

Автоматическое выделение вихрей океана и расчет их формы

А.И. Алексанин, А.А. Загуменнов

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,
690041, Владивосток, ул. Радио, 5, e-mail: aleks@satellite.dvo.ru*

Композиционные карты термических структур поверхности моря в форме доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК) позволяют получать регулярно информацию о структурных элементах поверхности. Высокая корреляция доминант с направлениями течений позволяет их успешно использовать для идентификации вихрей воды. Предложен новый автоматический алгоритм выделения вихрей моря, выделяющий произвольные замкнутые циркуляции. Алгоритм состоит из трех процедур: идентификация с расчетом начального приближения контура вихря; построение контуров вихря на основе минимума величины "протекания" ДОТК через контур; анализ получившихся контуров и отбраковка ложных выделений. Алгоритм апробирован на двухмесячной серии композиционных карт ДОТК Курильского района.

Работа поддержана грантами РФФИ № 06-01-96915, № 06-01-00660 и грантами ДВО РАН.

Введение

Автоматическая идентификация вихрей, оценка положения центра вихря и его формы является важной задачей анализа структуры моря. Визуально-ручное дешифрирование спутниковых ИК-изображений трудоемко, субъективно и затруднительно в сложных облачных условиях [1, 2]. Имеются лишь единичные примеры создания методов автоматического или полуавтоматического мониторинга синоптических объектов моря по одиночным спутниковым инфракрасным изображениям, не получивших широкого распространения на практике. В силу важности этой задачи в Европе осуществлен международный проект SOFOCCLE и запланирован новый проект SCOOBIDOO для ее решения. Согласно публикациям [3, 4], в настоящее время удастся добиться высокой достоверности выделения вихрей. Но при этом всегда выделяется значительное количество ложных объектов, эффективность распознавания которых невысока. При этом не оцениваются некоторые ключевые параметры вихрей – точное положение центра, форма вихря и его размер.

На спутниковых ИК-изображениях объекты океанской циркуляции – вихри, струи и фронты ярко проявляются в поле поверхностных температур. Конкретный вид термической структуры определяется сдвиговым характером течений – изменчивостью скорости поперек потока. Это приводит к вытягиванию термических контрастов вдоль потока. Этот факт лежит в основе ручного дешифрирования спутниковых изображений. На этом явлении основан разработанный метод выделения термических структур поверхности океана на основе ориентированных текстур [5-7]. Метод заключается в определении доминантной ориентации термического контраста (ДОТК) в некоторой окрестности точки поля. Для ИК изображений поверхности океана доминантная ориентация термического контраста (ДОТК) является касательной к статистически значимой изотерме в заданной окрестности точки поля. Высокая корреляция доминантных ориентаций термических контрастов с направлениями поверхностных течений позволила создать первые версии алгоритмов автоматического выделения вихрей с оценкой параметров на основе аналитической модели функции тока вихря [8, 9]. Их эксплуатация показала, что аппроксимация формы вихря эллипсоидом не всегда является эффективной при выделении объектов. Отказ от заданной модели циркуляции лег в основу создаваемого нового алгоритма.

Алгоритм выделения вихрей

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 ба-

зируется на построении замкнутых контуров вихря на основе минимизации "протекания" ДОТК сквозь контур и величины этого протекания. Это позволяет выделять произвольную конфигурацию замкнутой циркуляции, а также локализовать фронты, если циркуляцию разомкнуть.

Алгоритм поиска вихрей заданного характерного размера:

1) Используя ориентации термических контрастов как направления скоростей, ищем центры вихрей на основе модели замкнутой циркуляции. Удаление близких по пространству центров.

а) Для $\forall X_i=(x_i, y_i)$ точки изображения, рассматриваемой как потенциальный центр вихря, для каждого из K секторов вычисляется

$$\min \delta_k = 1/N \sum \|D_j - DM_j\|, \quad J: \|X_i - X_j\| < R_0, \quad j=1, N.$$

D_0, D'

D_j - ДОТК в точке X_j , DM_j - модельная оценка ДОТК в секторе (линейная модель роста угла ДОТК в секторе), R_0 - заданный характерный размер вихря.

$$DM_j = D_0 + D' \varphi_j, \quad \varphi_j = \arctg(x_j - x_i, y_j - y_i).$$

б) Критерии отбора:

$$\sum \delta_k < \varepsilon$$

$$D'_k > 0 \text{ for } \forall k$$

2) Построение начального приближения вихря – грубый расчет внешней границы и отбраковка ложных выделений. Построение контура ядра вихря с уточнением его центра и отбраковка ложных выделений.

В каждом секторе наращиваем (либо уменьшаем) его размер R до тех пор, пока

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

Рассчитываем контур ядра вихря на основе минимизации протекания сквозь него ДОТК. Уточняем центр вихря.

3) Расчет внешней границы вихря. Получившийся контур ядра вихря увеличиваем в размерах, смещая его точки вдоль лучей, проходящих через центр, до достижения новым контуром максимально допустимой величины протекания.

Алгоритм построения контура вихря

Алгоритм является итерационным и сходящимся за конечное число шагов. Вход – начальный контур и центр вихря. Протекание рассчитывается на основе величины синусов углов между направлениями ДОТК и направлениями отрезков контура. Реализованы 2 критерия расчета протекания - стандартное отклонение (метрика L2) и средний модуль (метрика L1) протекания.

Шаг 1. Расчет протекания доминант через каждый отрезок контура и выбор точки, смещение которой вдоль луча, проходящего через центр и точку, даст максимальное уменьшение протекания. 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 качества протекания через новые отрезки не выполняется, то переход на шаг 1.

Шаг 4. Анализ получившегося контура, уточнение центра вихря и отбраковка объекта, если контур не похож на контур вихря, либо величина протекания велика.

На рисунке 1 приведены примеры некоторых этапов работы алгоритма поиска вихрей с характерным размером в 40 км. Первоначально поиск вихря велся на основе расчетов когерентности доминант в 6 секторах. Выбраны произвольно 7 объектов. В таблице 1 приведены характеристики контуров ядра каждого объекта.

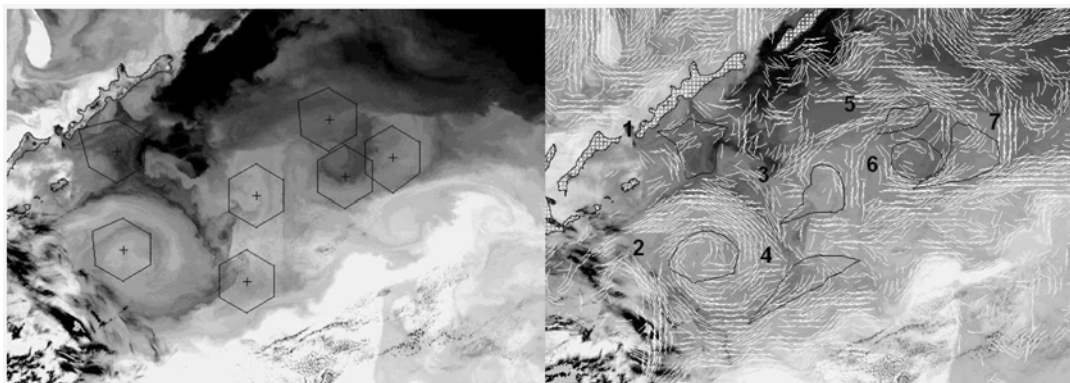


Рис. 1. Начальные приближения контуров некоторых объектов и полутоновое изображение (слева); положения контуров после проведения процедуры оптимальной подгонки и карта термических структур (справа). Метрика L2, район Курильских островов

Таблица 1. Характеристики "протекания" (объекты 2, 3, 6 - вихри, 7 - "спорный")

№ объекта	Средний модуль протекания на единицу длины контура	Средняя величина протекания на единицу длины контура	Примечание
1	0.474	0.039	антициклон
2	<u>0.364</u>	<u>-0.229</u>	циклон
3	<u>0.519</u>	<u>-0.018</u>	
4	0.505	-0.193	
5	0.495	-0.037	
6	<u>0.448</u>	<u>-0.175</u>	антициклон
7	0.505	-0.074	

Следует отметить, что величину протекания через контур можно использовать для идентификации вихря и его знака закрутки [6]. Оптимальный контур в вихре обычно располагается в зоне больших скоростей вихря. Получившаяся форма контура объектов является хорошим индикатором распознавания вихрей.

Оценка эффективности автоматического обнаружения вихрей

Для исследования была взята двухмесячная серия пятидневных композиционных карт ДОТК за сентябрь-октябрь 2006 года, район Курильских островов. Для большинства исходных однодневных спутниковых изображений было характерно наличие облачности, занимающей более половины изображения. В качестве тестовых структур во всей серии были выбраны 70 визуально различных характерных вихря. Это не означает, что на изображениях были идентифицированы все вихри, так как при ручном дешифрировании по одиночному изображению возможны ошибки при идентификации вихрей. Тестовые вихри различны по своей структуре, размерам, характеру закрутки, контрастности, открытости от облачности.

В данном эксперименте по каждой композиционной карте ДОТК алгоритмом при разных параметрах были рассчитаны точки- претенденты на центры вихрей (табл. 2). Поиск велся по трем характерным размерам вихрей с радиусами окрестности расчета – 20, 40 и 60 точек (точка – 1,1 км). Также брались различные критерии согласованности модельных и реальных доминант в секторе с параметрами согласованности $\sigma_D - 0.001$ и 0.01 . σ_D - критерий когерентности доминант в секторе с доминантами линейной модели роста угла.

Отслеживались следующие показатели:

- процент выделенных тестовых вихрей для заданных параметров поиска;
- общий процент выделенных тестовых вихрей для двух и для всех трёх радиусов (при выделении хотя бы одним радиусом) для разных σ_D ;

- общее количество выделенных объектов каждым радиусом (в основном это не вихри);
- процент выделенных тестовых вихрей от общего количества выделенных вихрей.

Таблица 2. Результаты автоматического выделения вихрей при различных параметрах алгоритма

σ_D	Радиус	Выделено		%	
		Тестовых	Всего	От тестовых	От всех
0.001	20	0	19	0,00	0,00
	40	38	250	54,29	15,20
	60	46	300	65,71	15,33
	40 и 60	33	-	47,14	-
	все	52	-	74,29	-
0.01	20	51	1210	72,86	4,21
	40	65	842	92,86	7,72
	60	63	596	90,00	10,57
	40 и 60	58	-	82,86	-
	все	70	-	100,00	-

Результаты показывают, что при определенных настройках алгоритма выделяются все вихри. Очень велик процент вихрей, которые выделяются при поиске с разными радиусами одновременно, что может служить индикатором при отсеивания ложных объектов.

При разработке алгоритма использовались следующие положения. На стадии выделения алгоритм должен свести к минимуму пропуск вихрей. В дальнейшем используются различные критерии отбраковки ложных объектов. Помимо перечисленных критериев отбраковки тестировались критерии, основанные на отношении площади контура к его длине и анализ величин абсолютного и относительного протекания через отдельные участки контура вихря. Апробация этих критериев показала, что количество ложных объектов уменьшается во много раз, но не исчезает совсем. Наиболее эффективный критерий отбраковки основан на временной стабильности центра и формы идентифицированного вихря. Процедура построения контура вихря приобретает в алгоритме решающее значение, так как позволяет уточнять эти параметры вихря.

Поскольку океан – это плотная упаковка поверхностных вихрей разного масштаба и разного времени жизни, то говорить о выделении всех вихрей не приходится. Речь может идти лишь о долго живущих синоптических вихрях определенного масштаба, существование которых можно подтверждать прямыми измерениями и/или долговременными наблюдениями. Поэтому для верификации и настройки алгоритмов был создан комплекс программ автоматического мониторинга вихрей в морях Дальнего востока России в рамках развития Центра коллективного пользования регионального спутникового мониторинга ДВО РАН. Анализ результатов запланированного годового эксперимента должен позволить настроить алгоритмы оптимальным образом и создать процедуру оценки вероятности правильной идентификации вихрей.

Литература

1. Булатов Н.В., Куренная Л.А., Муктепавел Л.С. и др. Вихревая структура вод южной части Охотского моря и ее сезонная изменчивость (результаты спутникового мониторинга) // *Океанология*, 1998. Т. 38. №6. С. 1-10.
2. 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.
3. Essen H.H. Geostrophic surface current as derived from satellite SST images and measured by a land-based HF radar // *International Journal of Remote Sensing*, 1995. V.16. №2. P. 239-256.

4. *Gangopadhyay, A., A.R. Robinson, P.J. Haley, W.J. Leslie, C. J. Lozano, James J. Bisagni, and Z. Yu.* Feature Oriented Regional Modeling and Simulation (FORMS) in the Gulf of Maine and Georges Bank // *Cont. Shelf Res.*, 2003. 23(3-4). P. 317-353.
5. *Алексанина М.Г.* Автоматическое выделение поверхностных структур океана по инфракрасным данным спутников NOAA // *Исследование Земли из космоса*, 1997. №3. С. 44-51.
6. *Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Горин И.И.* Спутниковые ИК-изображения водной поверхности: от термических структур к полю скорости // *Исследование Земли из космоса*, 2001. №2. С. 7-15.
7. *Aleksanin A.I., M.G. Aleksanina.* Detection of Stable Synoptical Features of Sea Surface from a Series of Infrared Satellite Images // *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2007. Vol. 17. No. 4. P. 480-486.
8. *Aleksanin A.I., M.G. Aleksanina.* Quantative analysis of thermal sea surface structures on NOAA IR-images // *Proc. CREAMS'2000 Int.Symp. Vladivostok, Russia*, 2001. P. 158-165.
9. *Алексанин А.И., Алексанина М.Г.* Автоматическое выделение вихрей по спутниковым ИК-изображениям // *Сборник научных статей "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса"*. М.: ООО "Полиграф сервис", 2004. С. 382-386.