

# ВОЗМОЖНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛЯ СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАНЫМ (НА ПРИМЕРЕ ЧЕРНОГО МОРЯ)

**В.И.Бабий, А.Е.Погребной, Ю.Б.Ратнер,  
С.В.Станичный**

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины

99011 г.Севастополь, ул.Капитанская, 2

E-mail: [odmi@alpha.mhi.iuf.net](mailto:odmi@alpha.mhi.iuf.net)

*Выполнено восстановление поля скорости поверхностных течений в Черном море по спутниковым изображениям одновременно двумя разными методами: корреляционно-экстремальным (кинематическим) и обращением модели переноса тепла (динамическим). В области мезомасштабов оба метода показали качественно схожие результаты.*

В гидромеханике поле скорости течения жидкости рассматривается в двух представлениях – лагранжевом и эйлеровом. В данной работе исследуются различные методы восстановления поля скорости поверхностных морских течений по спутниковым снимкам, использующие оба эти представления. Поскольку при любых гидрофизических измерениях помимо восстановления поля искомой физической величины должна еще оцениваться и погрешность восстановления, то необходим эталон (образцовое поле). Для поля скорости поверхностных морских течений в области мезомасштабов такого образцового поля нет. Поэтому оценка погрешности измерений возможна только путем сличения результатов восстановления поля различными методами. При этом сами результаты должны быть сопоставимы, т.е. иметь примерно одинаковое пространственное и временное осреднение. Именно в этом и состоит одна из основных трудностей при сличении результатов синхронных измерений скорости течений дрейферами, автономными буйковыми станциями или расчетов геострофических скоростей течений по данным СТД съемок с восстановленным полем скорости поверхностных течений по спутниковым снимкам. Ниже рассмотрим два диагностических дистанционных метода измерения с сопоставимыми характеристиками пространственно-временного осреднения поля, которые условно назовем кинематическим методом [1,2] и динамическим методом [3], использующих в качестве исходной информации одни и те же спутниковые изображения морской поверхности.

Кинематический или корреляционно-экстремальный метод расчета скорости поверхностных течений по спутниковым снимкам описан в работе [1], где он рассматривается как частный случай решения обратной задачи статистического анализа эволюционирующих случайных полей. Основное допущение кинематического метода – пассивность мезомасштабных аномалий температурного поля поверхности моря (ТПМ), получаемого по результатам съемки морской поверхности в тепловом ИК-диапазоне. Информативным параметром при этом служат мезомасштабные аномалии поля ТПМ, перемещающиеся по морской поверхности со скоростью течений.

В нашем случае будем считать, что движение этих аномалий – чисто поступательное. Тогда суть метода сводится к следующему. Первый снимок покрывается регулярной сеткой узлов с достаточно высоким пространственным разрешением. С каждым узлом сетки связывается пространственное окно, геометрические размеры которого соответствуют характерным размерам аномалий ТПМ, а начальное положение его центра совпадает с узлом. Это пространственное окно может смещаться дискретно относительно своего узла на некоторое расстояние по вертикали и горизонтали (по широте  $\varphi$  и долготе  $\lambda$ ).

Для того чтобы определить скорость течения в окрестности некоторого узла, с первого и второго снимков осуществляется считывание данных о поле ТПМ, попадающих внутрь пространственного окна, находящегося в начальном положении и вычисляется коэффициент кросс-корреляции. Далее выполняется серия последовательных сдвигов пространственного окна и при этом считывается информация о поле ТПМ со второго снимка, попадающая в это окно. По полученным фрагментам полей ТПМ первого и второго снимков выполняется расчет коэффициентов кросс-корреляции. В результате этого получается набор коэффициентов кросс-корреляции и соответствующих им смещений, т.е. дискретная взаимно-корреляционная пространственно-временная функция в окрестности узла сетки:  $B(\Delta\vec{r}, \Delta t) |_{\varphi, \lambda}$ , где  $\Delta\vec{r}$  – пространственный сдвиг максимума взаимной корреляции,  $\Delta t$  – интервал времени между парами снимков.

В предположении «замороженности» поля ТПМ, за истинное смещение естественно принять такое, которому соответствует максимальная кросс-корреляция между полями ТПМ в пределах пространственного окна. Зная смещение и интервал времени между двумя снимками, можно определить скорость тече-

ния в выбранном узле, т.е.  $\vec{V}(\varphi, \lambda) = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} |_{\varphi, \lambda}$ .

Поскольку погрешность интервала  $\Delta t$  пренебрежимо мала, то погрешность вычисления скорости определяется преимущественно погрешностью оценки сдвигов  $\Delta \vec{r}$ , а также точностью географической привязки координатных сеток исходной информации о ТПМ. Погрешность оценки  $\Delta \vec{r}$  можно уменьшить, применив аппроксимацию функции  $B(\Delta \vec{r}, \Delta t)$  в окрестности ее максимума, например, параболой или эллипсоидом [1].

Несмотря на появившееся в последнее время большое количество работ, посвященных рассматриваемому методу [2], остался невыясненным ряд вопросов, касающихся его информативности и точности. Мы будем использовать косвенный метод оценки достоверности и информативности, основанный на расчетах скоростей течений по набору смещенных сеток. Прежде чем переходить к его изложению опишем базовую схему расчетов.

Расчеты полей скорости поверхностных течений Черного моря выполнялись по тепловым сканерным снимкам, полученным с КА NOAA-14, с помощью аппаратуры AVHRR-2 (режим передачи данных – HRPT). С этой целью использовались величины радиационной температуры морской поверхности, регистрируемой в канале с длиной волны 11 мкм. Как известно, в условиях отсутствия облаков они близки к истинным величинам термодинамической температуры морской поверхности. Пространственное разрешение используемой аппаратуры в режиме передачи HRPT составляет 1.1 км в подспутниковой точке.

На результаты расчетов скоростей течений с помощью кинематического метода влияет выбор некоторых рабочих параметров алгоритма. К их числу относятся форма и размеры пространственного окна и величины шагов сетки. Эти параметры являются взаимосвязанными и их выбор должен опираться на знание статистических характеристик поля радиационной температуры морской поверхности и инструментальных погрешностей регистрирующей аппаратуры.

Согласно многочисленным исследованиям, выполненным как контактными, так и дистанционными методами, характерные размеры мезо-масштабных аномалий поля ТПМ в Черном море составляют от 5 до 100 км, перепад температуры внутри мезомасштабной аномалии и окружающими водами может составлять 1-10 К, а погрешности измерения радиационной температуры – около 0.3 К. Таким образом, нижние границы размеров пространственного окна и шага сетки составляют около 5 км. Однако выбор этой величины в

качестве рабочих значений параметров алгоритма может быть неудачным из-за низкой степени сглаживания погрешностей измерений и потери возможности выявления крупных аномалий внутри пространственного окна, из-за чего могут возникнуть ложные корреляции между фрагментами полей снимков, попадающих внутрь пространственного окна. С другой стороны увеличение верхней границы масштаба приводит к ухудшению пространственного разрешения восстанавливаемого поля скоростей течений и может вызвать возникновение ложных корреляций.

По-видимому наиболее оптимальным является выбор промежуточных величин из рассматриваемого диапазона значений. Мы остановили свой выбор на равновесном круглом пространственном окне [1] диаметром  $D=15$  пикселей, что соответствует пространственному масштабу 16.7 км. Эта величина равна шагу пространственной сетки.

К числу других параметров алгоритма, влияющих на его работу, относятся размеры допустимой области смещения окна. Они однозначно определяются максимально возможными скоростями течений и интервалом времени между двумя последовательными снимками. Для большинства районов Черного моря скорость течений не превышает 30-40 см/с. Исходя из этого в качестве величины максимально возможной скорости нами при проведении расчетов принято значение  $V_{max} = 40$  см/с. Заметим, что увеличение максимальной скорости вдвое приводит к учетверению времени счета, что существенно увеличивает затраты времени при расчетах на смещенных сетках. Тем не менее ниже, после того как будут получены оценки информативности и точности, мы приведем также результаты соответствующие  $V_{max} = 80$  см/с.

И, наконец, необходимо остановиться еще на двух дополнительных параметрах. Это минимальный порог коэффициента кросс корреляции -  $r_{min}$  и дисперсии поля радиационных температур внутри пространственного окна -  $\sigma_{min}^2$ . Принимая во внимание только те результаты расчетов, для которых коэффициент кросс корреляции  $r \geq r_{min}$ , мы определяем скорость течения в тех ситуациях, когда поля радиационных температур внутри пространственного окна обладают высокой степенью сходства. Это должно приводить к повышению достоверности расчетов.

Были получены оценки информативности и точности определения скоростей течений по результатам расчетов на смещенных сетках. При выполнении расчетов по базовому варианту, в качестве первого узла сетки мы выбрали девятый слева и сверху пиксел изображения. Причины такого выбора станут

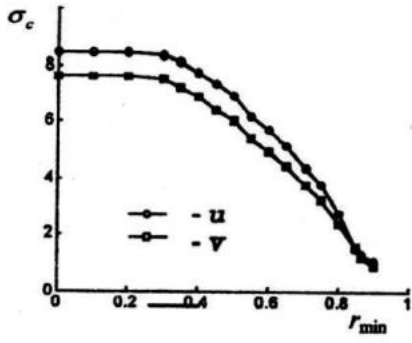


Рис.1

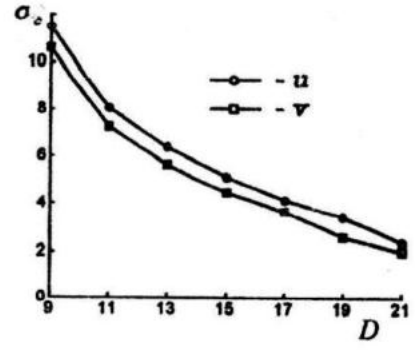


Рис.4

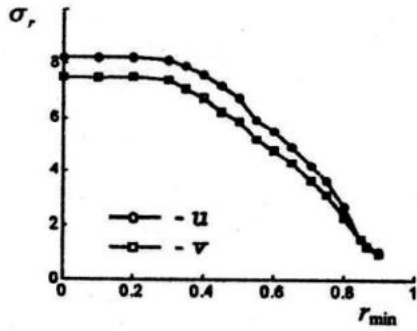


Рис.2

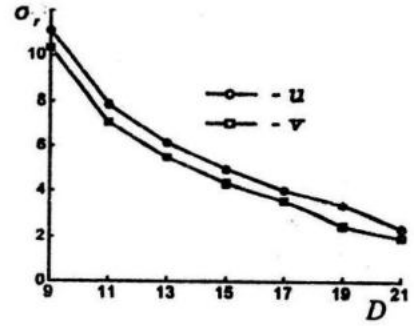


Рис.5

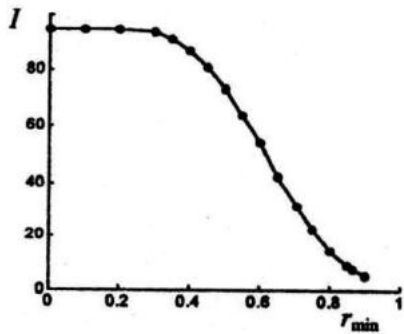


Рис.3

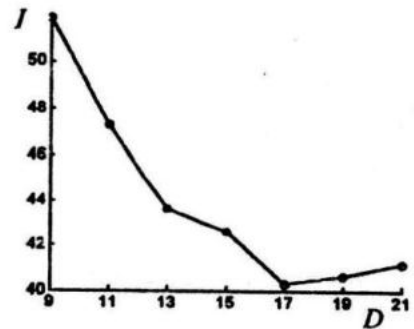


Рис.6

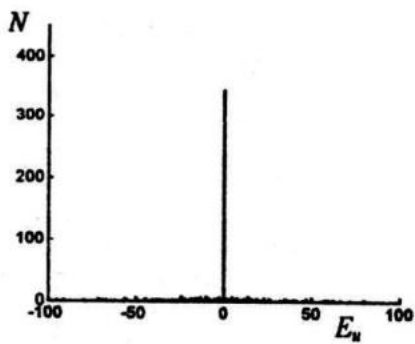


Рис.7

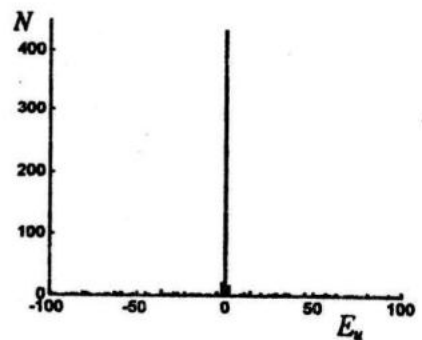


Рис.8

ясны из дальнейшего изложения. Наряду с этой базовой сеткой для оценки информативности и точности расчетов скоростей течений мы предлагаем использовать смещенные сетки, получаемые из базовой сдвигом на  $k$  пикселей вверх или вниз и на  $m$  пикселей вправо или влево. Это предложение основывается на гипотезе о том, что на небольших расстояниях скорости течения не должны отличаться друг от друга слишком сильно. Основанием этого является различие эквивалентных радиусов пространственной корреляции инструментальных шумов (шумов квантования радиационной температуры, которые  $\delta$ -коррелированы) и радиусов пространственной корреляции поля ТПМ и течений. Если ограничиться расстояниями  $\sim 1$  км, то мы наряду с базовой сеткой можем использовать еще 4 дополнительные сдвинутые сетки. При этом, в силу сделанного предположения, значения скоростей, полученных в узлах сдвинутых сеток можно отнести к соответствующим узлам базовой сетки. Теперь с каждым узлом базовой сетки будет связано 5 величин скоростей течений, что позволяет более точно оценить их значения и величину погрешности.

Классическими оценками величины и ее погрешности по статистическим выборкам является среднее и стандартное отклонение. Однако, предварительный анализ результатов расчета показал, что в получаемых выборках обнаруживаются выбросы одного, реже двух значений скорости. Из-за малости объемов получаемых статистических выборок влияние этих выбросов на достоверность получаемых классических оценок может оказаться достаточно сильным. Поэтому, наряду с классическими оценками целесообразно рассматривать робастные оценки значения скорости течений и ее погрешности, основанные на использовании медианы и среднего значения модуля отклонений. Ниже будут рассмотрены оба типа оценок.

Интересно выяснить, как меняется информативность  $-I$  и погрешность расчета скоростей течений  $-\sigma$  в зависимости от выбора величины порога  $r_{\min}$ . Здесь под информативностью мы понимаем долю остающихся узлов базовой сетки по отношению их к полному числу узлов по акватории Черного моря. Общую погрешность расчета скоростей мы измеряем величиной среднего стандартного отклонения, определяемого по стандартным отклонениям в узлах сетки, где была рассчитана скорость течений. При этом рассматриваются два набора величин:  $\sigma_c$  — полученные по классическим оценкам стандартных отклонений в узлах и  $\sigma_r$  — полученные по робастным оценкам стандартных отклонений. Для их

получения мы задались набором величин  $r_{\min}$ , принимающих значения из множества  $r_{\min} = \{0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.35, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 1/\sqrt{2}, 0.75, 0.8, 0.85, \sqrt{3}/2, 0.9\}$  и выполнили расчеты на смещенных сетках для двух последовательных снимков за 13.07.98 18 ч. 45 м и 14.07.98 7ч. 2м. Полученные результаты представлены на рис.1-3.

Из рассмотрения графиков зависимостей  $\sigma_c(r_{\min})$  и  $\sigma_r(r_{\min})$  в см/с, изображенных на рис.1 и рис.2, следует, что стандартные отклонения расчетных скоростей течений уменьшаются с ростом порога  $r_{\min}$ . Робастные оценки скорости течений имеют несколько меньшие стандартные отклонения. Выбор значения  $r_{\min}=0.65$  позволяет снизить стандартные отклонения почти в два раза. Вместе с тем, как следует из рис.3, при увеличении порога  $r_{\min}$ , начиная со значений  $r_{\min} \geq 0.45$ , происходит значительное снижение информативности. Так, например при  $r_{\min} = 0.65$  скорость течений может быть определена только в  $\sim 43\%$  узлов сетки (для нашего случая число узлов сетки, принадлежащих акватории Черного моря равно 1647).

Если не применять никаких ограничений на коэффициент кросс-корреляции, то стандартные отклонения скоростей течений, оцененных только по узлам базовой сетки, составляют в среднем около 8 см/с. С учетом того, что это средние величины, следует признать их достаточно большими. При  $r_{\min} = 0.65$  среднее значение стандартных отклонений по узлам базовой сетки оценивается величиной  $\sim 4 - 5$  см/с. При условии справедливости гипотезы о случайном, независимом характере отклонений величин скоростей течений, полученных на смещенных сетках от ее истинных значений в узлах базовой сетки, более точными будут оценки, основанные на использовании среднего и медианы. Тогда их достоверность будет примерно в 2.2 раза выше и составит  $\sim 3.5 - 4$  см/с без ограничений на коэффициент кросс корреляции и  $1.8 - 2.3$  см/с при  $r_{\min} = 0.65$ . Последняя из этих двух оценок могла бы считаться весьма удовлетворительной.

Для анализа зависимости оценок информативности и точности определения скоростей поверхностных течений от размеров пространственного окна  $D$  были проведены расчеты с различными  $D = \{9, 11, 13, 15, 17, 19, 21\}$  пикселей. Все расчеты выполнены при  $r_{\min} = 0.65$  и  $V_{\max} = 40$  см/с. Их результаты представлены на рис.4-6. Как видно, с увеличением  $D$  погрешность уменьшается. Зависимость  $\sigma(D)$  особенно сильна при малых  $D$ . При минимальном из выбранных нами размеров окон ( $D=9$ ) точность в 2 раза хуже, чем при  $D = 15$ . С другой стороны, при  $D = 21$  точность

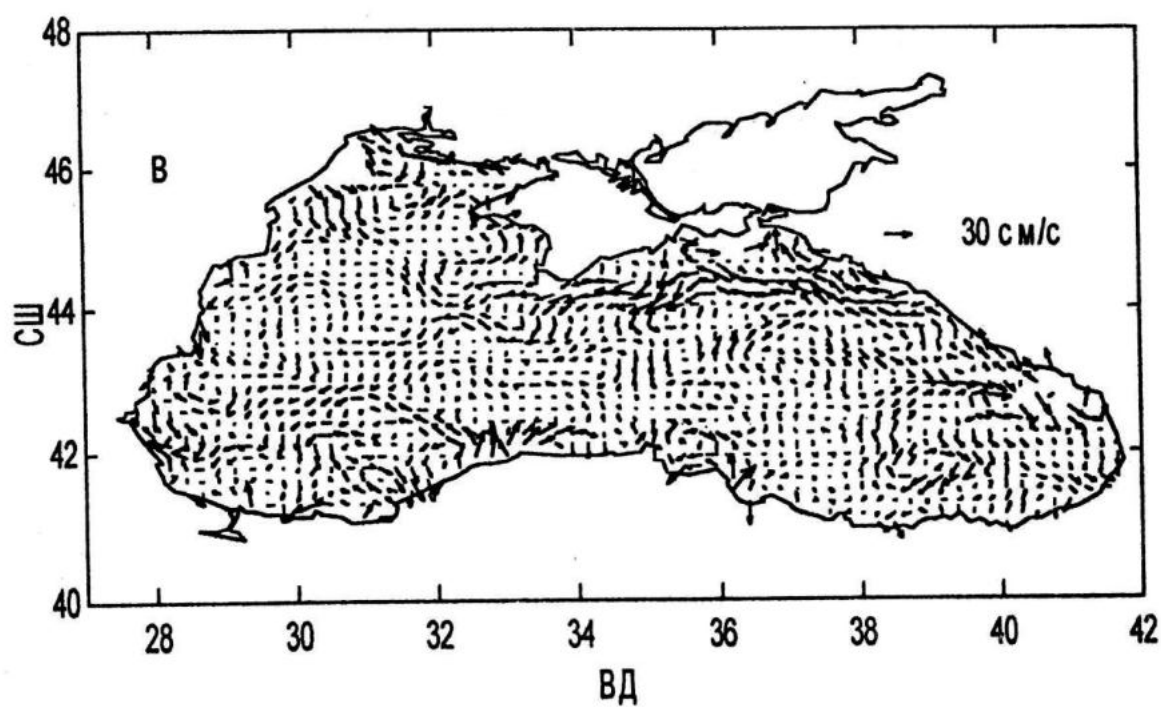
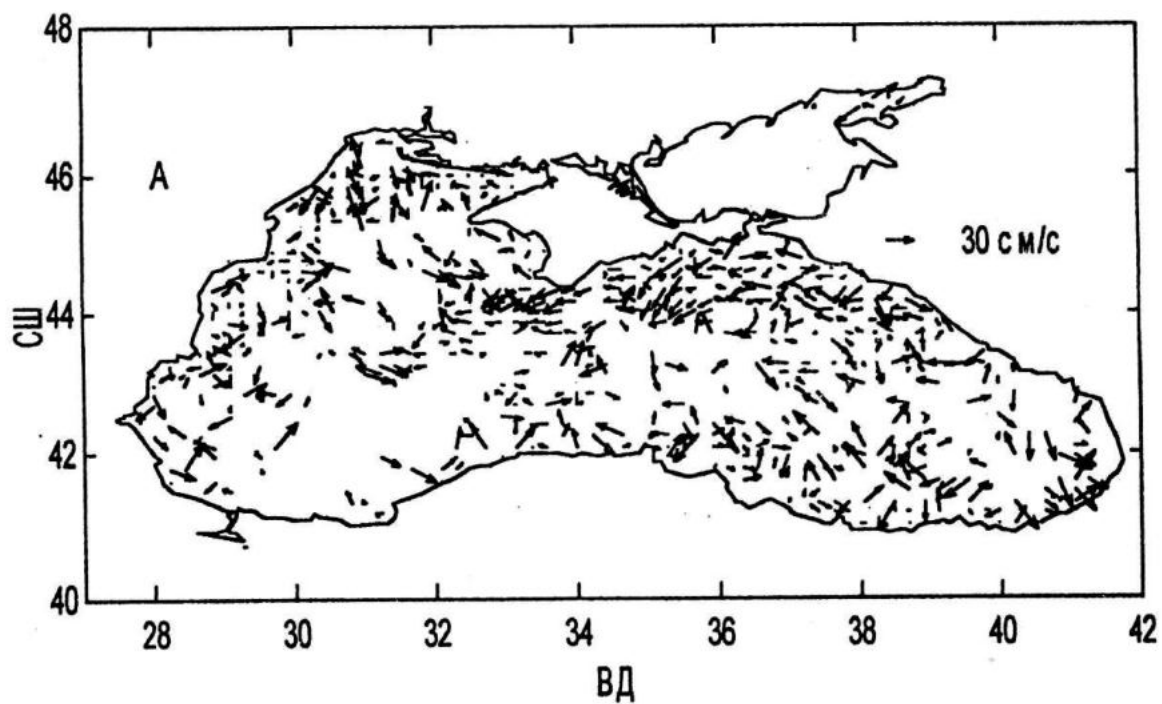


Рисунок 9. – Результаты восстановления поля скоростей поверхностных течений в акватории Черного моря по двум дистанционным снимкам в ИК-диапазоне 13 и 14 июля 1998 г.  
 А – корреляционно-экстремальным методом; В – методом обращения решения уравнения теплового баланса.

примерно в 2 раза лучше, чем при  $D = 15$ . Представляется, что такой характер зависимости ошибок расчета от размеров пространственного окна объясняется сглаживанием шумов измерений и улучшением распознавания крупных аномалий поля радиационных температур. Анализ рис.4-5 показывает, что в диапазоне масштабов окна от 11 до 21 пикселей (а возможно и более), существует зависимость между размером окна и погрешностью измерений, которую можно толковать как некоторое соотношение неопределенности, связывающее погрешность измерения скорости течения и масштаб (или площадь) пространственного осреднения:  $\sigma \cdot D^2 = \text{const} \approx 1,3 \cdot 10^7 \text{ м}^3/\text{с}$ . Это соотношение позволяет оценить возможности метода и выбрать необходимое окно и погрешность расчета скорости течения в зависимости от решаемой задачи. Поскольку ТПМ эволюционирует, то уровень взаимной корреляции сильно зависит от величины временного сдвига  $\Delta t$  между съемками и это может привести к тому, что величины так называемой константы в соотношении неопределенности возможно могут быть другими для других пар снимков. Заметим, что выборочные флуктуации увеличиваются при попадании в окно берега (суши), так как уменьшается объем выборки.

Как следует из рассмотрения зависимости  $I(D)$  рис.6, информативность для малых  $D$  оказывается выше, чем для больших, и количество случаев с высокими кросс-корреляциями больше. Это на первый взгляд противоречит тому, что было сказано в предыдущем абзаце. Однако нам представляется, что обнаруженный эффект может быть объяснен увеличением доли ложных корреляций при уменьшении размеров пространственного окна.

Для изучения влияния размеров допустимой области смещения пространственного окна на результаты расчета скоростей течений нами были выполнены дополнительные расчеты с  $V_{\text{max}} = 80 \text{ см/с}$ . При этом другие параметры алгоритма принимали значения:  $r_{\text{min}} = 0,65$  и  $D = 15$ . Сопоставление результатов расчета проводилось на основе изучения отклонений  $E$  между оценками средних величин скоростей течений, рассчитанными при  $V_{\text{max}} = 80 \text{ см/с}$  от соответствующих значений, полученных при  $V_{\text{max}} = 40 \text{ см/с}$ . Результаты сопоставления для зональной компоненты скоростей течений представлены в виде гистограммы на рис.7. Для меридианальной компоненты гистограмма имеет аналогичный вид, рис.8.

Как следует из приведенных данных, в результатах расчетов при  $V_{\text{max}} = 80 \text{ см/с}$  и при  $V_{\text{max}} = 40 \text{ см/с}$  наблюдаются отличия. Вместе с тем, существует много узлов, в которых обе величины совпадают. Для классической оценки

среднего значения скоростей течений число таких узлов составляет 343 из 702, для робастной (медианной) – соответственно 433 из 702. В этом смысле робастная оценка оказывается более устойчивой.

Отметим также, что на информативность метода существенное влияние оказывает облачность. Ее влияние такое же, как и при определении ТПМ. Кроме того на других последовательностях снимков были получены несколько иные оценки информативности и погрешности. Это связано с возможными отличиями в состоянии морской поверхности. Используемые снимки можно отнести к динамически активному состоянию поля поверхностной температуры, когда оно отражает динамические процессы в приповерхностном слое. В случае менее активных состояний можно ожидать ухудшения точности и информативности метода. Отдельной задачей является исследование влияния ветрового волнения, ветровых течений и оценки эффективной глубины (толщины) верхнего слоя моря, отражающего динамические процессы.

С целью иллюстрации работы кинематического метода, на рис.9А приведен фрагмент снимка Черного моря с нанесенным на него векторным полем скоростей течений, рассчитанных при  $r_{\text{max}} = -1,0$ ;  $D = 15$  и  $V_{\text{max}} = 40 \text{ см/с}$ . Необходимо отметить, что наилучшим способом визуального анализа результатов расчета является просмотр мультипликации, построенной на рассматриваемой последовательности снимков. Однако в печатной работе этого сделать невозможно, что и заставляет нас ограничиться приведенным примером.

**Динамический метод или метод обращения модели переноса тепла** использует уравнения теплового баланса в виде:

$$T_t + u \cdot \nabla T = k \nabla^2 T + S, \quad (1)$$

где  $T$  - температура,  $u$  - скорость,  $k$  - коэффициент диффузии,  $S$  - функция источника, индексы - частное дифференцирование. В конечных разностях оценки горизонтальных градиентов температуры рассчитываем по снимку ТПМ, а производную по времени аппроксимируем  $\delta T(x,y)/\Delta t$  для двух последовательных снимков сделанных через промежуток времени  $\Delta t$ . Функция источника для ТПМ включает поверхностные потоки тепла. При этом влиянием атмосферы пренебрегаем. Адвективный член  $u \cdot \nabla T$  является скалярным произведением двух векторов, поэтому локальная компонента скорости  $u_n$ , нормальная градиенту температуры, не дает вклада в адвекцию и на наблюдаемое изменение температуры  $T_t$  не влияет. Температурные изменения за счет го-

ризонтовой адвекции целиком обусловлены только кросс-изотермической компонентой скорости  $u_c$ ,

$$u \cdot \nabla T = (u_c + u_a) \cdot \nabla T = u_c \cdot \nabla T. \quad (2)$$

В адвекцию  $u_a$  вклад не вносит нигде, а  $u_c$  - в областях с пренебрежимо малыми градиентами  $T$ . Произвольно большое вдоль-изотермическое поле скорости может быть добавлено к любому решению в (1) и это не повлияет на наблюдаемые изменения температуры,  $T_i$ . Для нахождения единственного решения необходимо вводить дополнительные требования.

При решении обратной задачи использовалась версия уравнения теплового баланса с перемешанным слоем, так чтобы члены, включающие вертикальные движения или вертикальные производные могли быть выделены и оценены. Предполагается, что спутниковые данные ТПМ представляют температуру в перемешанном слое глубины  $h$ , где температура и скорость не зависят от глубины. Тогда (1) можно проинтегрировать по вертикали:

$$T_i + uT_x + vT_y = \frac{q}{h} - \frac{\Delta T w_e}{h}, \quad (3)$$

где  $u, v$  - горизонтальные компоненты скорости,  $q$  - поверхностный поток тепла,  $\Delta T$  - разность между  $T$  и температурой под перемешанным слоем,  $w_e$  - скорость вовлечения. Горизонтальной диффузией по отношению к адвекции можно пренебречь, основываясь на оценках величин этих членов.

Изменение температуры перемешанного слоя обуславливается тремя основными процессами: горизонтальной адвекцией, поверхностными потоками тепла и вовлечением воды снизу. Члены в левой части выражения (3) получаем для каждой координаты снимка, однако, члены в правой части выражения (3) с достаточной точностью для каждой координаты не известны. Предполагается, что вклады поверхностных потоков тепла и вертикальное вовлечение изменяются медленно по снимку ТПМ. Полагая, что при решении обратной задачи эти члены неотличимы друг от друга и от крупномасштабных погрешностей температуры объединим их в единый член  $S$ , используя следующее уравнение:

$$uT_x + vT_y + S = -T_i + \varepsilon', \quad (4)$$

где  $\varepsilon'$  - погрешность мелких масштабов, а  $S$  задано формой:

$$S(x, y) = dx + ey + f.$$

Отметим также, что при решении обратной задачи не требуется задания граничных условий. Задача решалась на  $M \times N$  сетке с узлами расположенными в центрах  $P \times P$  подсетки спутни-

кового изображения, где каждый пиксел покрывал область  $\sim 1 \text{ км}^2$ . Для эффективности вычислений поле скорости параметризовалось в терминах коэффициентов конечного ряда Фурье:

$$u(x, y) = A_0 + \sum_{k,l=1}^{N'} \left[ A_{k,l} \sin\left(\frac{k\pi x}{L}\right) \sin\left(\frac{l\pi y}{L}\right) + B_{k,l} \sin\left(\frac{k\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{l\pi y}{L}\right) + C_{k,l} \cos\left(\frac{k\pi x}{L}\right) \sin\left(\frac{l\pi y}{L}\right) + D_{k,l} \cos\left(\frac{k\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{l\pi y}{L}\right) \right], \quad (5)$$

где коэффициенты  $A_0, A_{k,l}, B_{k,l}, C_{k,l}, D_{k,l}$  - являются новыми неизвестными. Поле  $v(x, y)$  определяется аналогично. Шаг подсетки  $\Delta x$ , по которому рассчитывается температурный градиент, контролируется по временному промежутку между спутниковыми снимками. Порция адвектированной воды, отвечающая за изменение в температуре между снимками, разделенными по времени на интервал  $\Delta t$  должна поступать из области, по которой был рассчитан температурный градиент. Таким образом, минимальный размер подсетки связан с максимальной скоростью  $u$ :

$$\Delta x > u \Delta t,$$

где  $\Delta t$  - временной интервал между снимками. Например, подстановка  $u \sim 15 \text{ км/сутки}$  дает оценку  $\Delta x > 15 \text{ км}$ . При расчетах размер сетки составлял  $M=N=16$ , а подсеточный масштаб был  $P = 16$ , так что  $\Delta x = 18 \text{ км}$ . При имеющейся в спутниковых снимках плотности измерений, градиенты температуры рассчитывались по методу наименьших квадратов:

$$T(x, y) = ax + by + c,$$

так что  $T_x = a$ ,  $T_y = b$ . Производная по времени оценивалась, как конечная разность между снимками

$$T_i = \overline{\frac{T(x, y, t_2) - T(x, y, t_1)}{\Delta t}},$$

где черта сверху обозначает осреднение по подсетке.

При решении обратной задачи расчета скорости течений с использованием уравнения теплового баланса имеются две проблемы, которые требуют введения дополнительных ограничений на получаемое решение: погрешности в исходных данных и неоднозначность решений. Использовались три чувствительных "нормы" для минимизации в решениях: (i) горизонтальная дивергенция, (ii) относительная

завихренность, (iii) кинетическая энергия. Решение с наименьшим расхождением в самостоятельно используемом выражении (4) обязательно будет наилучшим решением. Вследствие того, что в исходных данных есть ошибки, точная минимизация отклонений может вызывать появление ложных структур в решении. Например, точное изотермическое решение  $u_c = (S - T_i) |\nabla T|^{-1}$  расходится при  $S - T_i \neq 0$  и  $|\nabla T| \rightarrow 0$ , так что ошибка в  $T_i$  будет производить неприемлемо большую скорость. Дополнительная минимизация энергии подавляет эти ошибки, требуя баланса между квадратичным отклонением в (4) и энергией в поле скорости.

Решение с минимальной энергией очень близко к кросс-изотермическому решению, которое имеет скорость только там, где это требуется уравнением теплового баланса. Решение с минимальной энергией является хорошей оценкой кросс-изотермического течения, однако, вместо этого хотелось бы оценить свойства реалистичных решений. Вследствие того, что уравнение теплового баланса нечувствительно к вдоль-изотермическим компонентам скорости, чтобы получить более реалистичные решения, минимизировались две другие нормировки. Минимизация дивергенции заставляет изменения температуры быть обусловленными движением особенностей, где это возможно, а не конвергенцией/дивергенцией. Минимизация завихренности предотвращает формирование струй в решении там, где градиенты относительно велики, за исключением мест, где это необходимо для удовлетворения уравнения теплового баланса. Хотя в действительном поле скорости могут быть струи, они не обязательно будут точно совпадать с самыми большими температурными градиентами. Результирующее решение будет более сглаженным, чем реальное поле скорости течений.

Комбинируя уравнение теплового баланса с тремя другими нормировками, получим количественное соотношение, которое следует минимизировать

$$\sum_{i,j} |T_i + u \cdot \nabla T - S|_{i,j}^2 + \alpha^2 \sum_{i,j} |\nabla \cdot u|_{i,j}^2 + \gamma^2 \sum_{i,j} |\nabla \times u|_{i,j}^2 + \beta^2 \sum_{i,j} |u|_{i,j}^2. \quad (6)$$

Относительный вклад нормировок задавался весовыми коэффициентами  $\alpha, \beta, \gamma$ . При действительных расчетах  $u$  и  $v$  везде заменялись на их Фурье-образы. Переформированная таким образом система (6) решалась по методу наименьших квадратов, так, что ни одно из уравнений точно не удовлетворялось, а вклад

каждой нормировки определялся соответствующим весовым фактором. Весовые коэффициенты варьировались по широкой области величин, чтобы найти семейство решений, удовлетворяющих уравнению теплового баланса с желаемой точностью. Так как скорости параметризовались в терминах их Фурье-компонент, степень сглаженности в поле скорости определялась числом коэффициентов Фурье ( $N'=10$ ) в (5). Коэффициенты  $\alpha, \beta, \gamma$  подбирались максимальными при условии, что ухудшение согласованности решения с уравнением теплового баланса (первый член в (6)) при добавлении соответствующих этим коэффициентам "нормировок" в (6) не превышает 5-10%.

На рис.9В приведен пример восстановления поля скорости поверхностных течений динамическим методом, где использовались те же исходные данные, что и в расчетах поля течений кинематическим методом (рис.9А). Несмотря на сложную структуру поля скорости течений сравнение этих рисунков показывает качественное соответствие результатов расчетов.

Таким образом, показана возможность восстановления поля скорости поверхностных морских течений по спутниковым изображениям одновременно двумя разными методами – корреляционно-экстремальным и обращением модели переноса тепла. На примере Черного моря по одним и тем же исходным данным оба метода показали работоспособность и дали качественно схожие результаты в области мезомасштабов. Дальнейшее развитие методики должно идти по пути оптимизации и адаптации модели к структуре исходных спутниковых изображений и комплексирования этих двух методов для систематических оперативных дистанционных измерений поля скорости поверхностных морских течений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бабий В.И. Мелкомасштабная структура поля скорости звука в океане. - Л.: Гидрометеиздат, 1983.-200с.
2. Afanasyev Ya. D., Kostianoy A.G., Zatsarin A.G., Poulain P.-M. Analysis of velocity field in the eastern Black Sea from satellite data during the "Black Sea'99" experiment. - IGR, 2001 (in press).
3. Ильин Ю.П. Дешифрование и расчет поверхностных течений на основе спутниковых изображений океана. Дисс...МГИ АНУ, Севастополь, 1989. - 188с.
4. K Kelly. An inverse Model for Near-Surface Velocity from Infrared Images. - Journal of Physical Oceanography, V 19, 1845-1864