 1. P. 120–132.
12. *Fu L. L., Cazenave A.* Satellite altimetry and earth sciences: a handbook of techniques and applications. V. 69. 1st ed. Academic Press, 2000. 463 p.
13. *Gilbert J. C., Lemaréchal C.* The module M1QN3. Version 3.1. INRIA Rocquencourt and Rhone-Alpes, 2006. 16 p.
14. *Horn B. K. P., Schunck B. G.* Determining optical flow // *Techniques and Applications of Image Understanding*. Intern. Society for Optics and Photonics. 1981. V. 281. P. 319–331.
15. *Kelly K. A.* An inverse model for near-surface velocity from infrared images // *J. Physical Oceanography*. 1989. V. 19. No. 12. P. 1845–1864.
16. *Kelly K. A., Strub P. T.* Comparison of velocity estimates from advanced very high resolution radiometer in the coastal transition zone // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1992. V. 97. No. C6. P. 9653–9668.
17. *Korotaev G. K., Huot E., Le Dimet F. X., Herlin I., Stanichny S. V., Solovyev D. M., Wu L.* Retrieving ocean surface current by 4-D variational assimilation of sea surface temperature images // *Remote Sensing of Environment*. 2008. V. 112. No. 4. P. 1464–1475.
18. *Kubryakov A. A., Stanichny S. V.* Mean Dynamic Topography of the Black Sea, computed from altimetry, drifter measurements and hydrology data // *Ocean Science*. 2011. V. 7. No. 6. P. 745–753.
19. *Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Zatsepin A. G., Kremenetskiy V. V.* Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem // *J. Marine Systems*. 2016. V. 163. P. 80–94.
20. *Kubryakov A. A., Plotnikov E. V., Stanichny S. V.* Reconstructing Large- and Mesoscale Dynamics in the Black Sea Region from Satellite Imagery and Altimetry Data — A Comparison of Two Methods // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. No. 2. P. 239.
21. *Lucas B. D., Kanade T.* An iterative image registration technique with an application to stereo vision // *Proc. Imaging Understanding Workshop*. 1981. P. 121–130.

22. *Matthews D. K., Emery W. J.* Velocity observations of the California Current derived from satellite imagery // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2009. V. 114. No. C8. 14 p.
23. *Maximenko N., Niiler P., Centurioni L., Rio M. H., Melnichenko O., Chambers D., Galperin B.* Mean dynamic topography of the ocean derived from satellite and drifting buoy data using three different techniques // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2009. V. 26. No. 9. P. 1910–1919.
24. *Nerem R. S., Schrama E. J., Koblinsky C. J., Beckley B. D.* A preliminary evaluation of ocean topography from the TOPEX/POSEIDON mission // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1994. V. 99. No. C12. P. 24565–24583.
25. *Rio M. H., Hernandez F.* A mean dynamic topography computed over the world ocean from altimetry, in situ measurements, and a geoid model // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2004. V. 109. No. C12. 19 p.
26. *Stanev E. V., Le Traon P. Y., Peneva E. L.* Sea level variations and their dependency on meteorological and hydrological forcing: Analysis of altimeter and surface data for the Black Sea // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2000. V. 105. No. C7. P. 17203–17216.
27. *Qazi W. A., Emery W. J., Fox-Kemper B.* Computing ocean surface currents over the coastal California current system using 30-min-lag sequential SAR images // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2014. V. 52. P. 7559–7580.
28. *Volkov D. L., Larnicol G., Dorandeu J.* Improving the quality of satellite altimetry data over continental shelves // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2007. V. 112. No. C6. 20 p.

On the retrieval of submesoscale structures of the Black Sea surface velocity fields via variational assimilation of NOAA AVHRR IR image sequences

E. V. Plotnikov, A. L. Kholod, A. A. Kubryakov

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299013, Russia
E-mail: ev.plotnikov@yandex.ru

Information on the velocity fields of surface sea currents is in demand in solving a wide range of oceanographic problems. Nowadays, the main sources of this data are satellite altimetry measurements and results of simulation using marine hydrodynamic models. In addition, in recent years, methods of reconstructing velocity fields by analyzing sequences of satellite images in the optical and infrared bands have been increasingly used. Due to the lack of a priori correct data on surface flow, an actual task is to analyze the accuracy of calculations based on a comparison of the available results obtained from different sources. The paper presents the results of synchronized calculations of the surface current velocity fields in the Black Sea using three data sources. The calculations were carried out for two situations with a minimal cloud cover. For each of them, the following fields were obtained: 1) field calculated from sequences of NOAA AVHRR images in the IR range using the 4-D variational assimilation technique; 2) simulated field corresponding to an upper model layer of 2.5 meters; 3) geostrophic component of the surface flow velocity obtained via satellite altimetry. Similarities and differences of mesoscale structures in the obtained fields were demonstrated. The paper may be interesting to the specialists in the field of marine hydrodynamics, as well as to anyone interested in algorithms for restoring the speed of objects on the earth's surface using a series of satellite images.

Keywords: optical flow estimation, variational data assimilation, AVHRR images, sea surface currents, satellite altimetry, Black Sea circulation

Accepted: 31.03.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-215-226

References

1. Aleksanin A. I., Aleksanina M. G., Karnatsky A. Yu., Avtomaticheskii raschet skorostei poverkhnostnykh techenii okeana po posledovatel'nosti sputnikovyykh izobrazhenii (Automatic computation of the sea surface velocities via satellite image sequences), *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 131–142.
2. Korotaev G. K., Saenko O. A., Koblinski C. D., Demyshev S. G., Knysh V. V., Otsenka tochnosti, metodika i nekotorye rezul'taty usvoeniya al'timetricheskikh dannykh TOPEX/POSEIDON v modeli obshchei tsirkulyatsii Chernogo morya (An estimation accuracy, methodology and some results of the TOPEX/POSEIDON altimeter data assimilation into the Black Sea general circulation model), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1998, No. 3, pp. 3–17.
3. Korotaev G. K., Ratner Yu. B., Ivanchik M. V., Operativnaya sistema diagnoza i prognoza gidrofizicheskikh kharakteristik Chernogo morya (Diagnosis and forecast operative system of the Black Sea hydrophysical characteristics), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2016, Vol. 52, No. 5, pp. 609–617.
4. Kubryakov A. A., Stanichny S. V. (2013 a), Otsenka kachestva vosstanovleniya poverkhnostnoi geostro-ficheskoi tsirkulyatsii Chernogo morya po dannykh sputnikovoi al'timetrii na osnove sopostavleniya s drif-ternymi izmereniyami (Quality estimation of the altimetry-derived surface geostrophic currents in the Black Sea from the comparison with drifting buoy measurement), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 3, pp. 3–12.
5. Kubryakov A. A., Stanichny S. V. (2013b), Trendy urovnya Chernogo morya po kontaktnym i al'timetri-cheskim nablyudeniya (The Black Sea level trends from tide gages and satellite altimetry), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2013, No. 5, pp. 48–55.
6. Plotnikov E. V., Metodika vydeleniya oblachnosti dlya dannykh skanera AVHRR, otnosyashchikhsya k Chernomu moryu (Cloud filtration technique for the Black-Sea AVHRR data), *Morskoj gidrofizicheskii zhurnal*, 2009, No. 3, pp. 69–76.
7. Avsar N. B., Jin S., Kutoglu H., Gurbuz G., Sea level change along the Black Sea coast from satellite alti-metry, tide gauge and GPS observations, *Geodesy and Geodynamics*, 2016, Vol. 7, No. 1, pp. 50–55.
8. Béréziat D., Herlin I., Non-linear observation equation for motion estimation, *Proc. 19th IEEE Intern. Conf. Image Processing*, 2012, pp. 1521–1524.
9. Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M., Global observations of nonlinear mesoscale eddies, *Progress in Oceanography*, 2011, Vol. 91, No. 2, pp. 167–216.
10. Chen W., Nonlinear inverse model for velocity estimation from an image sequence, *J. Geophysical Research*, 2011, Vol. 116, No. C6.
11. Demyshev S. G., A numerical model of online forecasting Black Sea currents, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2012, Vol. 48, No. 1, pp. 120–132.
12. Fu L. L., Cazenave A., *Satellite altimetry and earth sciences: a handbook of techniques and applications, Vol. 69, 1st Edition*, Academic Press, 2000, 463 p.
13. Gilbert J. C., Lemaréchal C., *The module M1QN3, Version 3.1*, INRIA Rocquencourt and Rhone-Alpes, 2006, 16 p.
14. Horn B. K. P., Schunck B. G., Determining optical flow, *Techniques and Applications of Image Understan-ding. Intern. Society for Optics and Photonics*, 1981, Vol. 281, pp. 319–331.
15. Kelly K. A., An inverse model for near-surface velocity from infrared images, *J. Physical Oceanography*, 1989, Vol. 19, No. 12, pp. 1845–1864.
16. Kelly K. A., Strub P. T., Comparison of velocity estimates from advanced very high resolution radiometer in the coastal transition zone, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1992, Vol. 97, No. C6, pp. 9653–9668.
17. Korotaev G. K., Huot E., Le Dimet F. X., Herlin I., Stanichny S. V., Solovyev D. M., Wu L., Retrieving ocean surface current by 4-D variational assimilation of sea surface temperature images, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, No. 4, pp. 1464–1475.
18. Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Mean Dynamic Topography of the Black Sea, computed from altimetry, drifter measurements and hydrology data, *Ocean Science*, 2011, Vol. 7, No. 6, pp. 745–753.
19. Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Zatsepin A. G., Kremenetskiy V. V., Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem, *J. Marine Systems*, 2016, Vol. 163, pp. 80–94.
20. Kubryakov A. A., Plotnikov E. V., Stanichny S. V., 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, No. 2, p. 239.
21. Lucas B. D., Kanade T., An iterative image registration technique with an application to stereo vision, *Proc. Imaging Understanding Workshop*, 1981, pp. 121–130.
22. Matthews D. K., Emery W. J., Velocity observations of the California Current derived from satellite ima-gery, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2009, Vol. 114, No. C8, 14 p.

23. Maximenko N., Niiler P., Centurioni L., Rio M. H., Melnichenko O., Chambers D., Galperin B., Mean dynamic topography of the ocean derived from satellite and drifting buoy data using three different techniques, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, Vol. 26, No. 9, pp. 1910–1919.
24. Nerem R. S., Schrama E. J., Koblinsky C. J., Beckley B. D., A preliminary evaluation of ocean topography from the TOPEX/POSEIDON mission, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1994, Vol. 99, No. C12, pp. 24565–24583.
25. Rio M. H., Hernandez F., A mean dynamic topography computed over the world ocean from altimetry, in situ measurements, and a geoid model, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2004, Vol. 109, No. C12, 19 p.
26. Stanev E. V., Le Traon P. Y., Peneva E. L., Sea level variations and their dependency on meteorological and hydrological forcing: Analysis of altimeter and surface data for the Black Sea, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2000, Vol. 105, No. C7, pp. 17203–17216.
27. Qazi W. A., Emery W. J., Fox-Kempe B., Computing ocean surface currents over the coastal California current system using 30-min-lag sequential SAR images, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2014, Vol. 52, pp. 7559–7580.
28. Volkov D. L., Larnicol G., Dorandeu J., Improving the quality of satellite altimetry data over continental shelves, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2007, Vol. 112, No. C6, 20 p.