

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

### ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ВИХРЕЙ ОКЕАНА ПО СПУТНИКОВЫМ ИК-ИЗОБРАЖЕНИЯМ

© 2011 г. А. И. Алексанин\*, А. А. Загумённов

Учреждение Российской академии наук Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

\*E-mail: aleks@satellite.dvo.ru

Поступила в редакцию 09.03.2010 г.

Композиционные карты термических структур поверхности моря в форме доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК) позволяют регулярно получать информацию о циркуляции поверхности океана. Высокая корреляция доминант с направлениями течений позволяет использовать их для идентификации вихрей воды. Предложен новый автоматический алгоритм идентификации вихрей моря, выделяющий произвольные замкнутые циркуляции. Алгоритм состоит из трех процедур: идентификации вихря с расчетом его центра, размера и формы; построения контуров вихря на основе минимума величины “протекания” ДОТК через контур; анализа полученных контуров и отбраковки ложно выделенных объектов. Рассмотрена основная проблема автоматического мониторинга вихрей – наличие значительного количества ложных объектов. Предложены алгоритмы отбраковки, приведена их эффективность и оценена возможность автоматического прослеживания вихря по последовательности карт. Алгоритм апробирован на двухмесячной серии композиционных карт ДОТК Охотоморского района при сложных облачных условиях наблюдения.

**Ключевые слова:** вихри океана, автоматическое обнаружение, спутниковое изображение, ориентации термических контрастов

#### ВВЕДЕНИЕ

Автоматическая идентификация вихрей океана с оценкой положения центра и формы является важной задачей анализа структуры циркуляции моря. Ежедневный оперативный мониторинг вихрей в настоящее время возможен только по данным спутникового дистанционного зондирования (ДЗ) в видимом и ИК-диапазонах спектра. Наиболее часто применяемое на практике визуально-ручное дешифрирование спутниковых ИК-изображений трудоемко, субъективно и затруднительно при наличии сложных облачных условий (Алексанин и др., 1997; Бедрицкий и др., 2007). В основе дешифрирования лежит известный факт “вытягивания” изотерм в сдвиговом потоке (Федоров, 1987; Борисов и др., 1989; Essen, 1995), что приводит к высокой корреляции ориентаций изотерм с направлениями скоростей поверхностных течений (Алексанин et al., 1998; Алексанин и др., 2001). В последние годы было предпринято значительное количество попыток создания алгоритма автоматического выделения вихрей. В качестве базовой информации для идентификации вихрей используются различные градиентные характеристики поля яркости изображения: градиенты яркости в форме ориентированных текстур (Lemonnier, 1994); направления градиентов яркости, обработанные алгоритмами данного текстурного анализа (Алексанин et al., 2001; Castellani, 2006); направления оптических потоков изображения (Fernandes, 2009); направления и модули градиентов (Hai et al., 2008). Можно выделить следующие подхо-

ды к распознаванию вихрей: использование круговой модели циркуляции в качестве начального приближения при расчете центра вихря (Alexanin et al., 2001); применение нейронных сетей с обучением (Fernandes, 2009; Hai et al., 2008); использование произвольной замкнутой модели циркуляции (Алексанин и др., 2004). Для уточнения центра вихря, оценки его формы и размера часто используется эллипсоидальная модель циркуляции (Alexanin et al., 2001; Hai et al., 2008; Fernandes, 2009). Согласно последним публикациям, в настоящее время удается добиться высокой достоверности выделения вихрей при благоприятных погодных условиях наблюдений. Результаты апробированы в основном на тестовых выборках. В работе (Hai et al., 2008) представлены результаты автоматического и довольно успешного мониторинга вихрей в районе Гольфстрима за пять лет. Однако небольшое количество вихрей, прослеженное за эти годы, указывает на то, что проводился мониторинг только рингов, которые существенно легче выделяются из-за их размера и наличия ярко выраженного ядра в поле температур. В данной работе отмечаются трудности выделения циклонических рингов из-за падения со временем термических контрастов ядра. Как правило, при автоматическом выделении вихрей выделяется и значительное количество ложных объектов, эффективность фильтрации которых обычно не высока. Решение данной проблемы не достаточно детально освещается в публикациях на данную

тему, кроме того, не приводятся никакие статистические оценки и причины пропуска вихрей.

Циркуляция моря — это плотная упаковка вихрей разных размеров (Каменкович и др., 1987), поэтому результат поиска должен зависеть от размера шаблона поиска. Аппроксимация формы вихря эллипсом не всегда соответствует действительной форме объекта, что влияет как на эффективность обнаружения, так и на оценки положения центра и размера вихря. Нет также примеров решения задачи автоматической идентификации вихря по последовательности изображений. Решение этой задачи является конечной целью автоматического мониторинга вихрей. Основная масса работ сделана на материале с благоприятными погодными условиями. При облачных условиях необходимо использовать композиционные карты. Встает вопрос о выборе оптимальных алгоритмов построения композиционных карт для уверенного мониторинга вихрей и оценки допустимого временного интервала между изображениями, когда автоматическая идентификация по последовательности изображений эффективна. Поэтому основными целями данной работы были: развитие алгоритма идентификации вихрей (Алексанин и др., 2008; Алексанин и др., 2009) с оценкой положения центра на основе модели произвольной замкнутой циркуляции; создание алгоритма выделения ядра и формы вихря; построение критериев отбраковки ложных объектов; создание алгоритма идентификации вихря на последовательности изображений; апробация алгоритмов на сложном по погодным условиям регионе Охотского моря в режиме регулярного мониторинга.

### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В качестве исходных данных были использованы меркаторские проекции ИК-изображений спутников NOAA района Охотского моря и Курильских о-вов ( $41^{\circ}$ – $52^{\circ}$  с.ш.,  $141^{\circ}$ – $160^{\circ}$  в.д.) за период сентябрь–октябрь 2006 г. Всего было взято 199 исходных изображений с разной степенью покрытия облачностью (от 5 до 90%). Для каждого исходного изображения были построены карты доминантных ориентаций температурных контрастов (ДОТК). Для ИК-изображений поверхности океана ДОТК (Алексанина, 1997) является доминирующей касательной к изотермам в заданной окрестности точки поля  $(i, j)$ , и характеризуется углом  $D_{ij}$ , лежащим в диапазоне  $(-\pi/2, \pi/2)$ , и величиной статистической значимости  $P_{ij}$ . Высокая корреляция статистически значимых ДОТК с направлениями поверхностных течений (Алексанин и др., 2001) и ее рост при росте скорости течения позволили рассматривать ДОТК как оценки направлений течений. Для вихрей статистически значимые как по пространству, так и по времени доминанты аккумулируются обычно в зонах максимальных скоростей (Алексанин и др., 2007). Игнорирование доминант с низкой статистической значимостью дает более корректное пред-

ставление об общей картине циркуляции моря, но появляются области, где нет оценок циркуляции.

Обработка данных показала, что за пять дней при существующих облачных условиях набирается достаточно изображений для построения композиционной карты ДОТК, на которой представлены значительные по площади структуры циркуляции. Были построены композиционные карты ДОТК за непересекающиеся периоды по пять дней. И хотя ежедневный мониторинг более эффективен, выбор непересекающихся периодов позволяет исключить случаи сравнения вихрей, построенных по одним и тем же изображениям. Это существенно ухудшает прослеживание вихрей, но улучшает объективность оценки эффективности критериев идентификации вихрей. Всего было построено 12 композиционных карт, которые в дальнейшем были использованы непосредственно для расчетов алгоритмами идентификации.

Тестовые вихри на ИК-спутниковых изображениях выбирались визуально по характерным термическим особенностям циркуляции воды (Алексанин и др., 1997). В случае нахождения подобных структур, вручную выбирался центр вихря и оценивались его характерные размеры, закрутка, строение. Выбирались вихри с радиусами в диапазоне 30–60 км, соответствующие синоптическому масштабу циркуляции моря. Были сформированы два набора тестовых вихрей с учетом следующих условий. В первом наборе для каждой пятидневной композиционной карты ДОТК в том интервале дат, в котором она построена, были собраны тестовые вихри, которые удалось обнаружить на соответствующих ИК-изображениях. Затем наборы для всех композиционных карт ДОТК были просуммированы и получены 122 тестовых вихря, имевших разные размеры, структуру и направление закрутки. Для построения второго набора тестовых вихрей за основу был взят первый набор, в котором были выявлены устойчивые во времени вихри (от 15 дней и более). Было найдено 11 устойчивых вихрей, каждый из которых прослеживался как по полутонным изображениям, так и на непрерывной временной последовательности карт ДОТК. Поскольку для визуальной идентификации вихря требуется наличие значительной части его изображения, открытой от облачности, то, возможно, некоторые вихри не попали в список тестовых, хотя и проявились в композиционных картах ДОТК.

### АЛГОРИТМЫ ПОИСКА ВИХРЕЙ И ОЦЕНКИ ИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Отличительной чертой нового метода автоматического выделения вихрей океана с расчетом параметров их положения, размера и формы является отказ от жесткой модели циркуляции вихря. Поскольку ДОТК можно рассматривать как оценки направлений течений, то новый алгоритм базируется на построении замкнутых контуров вихря на основе минимизации “протекания” ДОТК сквозь кон-

тур. Это позволяет выделять произвольную форму замкнутой циркуляции, а также локализовать фронты, если циркуляцию разомкнуть. Метод использует два алгоритма: алгоритм поиска вихря с оценкой его размера и алгоритм построения контура ядра вихря.

*Алгоритм поиска вихрей заданного характерного размера*

**Шаг 1.** Используя ориентации термических контуров как направления скоростей, ищем центры вихрей с характерным размером  $R_0$  на основе модели замкнутой циркуляции.

Для каждой точки изображения  $X_i = (x_i, y_i)$ , рассматриваемой как потенциальный центр вихря, все пространство разбивается на  $K$  секторов, и для каждого из секторов вычисляется абсолютная величина “протекания”

$$\delta_k = \min_D 1/N_k \sum w_j |D_j - DM_j|, \quad (1)$$

где  $j: \|X_i - X_j\| < R_0, j = 1, N_k, D_j$  – ДОТК в точке  $X_j, DM_j$  – модельная оценка ДОТК в секторе (используется линейная модель роста угла ДОТК в секторе  $k$ );  $w_j$  – весовой коэффициент, пропорциональный статистической значимости доминанты  $j$ ;  $N_k$  – количество доминант в секторе  $k$ .

$$DM_j = D^0 + D' \varphi_j,$$

где  $\varphi_j$  – угол точки  $X_j$  в полярных координатах относительно биссектрисы сектора;  $D^0$  – средняя величина доминант в секторе.

Критерий отбора точек, претендующих на центры вихрей,

$$\sigma_D = 1/K \sum \delta_k < \varepsilon, \quad k = 1, K. \quad (2)$$

Оставляем только те центры, в  $R_0$ -окрестности которых нет других точек с лучшим критерием  $\sigma_D$ .

**Шаг 2.** Построение начального приближения вихря – грубый расчет внешней границы.

В каждом секторе с шагом  $\Delta R$  наращиваем его размер  $R_k$  до тех пор, пока выполняется условие

$$\delta_k < \varepsilon \quad \text{для } j: R < \|X_i - X_j\| < R + \Delta R.$$

Если это условие не выполняется уже для доминант, лежащих в диапазоне  $R_0 - \Delta R < \|X_i - X_j\| < R$ , то размер сектора уменьшаем. Контролируем размеры получившихся величин  $R_k$  таким образом, чтобы отношение максимального сечения вихря к минимальному не превышало заданной величины (трех). Грубое начальное приближение контура внешней границы вихря – контур, проходящий через  $K$  точек, лежащих по середине внешней границы секторов.

**Шаг 3.** Построение оптимального контура ядра вихря на основе минимизации протекания через контур

$$\sigma_c = \min_{\{X_m\}} \delta_c / L < \varepsilon_c \quad \text{для } j: \|X_c - X_j\| < \Delta R_c, \quad (3)$$

где  $L$  – длина контура;  $X_c$  – точка контура, ближайшая к точке расчета ДОТК  $X_j$ ;  $\{X_m\}$  – точки концов отрезков контура;  $\delta_c$  – модуль протекания через контур, рассчитываемый по формуле (1) с параметрами  $DM_j$  и  $N_k$ , характеризующие ориентацию отрезка контура с точкой  $X_c$  и количество участвующих в расчетах доминант. Отбраковка вихрей по критерию протекания через контур. Уточнение центра вихря, рассчитываемого как точка центра тяжести контура.

Для анализа направления закрутки вихря рассчитывается также величина среднего протекания  $\sigma_A$ , рассчитываемая также по формуле (3), где  $\delta_c$  среднее скалярное произведение единичных векторов ДОТК с единичными векторами – ортогоналями к контуру в точках  $X_c$ , направленных от центра вихря. Эта величина характеризует наклон ДОТК к зоне максимальных скоростей в сдвиговом потоке (Александрин 2001 и др.), а не величину дивергенции/конвергенции скоростей поверхностных течений.

*Алгоритм построения контура вихря*

Алгоритм является итерационным и сходящимся за конечное число шагов. Вход – грубое начальное приближение контура внешней границы вихря и точка его центра. Поскольку начальное приближение внешней границы вихря строилось при максимально допустимой величине протекания, то при уточнении контура по критерию протекания последний стремится в зону наибольшей когерентности доминант. Такая зона чаще всего находится вблизи области максимальных скоростей поверхностных течений (Александрин и др., 2001; Aleksanin et al., 2007).

**Шаг 1.** Оптимальная расстановка точек контура.

Решается оптимизационная задача (3) посредством последовательного смещения точек концов отрезков контура. Для точки  $X_m$ , обеспечивающей при ее смещении максимальное убывание величины  $\delta_c$ , решается задача

$$\min_{\alpha} \delta_c(X_m + \alpha r),$$

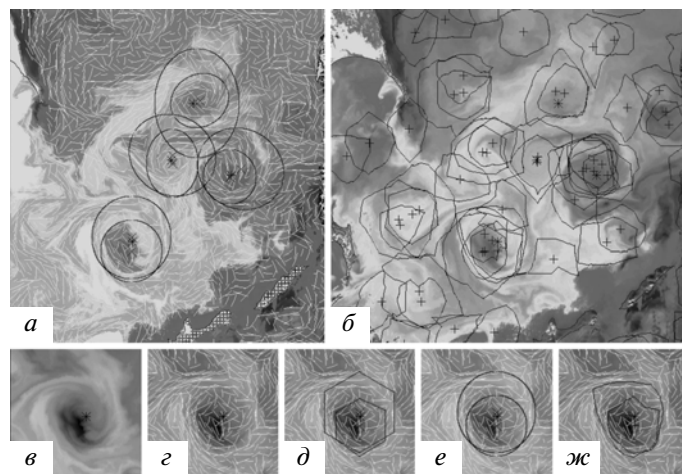
где  $r$  – направление смещения точки, проходящее через точку конца отрезка контура и центр вихря.

Пересчет центра вихря, если центр оказался вне контура, либо точка контура совпала с центром.

**Шаг 2.** Есть ли еще точки, позволяющие уменьшить протекание? Да – шаг 1. Нет – шаг 3.

**Шаг 3.** Дробим отрезок с максимальной величиной протекания. Если дробление не предельное и критерий протекания через новые отрезки не выполняется, то переход на шаг 1.

**Шаг 4.** Анализ получившегося контура, уточнение центра вихря и отбраковка объекта по величине протекания  $\sigma_c$ .



**Рис. 1.** *a* – Полутоновое ИК-изображение за 06.09.2006, совмещенное с композиционной картой ДОТК за 06.09.2006–10.09.2006, центры (×) и контуры внешних границ некоторых вихрей, аппроксимированные эллипсами и выделенные по двум характерным размерам одновременно (40 и 60 км); а также центры тестовых вихрей (\*); *б* – полутоновое изображение за 06.09.2006 и контуры всех выделенных объектов (без отбраковки); *в, г, д, е, ж* – стадии работы алгоритмов на примере одиночного вихря.

Пример работы алгоритма поиска вихрей приведен на рис. 1*а*, на рис. 1*б* представлены результаты работы алгоритма построения контуров. На рис. 1*в–ж* приведены ключевые стадии обработки изображений на примере конкретного вихря: *в* – полутоновое изображение вихря с центром, определенным экспертом; *г* – полутоновое изображение и ДОТК; *д* – начальные приближения центров и границ вихря, построенные для двух характерных размеров  $R_0$ ; *е* – эллиптические аппроксимации границ вихря; *ж* – построенные контура вихря для двух характерных размеров с пересчитанными центрами вихря.

стовых вихрей в экспериментах оценивалась автоматически по количеству соответствий рассчитанных вихрей тестовым вихрям. Соответствие устанавливалось в том случае, если в окрестности центра тестового вихря в пределах радиуса поиска, с которым рассчитывались вихри, находился центр рассчитанного вихря. В случаях, когда таких центров было несколько, в соответствие ставился ближайший центр, а остальные помечались специальным флагом и не учитывались ни как ложные, ни как истинные. Для интерпретации полученных результатов проводился визуальный анализ.

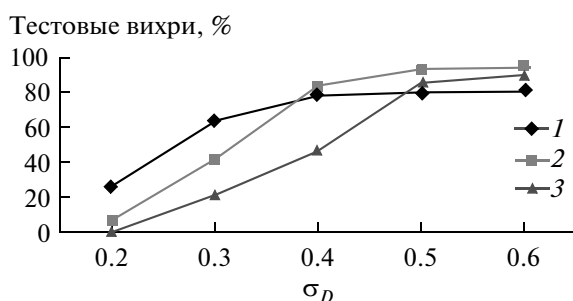
## ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Был проведен ряд экспериментов, в ходе которых исследовалась эффективность выделения вихрей, возможность и эффективность отбраковки ложных объектов на этапах расчета начальных приближений и построения контуров, прослеживание вихрей во времени. Эффективность выделения те-

### Оценка эффективности обнаружения вихрей

Целью эксперимента было получение оптимального критерия для выделения вихрей на этапе построения его внешней границы. В данном эксперименте по каждой композиционной карте ДОТК при разных параметрах были рассчитаны точки-претенденты на центры вихрей. Поиск велся по трем характерным размерам вихрей с радиусами окрестности расчета – 20, 40 и 60 км. Бралось различные критерии согласованности модельных и реальных доминант в секторе с параметрами согласованности  $\sigma_D$  – 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 и 0.6. Здесь и далее расчеты проводились с шагом  $\Delta R = 4$  км и величиной  $K = 6$ . Отслеживались следующие показатели: количество всех выделенных объектов при разных характерных размерах и  $\sigma_D$ ; количество выделенных объектов, соответствующих тестовым вихрям и количество ложных объектов; количество вихрей, выделенных хотя бы при одном  $R_0$  и количество вихрей, выделенных одновременно при двух и трех характерных размерах.

На рис. 2 приведен график эффективности автоматического выделения вихрей. Следует заметить,



**Рис. 2.** Зависимость количества выделенных вихрей (в процентах) от критерия выделения  $\sigma_D$  и радиуса окрестности расчетов  $R_0$  (1 – 20 км; 2 – 40 км; 3 – 60 км).

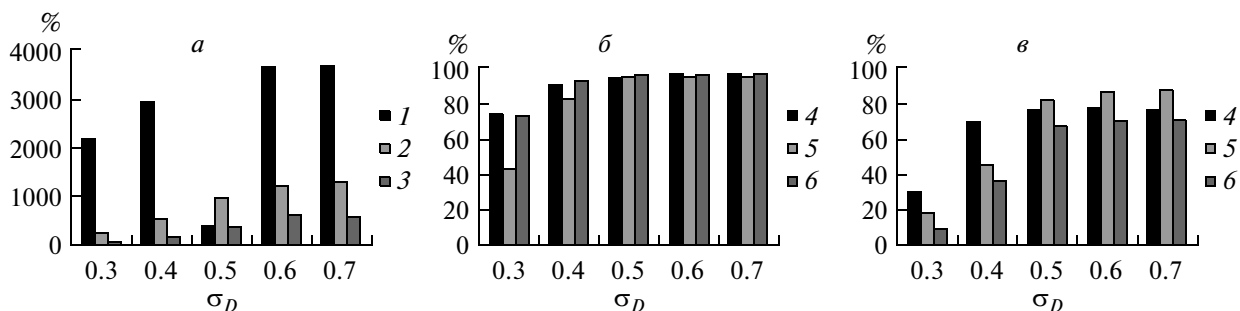


Рис. 3. Графики эффективности работы алгоритма выделения вихрей в зависимости от величины критерия  $\sigma_D$  и радиуса зоны характерного размера  $R_0$  (1 – 20 км, 2 – 40 км, 3 – 60 км, 4 – 20 и 40 км, 5 – 40 и 60 км, 6 – 20, 40 и 60 км): а – процент ложных объектов относительно выделенных истинных при разных радиусах поиска; б – процент выделенных вихрей хотя бы при одном радиусе поиска; в – процент вихрей, выделенных при нескольких радиусах поиска одновременно.

что даже при слабых критериях отбраковки выделение всех вихрей при одном радиусе поиска не происходит. Максимальное количество вихрей выделяется при двух радиусах поиска (40 и 60 км). Результаты показывают, что при величине критерия отбраковки  $\sigma_D = 0.5$  выделяется подавляющее большинство вихрей (94%). Анализ девяти невыделенных тестовых вихрей показал, что на значительной площади каждого вихря не было доминант. Вихри, выделенные с радиусом окрестности расчета 20 км, не добавляют новых тестовых вихрей в список выделенных и в несколько раз увеличивают список ложно выделенных объектов. Поэтому поиск вихрей с радиусом 20 км в дальнейшем не проводился.

На рис. 3 приведены результаты работы алгоритма на этапе построения грубой границы внешнего контура (шаги 1 и 2 первого алгоритма). Оценивалось количество ложно выделенных объектов и эффективность идентификации тестовых вихрей как по совокупности выделений по двум характерным размерам  $R_0$ , так и при выделении по двум размерам одновременно. Следует отметить, что количество ложно выделенных объектов во много раз превышает количество истинных. И чем меньше радиус зоны характерного размера, тем больше этот процент. Очень большим оказался процент вихрей, которые выделяются при поиске с разными радиусами одновременно, что может служить индикатором при отсеивании ложных объектов.

Дальнейшие эксперименты показали, что уточнение центров вихрей на основе алгоритма построения их контуров улучшают показатели правильно выделенных вихрей, но не существенно.

#### *Отбраковка ложных объектов на этапе построения начального приближения геометрии вихря*

Целью эксперимента было нахождение эффективных критериев отбраковки ложных объектов по результатам расчетов алгоритмом поиска вихрей. В данном эксперименте по исходным композиционным картам ДОТК были выделены объекты по критерию  $\sigma_D = 0.5$  и построены их внешние границы.

Эксперимент проводился отдельно для радиусов  $R_0$ , равных 40 и 60 км, для которых за 100% брались 111 и 102 выделенных тестовых вихря соответственно, а за 100% ложных вихрей – 1055 и 335 объектов. В ходе эксперимента оценивался процент оставшихся после отбраковки тестовых вихрей и процент отбракованных ложных вихрей. Исследовались следующие критерии, значения которых рассчитывались для каждого объекта:

- средний модуль протекания  $\sigma_D$ ;
- замкнутость циркуляции (отклонение прироста углов ДОТК по всем секторам от  $2\pi$ )

$$\Delta\varphi = \left| 2\pi - \sum D_k^1 2\pi / K \right|, \quad k = 1, K;$$

- отклонение циркуляции вихря от круговой модели циркуляции

$$\Delta D^0 = 1/K \sum \left| D_k^0 - \pi(2k-1)/K \right|, \quad k = 1, K.$$

Исследовалась эффективность как отдельных критериев, так и их совместное применение. Эксперименты показали, что при различных порогах представленные критерии не снижают существенно число ложных объектов без потерь тестовых вихрей. Это объясняется не столько грубостью выбранной модели циркуляции вихря, сколько сложными условиями наблюдения – наличием значительной облачности, не позволяющей рассчитать устойчивые во времени доминанты для большинства композиционных карт. Но даже при использовании “мягкого” критерия расчета композиционной карты (выбор ближайших к дате композиционной карты статистически значимых доминант) значительное количество тестовых вихрей не имеет плотного покрытия площади вихря доминантами. Для количественного сравнения эффективности критериев было выбрано значение допустимых потерь тестовых вихрей при отбраковке, равное 20%. В результате эксперимента было обнаружено, что наиболее эффективным является одновременное применение критерия  $\sigma_D$  с  $\Delta\varphi$ , или  $\Delta D^0$ . Совместное применение критериев обеспечивает 40% отбраковки ложных объектов при сохранении 80% истинных

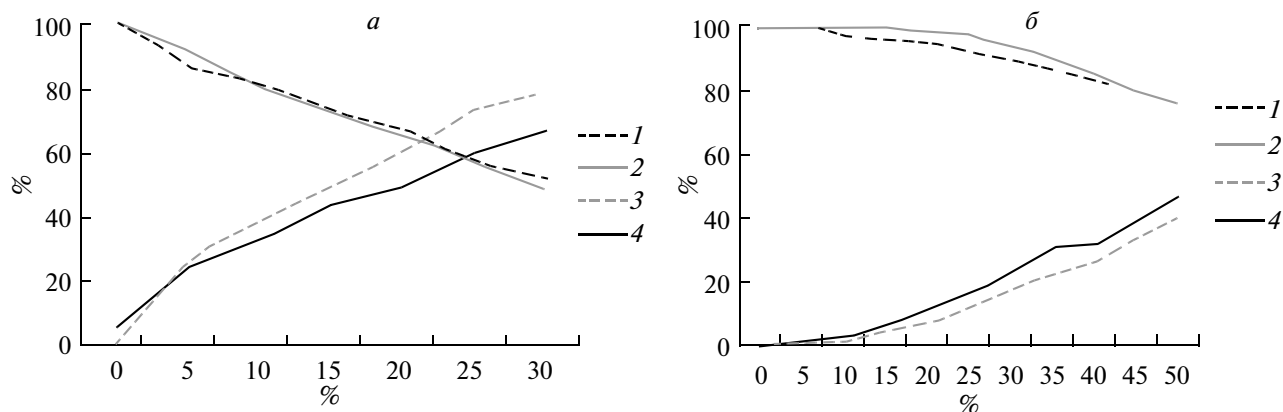


Рис. 4. Количество выделенных вихрей (линии 1, 2) и отбраковываемых ложных объектов (линии 3, 4) для двух радиусов  $R_0 = 40$  км (1, 3) и 60 км (2, 4) в зависимости от порога отбраковки: а – при одновременном выполнении критерия протекания  $\sigma_D$  и критерия замкнутости циркуляции  $\Delta\phi$ ; б – при выполнении хотя бы одного из критериев ( $\sigma_D$  или  $\Delta D^0$ ).

вихрей. На рис. 4 приведены графики эффективности при совместном использовании нормированных критериев отбраковки. Для нормировки критерия его порог подбирался таким образом, чтобы обеспечивался заданный процент потерь тестовых вихрей при его индивидуальном применении. Поэтому ось абсцисс графика – это процент потерь тестовых вихрей по одиночному критерию. Остальные сочетания критериев, включая одновременное выделение вихрей двумя радиусами поиска, обеспечивают лишь 20–30% отбраковки ложных объектов при сохранении 80% тестовых вихрей. Анализ “потерянных” тестовых вихрей при использовании разных комбинаций критериев показывает, что это в значительной мере разные вихри. Поэтому оптимальная настройка сочетаний критериев отбраковки объектов на этапе выделения вихрей является самостоятельной задачей.

#### Отбраковка ложных объектов по параметрам контуров вихрей

Целью эксперимента было исследование возможных критериев отбраковки ложных объектов на основе характеристик строящегося контура вихря. При расчете контуров использовались статистически значимые доминанты в окрестности контура  $\Delta R_c = 5$  км. Производился пересчет центра вихря по полученному контуру. Эксперимент проводился на тех же данных и по той же методике, что и предыдущий. Исследовались следующие критерии:

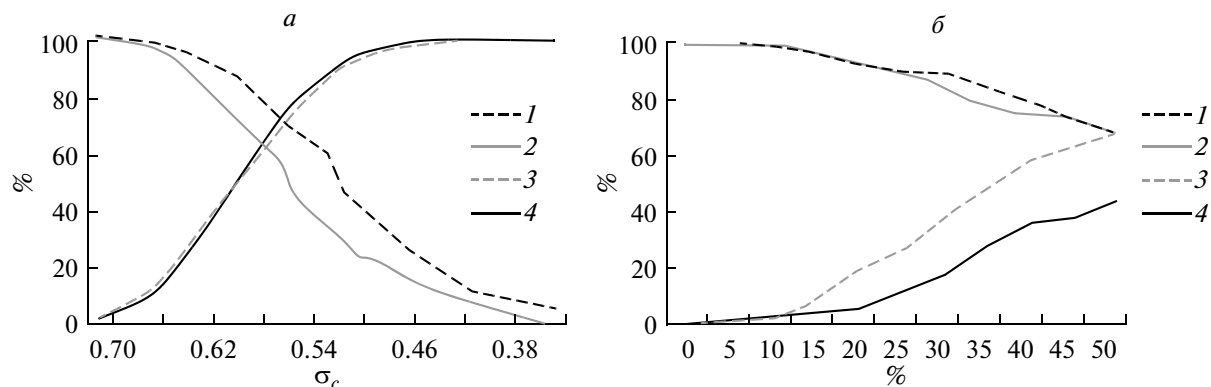
- степень полноты контура  $F = S/L^2$ , где  $S$  – площадь, а  $L$  – длина контура;
- средний модуль протекания на единицу длины контура  $\sigma_c$ .

В результате эксперимента было обнаружено, что наиболее эффективным является критерий отбраковки по величине  $\sigma_c$ , применение которого обеспечивает 60% отбраковки ложных объектов при сохранении 80% истинных вихрей для  $R_0 = 40$  км, а также их совместное применение (рис. 5). Сле-

дует также отметить существенно меньшую эффективность критериев при поиске вихрей с радиусом  $R = 60$  км.

Визуальный анализ полученных контуров показал в целом их хорошее соответствие циркуляции вихрей, определяемой визуально, и не всегда эта форма близка к эллиптической. В результате оптимальной подгонки получившийся контур обычно меньше по размерам, чем его начальное приближение, но часто он не достигает зоны максимальных скоростей, а остается с внешней стороны этой зоны. Наиболее вероятное объяснение – многоэкстремальность задачи оптимальной подгонки контура. При радиусе окрестности  $R_0 = 40$  км контур лежит ближе к зоне максимальных скоростей, что объясняется преобладанием этого характерного размера в выбранном регионе моря. Поскольку в сдвиговом потоке изотермы имеют наклон к зоне максимальных скоростей (Алексанин и др., 2001; Алексанин и др., 2007), то такая особенность построения контуров позволяет надеяться на определение знака закрутки вихря автоматически. Закрутка вихря устойчиво определяется по параметру  $\sigma_A$ , средняя величина которого при  $R_0 = 40$  км для антициклонов равнялась  $\sigma_A = -0.11 \pm 0.1$ , а циклонов –  $\sigma_A = 0.14 \pm 0.14$ . Для  $R_0 = 60$  км получены фактически те же результаты.

Была также рассмотрена величина рассогласований центров вихрей, рассчитанных автоматически и оцененных визуально. На этапе построения начального приближения вихря эта величина для  $R_0 = 40$  км оказалась равной  $\Delta X_{40} = 11 \pm 7$  км, а для  $R_0 = 60$  км –  $\Delta X_{40} = 14 \pm 16$  км. Изменение положения центра вихря при его пересчете по контуру фактически не меняло эти рассогласования, а лишь незначительно увеличивало количество правильно идентифицированных тестовых вихрей. В то же время некоторые рассогласования были значительные (более 20 км и превышали иногда размер вихря). Их анализ показал, что причинами были следующие факторы: значительное перемещение вихря в те-



**Рис. 5.** Количество выделенных вихрей (линии 1, 2) и отбраковываемых ложных объектов (линии 3, 4) для двух радиусов  $R_0 = 40$  км (1, 3) и 60 км (2, 4) в зависимости от порога отбраковки: а – при использовании критерия протекания  $\sigma_c$ ; б – при выполнении хотя бы одного из критериев ( $\sigma_c$  или  $F$ ).

чение периода построения композиционной карты (пять дней); отсутствие доминант на значительной части площади вихря; сильная деформация вихря из-за взаимодействия с соседним вихрем, или струей.

Даже при жестких критериях отбраковки значительное количество ложных вихрей оставалась на финальной карте. Для анализа причин этого был проведен следующий эксперимент. Была проведена фильтрация вихрей одновременно по четырем критериям ( $\sigma_D$ ,  $\Delta\varphi$ ,  $\sigma_c$ ,  $F$ ) с пороговыми значениями, соответствующими допустимым потерям тестовых вихрей в 20%. Осталось около половины тестовых вихрей при падении количества ложных вихрей в 10 раз для  $R_0 = 40$  км и в 5 раз для  $R_0 = 60$  км. Анализ оставшихся “ложных” вихрей (рис. 6) показал, что около половины из них являются реальными вихрями, которые либо малы по размерам, либо слабоконтрастны и поэтому пропущены экспертом, либо находятся на стадии формирования, что подтверждалось анализом изображений последующих карт. Было несколько реальных вихрей, которые выделялись по карте ДОТК и прослеживались на последующих картах, но из-за облачности их невозможно было выделить по полутоновым изображениям, использованным при формировании карты ДОТК. Реально ложные вихри выделялись в основном из-за образования термических аномалий характерного размера и формы, которые появляются чаще всего из-за проникновения мелких струй в воды другой температуры и в основном в окрестностях сильных стационарных течений. Некоторое количество ложных вихрей являются результатом выделения группы мелких компактно расположенных вихрей и струй, что наблюдается в основном при выделении с  $R_0 = 60$  км.

#### *Прослеживание вихрей по временной серии карт ДОТК*

В данном эксперименте использовался второй тестовый набор данных из 11 непрерывно просле-

живаемых устойчивых во времени вихрей, которые позволили сформировать 46 пар вихрей, смежных по времени. Среднее расстояние между центрами вихрей, составляющих пары, оказалось равно 21 км, а максимальное – 47 км. Смещение вихря на 40–50 км делает задачу автоматического прослеживания вихрей синоптического масштаба трудно решаемой из-за наличия плотной упаковки вихрей в море (Каменкович и др., 1987). Поэтому для быстро движущихся вихрей необходимо использовать композиционные карты за меньший интервал времени.

Центры контуров, рассчитанных автоматическим алгоритмом, были объединены в пары по смежным композиционным картам ДОТК. Пары строились таким образом, чтобы расстояние между центрами контуров было минимальным и не превышало максимально допустимого расстояния (МДР), выбранное равным 70 км, что слегка превышает максимально наблюдаемое расстояние для тестовых вихрей. Кроме того, рассчитанные данные, из которых составлялись пары, подвергались действию критерия отбраковки  $\sigma_D$  со значениями, обеспечивающими сохранение 100, 90 и 80% тестовых центров. Оценивались процент правильного выделения тестовых пар, длины цепочек непрерывно прослеженных вихрей и анализировались цепочки из ложно выделенных объектов.

На рис. 7 приведен процент автоматически выделенных пар тестовых вихрей, где за 100% было взято 46 пар. Пара тестовых вихрей считалась выделенной, если оба автоматически рассчитанных вихря соответствовали тестовым. Небольшое увеличение процента автоматически выделенных пар тестовых вихрей при  $R_0 = 40$  км с предварительной отбраковкой связано с тем, что отбраковка ложных объектов уменьшает вероятность образования пар тестовый вихрь – ложный объект. При объединении наборов тестовых пар, выделенных отдельно при  $R_0 = 40$  км и  $R_0 = 60$  км, наблюдается уверенное выделение 80% всех тестовых пар при всех трех значениях уровня предварительной отбраковки.

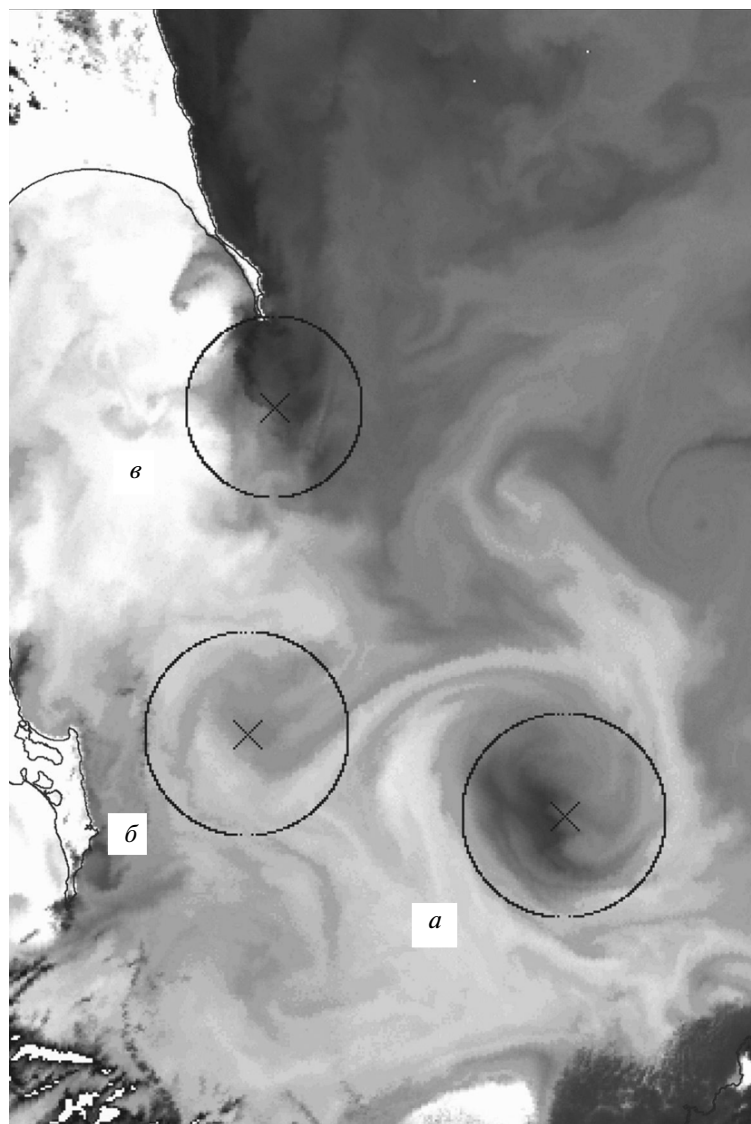


Рис. 6. Вихри: *а* – тестовый вихрь; *б* – вихрь на стадии формирования, отнесенный к ложным; *в* – ложно выделенный вихрь.

При анализе выделения тестовых пар было обнаружено, что предварительная отбраковка рассчитанных вихрей позволяет вдвое сократить количество ложных пар в сравнении с незначительным уменьшением количества выделяемых тестовых пар. Однако использование критерия расстояния между объектами, составляющими пары, не позволяет уверенно разделить пары истинных и ложных объектов по этому критерию.

Анализ длин цепочек объектов, выделенных автоматически по хронологической последовательности карт ДОТК, показал, что при разных уровнях предварительной отбраковки от 80 до 100% цепочек, состоящих из ложных объектов, имеют длину в три-четыре объекта. И если без отбраковки по критерию  $\sigma_D$  количество ложно выделенных цепочек длиной в три объекта превышает тестовые цепочки более чем в 3 раза для  $R_0 = 40$  км, то при отбраковке

количество цепочек ложных объектов длиной более четырех быстро падает с длиной. Однако бывают устойчивые во времени объекты, которые представляют собой тепловые аномалии на поверхности воды, напоминающие в поле ДОТК по форме вихревые структуры, но вихрями не являющиеся. Встречаются также случаи, которые относились к длинным цепочкам из ложных объектов, но по сути ложными не были. Это были случаи, когда эксперт не мог в условиях значительной облачности (в основном ячеистого характера) выделить вихрь за пять дней по полутоновым изображениям, а в соответствующих композиционных картах ДОТК циркуляция этого вихря устойчиво прослеживалась.

Анализ цепочек из автоматически выделенных тестовых вихрей показал, что чем длиннее цепочка, тем больше вероятность появления в ее структуре ложных объектов либо ее преждевременного раз-



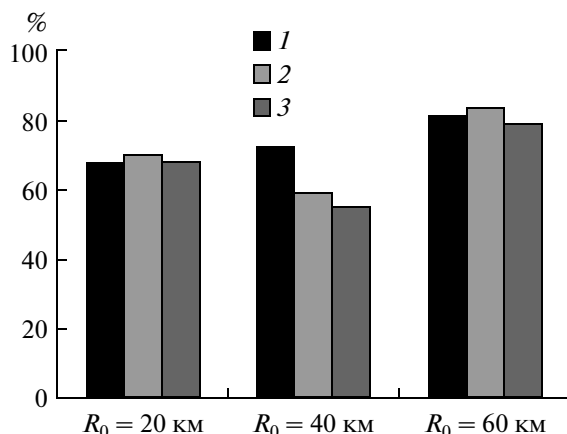


Рис. 7. Гистограмма эффективности отслеживания вихрей при МДР = 70 км с предварительной фильтрацией объектов по критерию  $\sigma_D$  — с сохранением 100 (1), 90 (2) и 80% (3) тестовых вихрей.

рыва. Разрыв цепочки обуславливался, как правило, сложными условиями наблюдения за вихрем, и если вихрь двигался относительно медленно, то цепочку можно было восстановить по последующему композиционному изображению. Включение ложных объектов в цепочку автоматически отслеживаемых тестовых вихрей было обусловлено в основном большой величиной МДР. Таким образом, временной интервал построения композиционных карт раз в пять дней слишком велик для заданного региона. Решение этой проблемы возможно как путем уменьшения интервала осреднения по времени при построении композиционных карт за счет, например, привлечения данных геостационарных спутников (48 изображений в день), так и посредством привлечения изображений в видимом спектральном диапазоне (например, при привлечении данных радиометров MODIS), по которым циркуляция вихря пририсовывается существенно четче и полнее, чем по ИК-изображениям. В то же время всегда будет оставаться проблема опознания вихря после продолжительного интервала отсутствия информации из-за плохих условий наблюдения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Апробация представленного алгоритма автоматического выделения вихрей моря с оценкой их центра, формы и размера по спутниковым ИК-изображениям в сложных облачных условиях наблюдения демонстрирует перспективность выбранного подхода для анализа структуры циркуляции. Композиционные карты термических структур в форме доминантных ориентаций термических контрастов, созданных по данным спутников NOAA, хорошо оценивают направления течений синоптического масштаба и являются информационной базой нового алгоритма. Поскольку океан представляет собой плотную упаковку вихрей разных размеров, то речь может идти только о выделении вихрей заданного размера. Задача автоматического выделения вихрей решается с высокой надежностью и близка по эффективности к

результатам дешифрирования изображений экспертом. С высокой вероятностью можно оценить и знак циркуляции вихря — циклон/антициклон. Основной проблемой является отбраковка ложно выделенных объектов, к которым могут быть отнесены, в том числе и мелкие вихри.

Критерии отбраковки ложных объектов, основанные в первую очередь на когерентности доминант, используемых как оценки направлений течений, показывают хорошую эффективность, но в реальных условиях наблюдения не гарантируют отбраковку всех ложных объектов. Количество остающихся ложных объектов достаточно велико. Однако автоматическое отслеживание объектов во времени показывает, что уже простой критерий контроля изменчивости положения центра вихря на смежных композиционных изображениях приводит к тому, что истинные долгоживущие вихри хорошо отслеживаются, а ложные нет.

Улучшение работы алгоритма возможно в двух направлениях. Во-первых, это улучшение информационной базы. Использование данных геостационарных спутников с более частым обзором акватории мониторинга должно улучшить информативность и достоверность композиционных карт ДОТК. Использование более коротких интервалов времени для построения композиционных карт (трехдневки, например) и ежедневное их построение должно улучшить эффективность алгоритмов распознавания. Использование данных пассивного микроволнового зондирования для получения структуры моря под облаками в настоящее время из-за их низкого пространственного разрешения позволит лишь улучшить выделение крупных вихрей, в первую очередь рингов. Во-вторых, это создание процедур анализа циркуляции внутри выделенного объекта и алгоритмов оценки схожести геометрии отслеживаемого вихря по последовательности композиционных карт.

Работа поддержана грантом РФФИ № 08-07-00227 и грантами ДВО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексанин А.И., Алексанина М.Г.* Автоматическое выделение вихрей по спутниковым ИК-изображениям // Тр. Всерос. конф. Современные проблемы дистанционного исследования Земли из космоса. 11–13 ноября 2003. М.: ИКИ РАН, 2004. С. 382–386.
- Алексанин А.И., Алексанина М.Г.* Спутниковое информационное обеспечение мониторинга океана на Дальнем Востоке / Исследования дальневосточных морей России. М.: Наука, 2007. Т. II. С. 607–641.
- Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Булатов Н.В., Гербек Э.Э.* Методические аспекты выделения вихрей по спутниковым и судовым измерениям // Изв. ТИПРО. 1997. Т. 122. С. 2–11.
- Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Горин И.И.* Спутниковые ИК-изображения водной поверхности: от термических структур к полю скоростей // Исслед. Земли из космоса. 2001. № 2. С. 7–15.
- Алексанин А.И., Загумёнов А.А.* Автоматическое выделение вихрей океана и расчет их формы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под ред. Лупяна Е.А., Лавровой О.Ю. Вып. 5. Т. 2. М.: Азбука-2000, 2008. С. 17–21.
- Алексанин А.И., Еременко А.С.* Автоматический расчет траекторий тропических циклонов по данным геостационарных метеорологических спутников // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 5. С. 22–31.
- Алексанина М.Г.* Автоматическое выделение поверхностных структур океана по инфракрасным данным спутников NOAA // Исслед. Земли из космоса. 1997. № 3. С. 44–51.
- Бедрицкий А.И., Асмус В.В., Кровотынцев В.А., Лаврова О.Ю., Островский А.Г.* Спутниковый мониторинг загрязнения российского сектора Черного и Азовского морей в 2003–2007 гг. // Метеорология и гидрология. 2007. № 11. С. 5–13.
- Борисов С.Б., Монин А.С.* О корреляции температуры и течений в океане // ДАН. 1989. Т. 306. № 5. С. 1230–1233.
- Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С.* Синоптические вихри в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 512 с.
- Федоров К.Н.* Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
- Alexanin A.I., Aleksanina M.G., Herbek E.E., Ryabov O.* Scaling property estimation of thermal sea surface turbulent structures on NOAA IR-imagery // Proc. OCEANS'98. 28 September–1 October 1998. Nice, France. V. 2. P. 1000–1005.
- Aleksanin A.I., Aleksanina M.G.* Quantative analysis of thermal sea surface structures on NOAA IR-images // Proc. CREAMS'2000 Int. Symp. Vladivostok, Russia. 2001. P. 158–165.
- Aleksanin A.I., Aleksanina M.G.* Detection of Stable Synoptical Features of Sea Surface from a Series of Infrared Satellite Images // Pattern Recognition and Image Analysis. 2007. V. 17. № 4. P. 480–486.
- Castellani M.* Identification of eddies from sea surface temperature maps with neural networks // Int. J. Rem. Sens. 2006. V. 27. P. 1601–1618.
- Essen H.H.* Geostrophic surface current as derived from satellite SST images and measured by a land-based HF radar // Int. J. Rem. Sens. 1995. V. 16. № 2. P. 239–256.
- Fernandes A.M.* Study of the automatic recognition of oceanic eddies in satellite images by ellipse center detection – the Iberian coast case // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2009. V. 47. № 8. P. 2478–2491.
- Hai J., Xiaomei Ya., Jianming G., Zhenyu G.* Automatic eddy extraction from SST imagery using artificial neural network // Int. Archives Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. Beijing, 2008. V. XXXVII. Part B6b. P. 279–282.
- Gangopadhyay A., Robinson A.R., Haley P.J., Leslie W.J., Lozano C.J., Bisagni J.J., Yu Z.* Feature Oriented Regional Modeling and Simulation (FORMS) in the Gulf of Maine and Georges Bank // Contin. Shelf Res. 2003. V. 23. № 3–4. P. 317–353.
- Lemonnier B., Delmas R., Lopez C., Duporte E.* Multiscale analysis of shapes applied to thermal infrared sea images // Proc. Ocean'94 OSATES. 13–16 September 1994. Brest, France. V. 3. P. III.319–III.322.

## The Problems of Automatic Ocean Eddy Detection on Satellite IR-Imagery

A. I. Alexanin, A. A. Zagumyonov

*Institute for Automation and Control Processes,  
Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok*

The sea surface composed charts of thermal structures as the charts of dominant orientation of thermal contrasts (DOTC) allow getting information about surface circulation regularly. High correlation between dominants and flow directions allow using theirs for water eddy identification. A new algorithm for automatic identification of the eddies as arbitrary closed circulations is proposed. The algorithm consist of the three procedures: eddy identification and its center, size and shape computation; eddy contour construction on the base of minimization the DOTC passing through the contour; the analysis of the contours constructed and screening the false detected objects. The main problem of the automatic eddy detection – ability of the false detected objects – is considered. The filtration algorithms are proposed, their effectiveness is presented and the opportunity of automatic eddy retrace on a temporary chart sequence is estimated. The algorithm has been tested on two month consequence of DOTC charts composed of Okhotsk sea region under heavy cloudy conditions of observations.

**Keywords:** sea eddies, satellite images, automatic detection, thermal contrast orientations