

# **МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ**

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ ВЫДЕЛЕНИЕ ВИХРЕЙ ПО СПУТНИКОВЫМ ИНФРАКРАСНЫМ (ИК) ИЗОБРАЖЕНИЯМ

*А.И. Алексанин, М.Г. Алексанина*

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН  
E-mail: alexs@iacp.vl.ru, alexs@satellite.dvo.ru*

На спутниковых инфракрасных (ИК) изображениях синоптические вихри поверхности океана выглядят как характерные термические структуры, которые можно выделять на основе поля доминантной ориентации термического контраста (ДОТК). По сути ДОТК является статистически значимой касательной к изотерме в некоторой окрестности точки. Высокая степень корреляций ДОТК с направлениями векторов поверхностных течений, стабильность ДОТК в течение нескольких дней позволяют в сложных облачных условиях выделять синоптические вихри и определять их параметры по композиционным ДОТК.

Задача построения композиционных полей ДОТК рассматривалась на примере Курьинского района в Охотском море как наиболее облачного и динамичного. Высокая степень совпадения доминантных ориентаций термических контрастов с направлениями поверхностных течений позволила создать алгоритм автоматического выделения вихрей с оценкой параметров на основе аналитической модели вихря. Модель характеризуется следующими параметрами: положение центра вихря, размер, границы вихря и положение зоны максимальных скоростей.

Задача автоматического выделения объектов океанской циркуляции — вихрей, струй и фронтов в поле поверхностных температур — и оценка их пространственных и динамических параметров является актуальной для спутникового мониторинга термодинамических процессов на поверхности океана. Для визуализации вихрей и фронтов океана по спутниковым ИК-изображениям морской поверхности в мировой практике используется технология нефанализа. В основе нефанализа лежит поиск и отрисовка оператором границ струйно-вихревых образований. Эта процедура субъективна и трудоемка, особенно при выделении мезомасштабных и слабоконтрастных особенностей изображения. Существенным недостатком ручного дешифрирования является то, что такой подход не дает возможности для дальнейшего автоматического анализа и количественной обработки выделенных объектов.

В основе нефанализа лежит вытягивание изотерм вдоль направления течения. Многие авторы отмечали это свойство и даже пытались оценить характеристики скоростей поверхностных течений по температурному полю [1, 2]. Конкретный вид термической структуры на поверхности океана определяется сдвиговым характером течений [3]. Поэтому направления изотерм можно использовать как некоторые оценки направлений течений. На этой основе авторами был создан и исследован метод построения карт термических структур поверхности океана на основе доминантной ориентации термического контраста (ДОТК) [4–6]. ДОТК — это угол статистически значимой касательной к изотермам в заданной окрестности точки поля. Карта ДОТК — это карта направлений касательных, углы которых лежат в диапазоне  $(0-\pi)$ .

Доминантные ориентации термических контрастов (ДОТК) не только позволяют надежно визуализировать термические структуры на поверхности океана, но и обладают свойствами, важными для их физической интерпретации [3]. Сравнения с полем скоростей поверхностных течений показали, что направления скоростей поверхностных течений и доминантных ориентаций термических контрастов имеют высокие коэффициенты корреляции [5, 6]. Чем выше скорости, тем выше коэффициенты корреляций. Поэтому ДОТК можно использовать как оценки направлений скоростей. Наклон термических контрастов можно использовать не только для оценки направления течения, но иногда и для расчета

положения зоны максимальных скоростей [6]. ДОТК обладают определенной пространственно-временной устойчивостью, что существенно для восстановления полной картины процессов циркуляции на поверхности океана в сложных облачных условиях. Исследования показали, что пространственно-временное осреднение выделяет ДОТК, связанные с основными синоптическими объектами — вихрями и фронтами. Анализ временной изменчивости композиционных карт позволяет оценить их «время жизни», т. е. интервал времени, когда с заданной вероятностью изменчивость ДОТК будет лежать в пределах заданной точности. «Время жизни» доминант оказалось пропорциональным их статистической значимости. Так, для серии изображений Курильского района Охотского моря [7] эксперименты показали, что, если задана точность доминант  $\pi/6$ , т. е. менее 0,5 рад, то в течение 15 дней можно доверять ДОТК со статистической значимостью  $> 0,8$ . Для пятидневного интервала годятся ДОТК со статистической значимостью  $> 0,6$ .

### Автоматическое выделение вихрей

Проблеме оценки пространственных характеристик вихрей поверхности океана по различным типам измерений посвящено значительное количество работ и в некотором приближении эту задачу можно рассматривать как решенную. Основная сложность — это автоматическое нахождение центров вихрей и начального приближения параметров формы. В работе [8] приведена первая версия такого алгоритма. Ее эксплуатация позволила усовершенствовать процедуру расчета центров, создать процедуры отбора перспективных точек — начальных приближений центров и расчета начального приближения параметров формы вихрей, а также наметить пути развития класса малопараметрических аналитических моделей формы, на основе которых и строится процедура выделения вихрей. В настоящее время алгоритм автоматического выделения вихрей по композиционным картам доминантных ориентаций состоит из следующих шагов.

#### Расчет начального приближения центра вихря

Основу процедуры составляет круговая модель вихря. Если рассматривать доминантные ориентации как оценки скоростей поверхностных течений, то пересечение ортогоналей к доминантам будет точкой центра вихря  $X_0 = (x_0, y_0)$ . Алгоритм находит площадку с центром в точке  $X = (x, y)$  радиуса  $R$  такую, что рассогласование между  $X_0$  и  $X$  минимально:

$$\min_{x_0, y_0} \frac{1}{N} \sum W_i (r'_i, d_i)^2, \quad (1)$$

где  $i$  —  $\|X_i - X_0\| \leq R$ ,  $X_i = (x_i, y_i)$ ,  $W_i$  — весовые коэффициенты для  $N$  точек площадки,  $r'_i = (x_i - x_0, y_i - y_0)$ ,  $d_i = (\cos \Theta_i, \sin \Theta_i)$ ,  $(r'_i, d_i)$  — скалярное произведение,  $\Theta_i$  — угол ДОТК.

Из условия оптимальности для (1) следует:

$$\begin{aligned} x_0 &= (\gamma S_2 - \beta S_1) / (\gamma^2 - \xi \beta), & y_0 &= (\xi S_2 - \gamma S_1) / (\gamma^2 - \xi \beta), \\ \xi &= \sum W_i \sin^2 \Theta_i, & \gamma &= \sum W_i \sin \Theta_i \cos \Theta_i, & \beta &= \sum W_i \cos^2 \Theta_i, \\ S_1 &= \sum (x_i W_i \sin^2 \Theta_i - y_i W_i \sin \Theta_i \cos \Theta_i), \\ S_2 &= \sum (x_i W_i \sin \Theta_i \cos \Theta_i - y_i W_i \sin^2 \Theta_i). \end{aligned}$$

Условие обнаружения:

$$\|X - X_0\| < \delta.$$

*Критерий «качества»* — рассогласование доминант с круговой моделью циркуляции:

$$f_Q = \sum W_i (\Delta\Theta_i - \pi/4) < 0, \text{ где } \Delta\Theta_i = \left| \arccos \frac{-\sin \Theta_i (x_i - x_0) + \cos \Theta_i (y_i - y_0)}{\|r'_i\|} \right|.$$

*Критерий отбора точек* — точка считается точкой начального приближения вихря, если в заданной окрестности от нее нет другой рассчитанной точки с лучшим критерием качества.

#### **Оценка начальных параметров вихря и расчет их оптимальных величин**

*Эллиптическая модель вихря.* При проведении расчетов для описания функции тока в вихре используется следующая малопараметрическая аналитическая модель, параметры которой подбираются оптимизационной процедурой:

$$r = \{[(x - x_0)\cos \alpha + (y - y_0)\sin \alpha]\varepsilon + [-(x - x_0)\sin \alpha + (y - y_0)\cos \alpha]\}^{1/2} \quad 0 \leq r \leq R. \quad (2)$$

Параметры модели —  $G = \{x_0, y_0, R, \varepsilon, \alpha\}$ , где  $(x_0, y_0)$  — центр вихря;  $R$  — характеристика размера;  $\varepsilon$  — эксцентриситет;  $\alpha$  — угол наклона большой оси эллипса.

*Расчет модельных параметров.* Для этих целей методами нелинейного программирования решается следующая оптимизационная задача:

$$\min_G f_Q + f_S, \quad (3)$$

где  $f_Q = \sum W_i (\Delta Q_i^* - \pi/4)$ ,  $0 < \|r_i\| < R$ ;  $f_S = \max[0, \sum W_i (\pi/4 - \Delta\Theta_i)]$ ,  $R < \|r_i\| < 1,5R$ .  
 $\Delta\Theta_i^* = \min(|\Theta_i^* - \Theta_i|, |\pi - \Theta_i^* + \Theta_i|)$ ,  $\Theta_i^*$  — угол касательной к эллипсу в точке  $(x_i, y_i)$ .

В целевой функции (3)  $f_Q$  — критерий качества эллиптической модели,  $f_S$  — штрафная функция для корректного вычисления границы вихря.

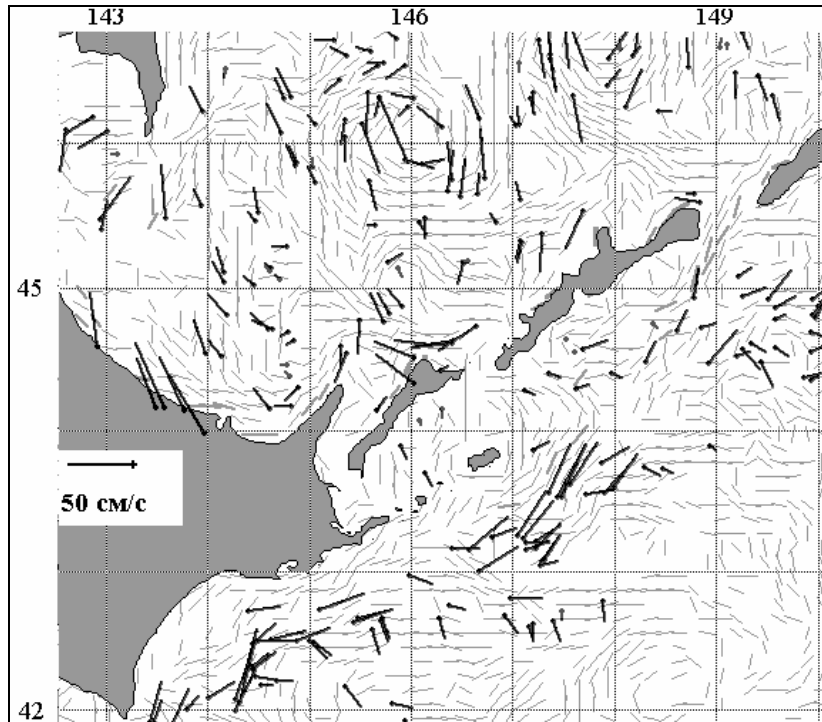
Перед началом оптимизационной процедуры работает эвристическая программа предварительной оценки параметров  $\{R, \varepsilon, \alpha\}$ . В предположении, что центр вихря оценен правильно, для каждого сектора круговой модели рассчитывается граница вихря по критерию  $f_S$  (размер сектора нарастает до тех пор, пока критерий не станет положительным). На основе размеров секторов рассчитываются начальные оценки параметров размера и формы эллипсоидальной модели ( $G$ ).

### **Эксперименты и результаты**

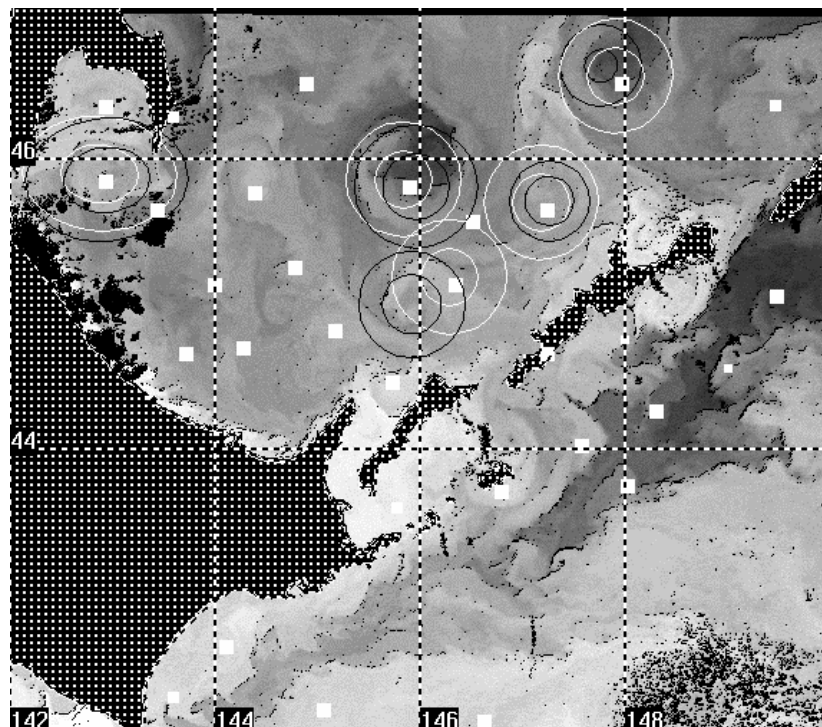
На рис. 1 и 2 представлены результаты проведенных экспериментов. На рис. 1 приведена карта спутниковых оценок скоростей поверхностных течений за 10.10.95 г., рассчитанная методом морских маркеров (feature tracing), совмещенная с картой термических структур.

На рис. 2 приведено полутоновое изображение за это же число и нанесены результаты работы алгоритма автоматического выделения вихрей. Были выбраны пять вихрей, которые легко прослеживаются как по полутоновому изображению, так и по картам скоростей. Следует отметить, что центры всех крупных вихрей, присутствующих на изображении, успешно выделились. Критерии выделения вихрей подобраны так, чтобы не пропустить основные вихри, форма которых может быть далекой от круговой. Поэтому наблюдаются присутствие центров мелких неоднородностей с циркуляцией, похожей на круговую, и точки, которые нельзя рассматривать как центры вихрей. Такие точки проходят

отбраковку на стадии оценки параметров вихря. Обычно уже на стадии оценки размера вихря по критерию  $f_s$  происходит уменьшение размера до незначительного.



**Рис. 1.** Скорости поверхностных течений за 10.10.1995 г. (Южные Курилы), полученные методом морских маркеров, и карта доминантных ориентаций термических контрастов — ДОТК



**Рис. 2.** Полутоновое ИК-изображение и результаты работы алгоритма автоматического выделения вихрей. Белые квадратики — начальные приближения центров вихрей. Внешние эллипсы — границы вихрей: белые — оценка в первом приближении; черные — оценка с оптимизацией

«Схлопывание» размера вихря может происходить и при оптимизационном уточнении его параметров. Так, например, оптимальный подбор параметров самого южного вихря иногда значительно перемещал центр вихря и приводил к размеру, близкому к нулю. Это зависело от точности настройки параметров метода оптимизации и объяснялось удаленностью начального приближения центра от реального его положения. Видимо, в подобном случае требуется учитывать пространственное положение всех точек-претендентов на то, чтобы быть центром вихря, а не ограничиваться только одной наилучшей. Что касается формы и размеров вихрей, то в целом наблюдается хорошее соответствие с оценками ручного дешифрирования. Можно говорить о завышении или занижении размера вихря в том или ином случае. Однако для количественного сравнения параметров необходимы детальные «квазимгновенные» судовые измерения, которые бывают крайне редко.

### Заключение

Алгоритм автоматического выделения вихревых структур по композиции доминантных ориентаций термических контрастов, рассматриваемым как оценки направлений векторов скоростей течений, позволяет выделять центры развитых синоптических вихрей на поверхности океана и оценивать параметры их формы и размера. Дальнейшее развитие метода предполагает уточнение рамок его применимости и развитие моделей синоптических объектов.

Работа поддержана грантами ДВО РАН и РФФИ № 03-01-00812, 02-01-01133.

### Литература

1. Борисов С.Б., Монин А.С. О корреляции температуры и течений в океане // ДАН. 1989. Т. 306. № 5. С. 1230–1233.
2. Essen H.H. Geostrophic surface current as derived from satellite SST images and measured by a land-based HF radar // Intern. J. of Remote Sensing. 1995. V. 16. N 2. P. 239–256.
3. Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 512 с.
4. Алексанина М.Г. Автоматическое выделение поверхностных структур океана по инфракрасным данным спутников NOAA // Исслед. Земли из космоса. 1997. № 3. С. 44–51.
5. 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 Sept. – 1 Oct. 1998. Nice, France. V. 2. P. 1000–1005.
6. Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Горин И.И. Спутниковые ИК-изображения: от термических структур к полю скоростей // Исслед. Земли из космоса. 2001. № 2. С. 7–15.
7. Алексанин А.И., Алексанина М.Г. Исследование композиционных полей термических структур на поверхности океана в облачных условиях по спутниковым данным NOAA // Солнечно-земная физика. Изд. СОРАН, 2003. Вып. 5.
8. Alexanin A.I., Alexanina M.G. Quantitative analysis of thermal sea surface structures on NOAA IR-images // Proc. CREAMS'2000. Intern. Symp. Vladivostok, Russia, 2001. P. 158–165.