

# Мониторинг термических структур поверхности океана по данным ИК-каналов спутников NOAA на примере Прикурильского района Тихого океана

А.И. Алексанин, М.Г. Алексанина

*Институт Автоматики и процессов управления ДВО РАН,  
690041, Владивосток, Радио 5  
E-mail: [aleks@satellite.dvo.ru](mailto:aleks@satellite.dvo.ru)*

Показана возможность построения по спутниковым ИК (инфракрасным) изображениям как среднемесячной, так и среднегодовой циркуляции поверхности океана в сложных погодных условиях (облачность, туман, лёд) в виде композиционных карт термических структур. Термические структуры поверхности океана выделяются на основе метода ориентированных текстур – определения доминантной ориентации термического контраста (ДОТК) в некоторой окрестности точки поля и метода интегральных кривых (линий тока), построенных по полю ДОТК. Наиболее устойчивые во времени поля доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК) и построенные по ним плотности интегральных кривых связаны с положениями стационарных синоптических объектов – геострофическими течениями и орографическими вихрями, присущими данной акватории.

## Введение

Мезомасштабные водные структуры, такие как вихри, ринги и меандры течений, являясь частью циркуляции океана, оказывают огромное влияние на перераспределение многих гидрологических и соответственно биологических параметров водных масс, что определяет важность получения пространственно-временной картины циркуляционных процессов на поверхности океана. Вопросам восстановления картины циркуляции на обширных акваториях посвящено достаточно много работ. Однако восстановление циркуляции производится в основном моделированием по данным динамических расчетов, а также по данным инструментальных судовых измерений, которые сами по себе являются локальными точечными измерениями. Представляет интерес возможность восстанавливать циркуляцию поверхности океана по последовательности изображений обширных акваторий на основе спутникового дистанционного зондирования, в частности, по данным ИК (инфракрасных) каналов метеорологических спутников NOAA, получаемым 5-8 раза в сутки.

## Методика построения термических структур поверхности океана по тепловым (ИК) каналам спутниковых данных

Для построения термической структуры поверхности океана по одиночным спутниковым ИК - изображениям используется метод расчета доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК) [1]. ДОТК представляют собой статистически значимые касательные к изотермам в заданной окрестности точки. Карта ДОТК – это карта направлений, углы которых лежат в диапазоне  $(0-\pi)$  (рис.1). Конкретный вид термической структуры на ИК- изображениях поверхности океана определяется сдвиговым характером течений [2]. Изотермы в таких потоках вытягиваются вдоль направления течения. Поэтому направления изотерм можно использовать как некоторые оценки направлений течений [2, 3]. Они пригодны и для автоматического выделения вихрей океана [4]. Независимость ДОТК от абсолютных значений градиентов тепловой радиояркости позволяет строить композиции различных пространственно-временных масштабов [5].

### *Построение композиционных полей ДОТК с оценкой их временной устойчивости*

Для построения временной композиции ДОТК с оценкой их устойчивости во времени (время жизни), используется следующий алгоритм [5]. В каждой точке карты анализируется временной ряд доминант

$D_{i,j}(t_k)$ ,  $k=1,K$  и рассчитываются средняя по времени доминанта  $D_{i,j}$  и средний модуль временной изменчивости  $D'_{i,j}$ . Оценка «времени жизни»  $T_{i,j}$  доминанты  $D_{i,j}$  определяется из неравенства

$$(D'_{i,j} + \varepsilon_{D'_{i,j}}) * T_{i,j} < \varepsilon_D, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_D$  - допустимая величина изменчивости средней доминанты,  $\varepsilon_{D'_{i,j}}$  - погрешность оценки  $D'_{i,j}$ , рассчитанная с учетом длины ряда (по Хёвдингу):

$$P_{i,j}(|D'_{i,j} - M(D'_{i,j})| > \varepsilon_{D'_{i,j}}) < P, \quad (2)$$

$P_{i,j}$  - вероятность того, что  $D'_{i,j}$  отклонится от своего математического ожидания  $M(D'_{i,j})$  больше, чем на величину  $\varepsilon_{D'_{i,j}}$ , а  $P$  - предельная допустимая вероятность. Неравенство Хёвдинга [6] является следствием неравенства Чебышева и позволяет сделать статистические оценки с учетом длины ряда. Для  $t$  таких, что  $0 < t_i < \tau$   $i=1,2, \dots, L$ , справедливо

$$P\left\{ \left| \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L t_i - Mt \right| > \varepsilon \right\} < 2 \exp(-2\varepsilon^2 L / \tau^2) \quad (3).$$

Отсчет  $T_{i,j}$  осуществляется от среднего времени доминант ряда и является оценкой снизу.

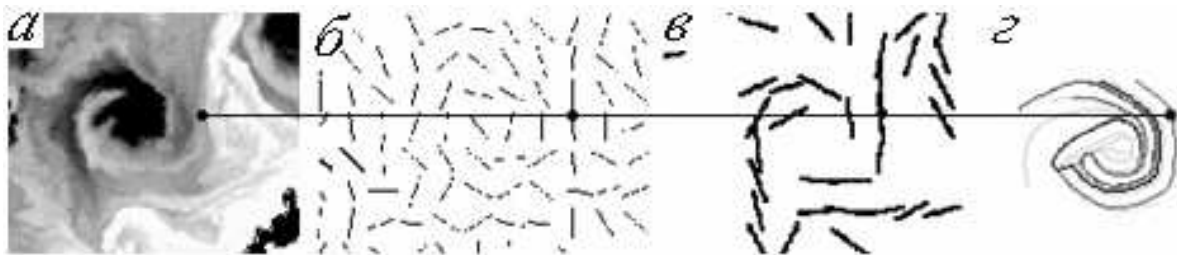


Рис. 1. Расчет поля термических структур (ДОТК) поверхности океана: (а) - поле термической яркости  $\{I_{ij}\}$ ; (б) - соответствующее (1) поле ориентаций термических контрастов  $\theta_{ij} = \varphi_{ij} - \pi/2 : \theta_{ij} \in [0, +\pi]$ , ортогональных градиентам яркости  $\{G_{ij}^{op}, \varphi_{ij} \in [-\pi, +\pi], (i,j) \in [a \times a]\}$ ; (в) - поле доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК)  $\Theta = f(\theta_{ij}) : (i,j) \in [b \times b]$ ; (г) - интегральные кривые, построенные по полю ДОТК, (параметрическое представление)  $x(t), y(t) : \operatorname{tg}(\Theta) = x'(t) / y'(t)$

### Пространственно-временная устойчивость ДОТК

Пространственно-временная композиция ДОТК тем устойчивее во времени, чем больше статистическая значимость ДОТК [5]. На рис.2 приведено ИК спутниковое изображение за 30.09.01, на которое нанесены композиционные ДОТК (белые отрезки), полученные за предшествующую неделю (22-26.09.01). Толстые линии соответствуют "выжившим" доминантам, чья изменчивость не превысила заданную точность  $\pi/4$  спустя неделю от времени композиционной карты. Можно заметить, что эти доминанты соответствуют структурам синоптического масштаба (вихри и основные струйные течения региона). Это объясняется тем, что данные структуры имеют значительное время жизни, медленно меняются и крупномасштабное движение доминирует над мелкомасштабной турбулентностью.

### Построение плотности интегральных кривых по ДОТК

Рассмотрим интегральные кривые, построенные по полю термических структур таким образом, что доминантная ориентация термического контраста к кривой является ее касательной, то есть поле ДОТК рассматривается как фазовое пространство (рис.3). В силу сдвигового характера течений касательные к изотермам указывают на зоны максимальных скоростей [2, 3], поэтому интегральные кривые будут концентрироваться в этих зонах. Строятся интегральные кривые следующим образом. Задается регулярная сетка, из каждой точки которой строится интегральная кривая заданной длины. Количественные оценки локальных величин «сгущения» интегральных линий проявляются как плотность линий. Яркость точки

изображения пропорциональна количеству интегральных кривых, прошедших через неё. Чем выше яркость, тем выше плотность интегральных линий тока.

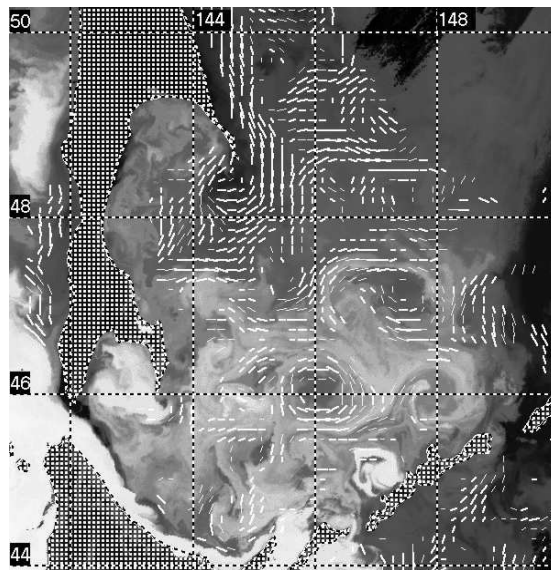


Рис. 2. ИК спутниковое изображение за 30.09.01 и композиционные ДОТК (белые отрезки), полученные за неделю (22-26.09.01). Толстые линии соответствуют "выжившим" композиционным доминантам, изменчивость которых не превысила  $\pi/4$  спустя неделю

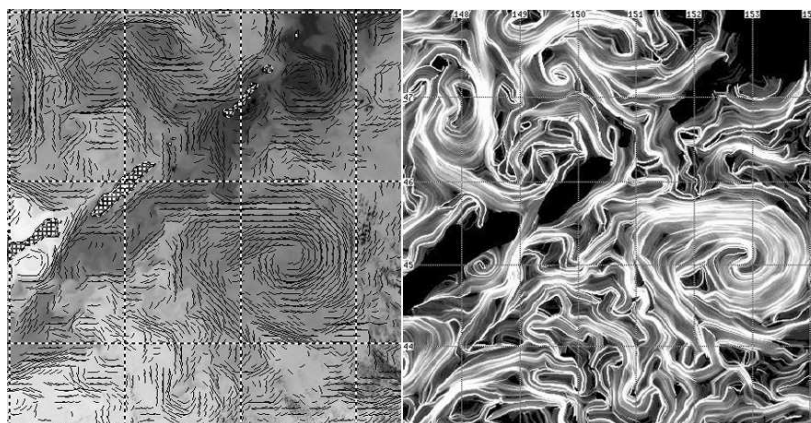


Рис. 3. Плотность интегральных кривых, построенных по полю ДОТК, как фазовом пространстве. Слева - фрагмент ИК- изображения, с наложенным на него полем ДОТК, а справа, соответствующее изображение плотности интегральных кривых – «линий тока». Яркость в точке пропорциональна количеству прошедших через неё интегральных кривых

### Используемые данные

Для годового мониторинга композиционных карт ДОТК был выбран Прикурильский район Тихого океана ( $141-160^\circ$  в.д.;  $41-52^\circ$  с.ш.), который характеризуется высокой термодинамической неустойчивостью, обусловленной зоной взаимодействия Курисио-Ойясио и Курило-Камчатского течений [7].

Была проанализирована временная серия инфракрасных спутниковых NOAA/AVHRR изображений с 1 мая по 30 ноября 2004 года, когда исследуемая акватория свободна ото льда. Для каждого изображения были построены поля доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК). По отдельным полям ДОТК были построены декадные и месячные композиции ДОТК с оценкой "времени жизни" каждой

доминанты. Композиции ДОТК сравнивались как между собой, так и с одиночными полями ДОТК. Также была построена годовая композиция как по отдельным полям ДОТК, так и по декадным и месячным.

### Результаты годового мониторинга ДОТК

Анализ мгновенных, декадных и месячных композиций ДОТК показал, что, практически всегда, месячная композиция позволяет получить полную картину циркуляции исследуемой акватории. Сравнение (рис. 4) месячных композиций ДОТК с месячными медианами температурной яркости показало, что, несмотря на привычность яркостного температурного поля и соответствие некоторых термических структур, композиция по абсолютным значениям температур (медиана, или среднее) вносит дополнительные искажения за счет высокой нестабильности абсолютных значений. Композиции поля ДОТК более структурированы, поскольку ДОТК улавливает только изменение абсолютной величины, но не само значение, описывает, фактически, положение контура объекта и не строится в районах с неустойчивым поведением контрастов яркости.

Внутригодовой анализ месячных композиций ДОТК показал установленную ранее сезонную изменчивость струйно-вихревых структур акватории вокруг Курильских островов [7]. Наиболее типичными в смысле сезонности (весна–лето; лето–осень; зима) являются композиции за май, октябрь и ноябрь. Именно на эти месяцы приходится более «сухая» атмосфера в регионе и выборки для получения композиции получаются более представительными. На фрагментах месячных композиций ДОТК (рис. 4.) видно, что в мае термические контрасты и структуры, практически, отсутствуют, что соответствует началу процессов формирования стратификации. Напротив, осенние месячные композиции показывают «обострение» температурных контрастов и установившуюся термическую структуру.

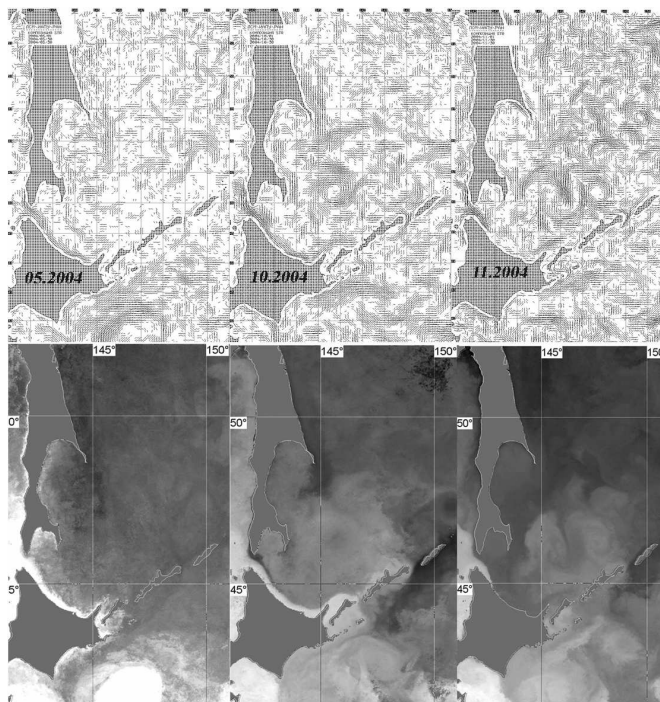


Рис. 4. Месячные композиции ДОТК (верхний ряд) и месячные медианы температуры (в яркости) (нижний ряд) за май, октябрь и ноябрь 2004 г. На осенних композициях по сравнению с майской композицией видно «обострение» термических контрастов. А сравнение октябрьской и ноябрьской композиций показывает перестройку течений (Соя) на зимний режим

На фоне сезонной изменчивости на месячных композициях ДОТК прослеживаются также и стационарные образования, которые соответствуют характерным для исследуемой акватории климатическим течениям – Восточно-Сахалинскому, Соя, Курильскому, частично, Субарктическому и орографическим вихревым образованиям в квадратах с центрами 146°с.ш.-46°в.д. и 154.5°в.д.-50.5°с.ш.. На фоне устойчивых структур имеются в некотором смысле «аномальные» струйно-вихревые образования, которые стабильны, как существующие, но плохо проявляются на пространственно-временной композиции, поскольку масштаб их перемещений сравним с характерным размером самих структур. Таким «аномальным» считается сильно меандрирующее течение Ойясио, обладающее мощным, но очень узким стрежнем, Субарктическое течение и антициклонический вихрь (А5) юго-восточнее пролива Буссоль. Сравнение с результатами работ [7], касающихся построения основных геострофических течений Прикурильского района по многолетним данным наблюдений (рис. 5) показало, что годовая (2004) композиция ДОТК выделила наиболее устойчивые струйно-вихревые структуры акватории, но не все. На годовой композиции ДОТК (рис. 6) проявились только фрагменты течений Ойясио и Субарктического фронта.

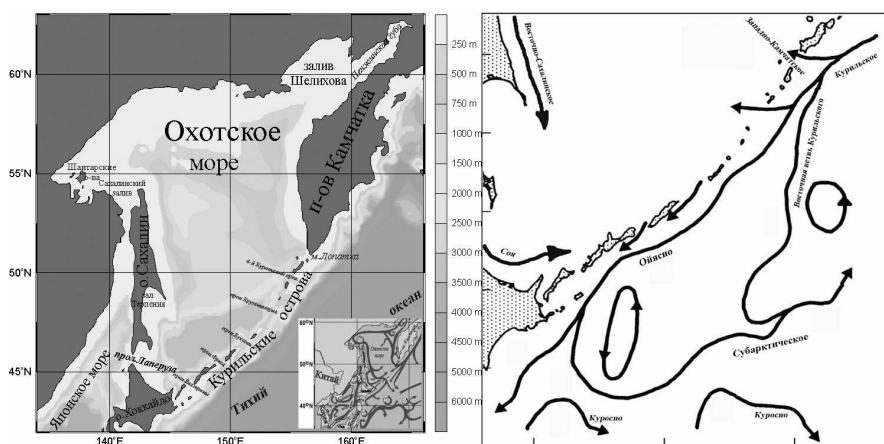


Рис. 5. Карта топографии дна и основных циркуляций Северо-западной части Тихого океана [[http://www.pacificinfo.ru/cdrom/2/HTML/5\\_00.htm](http://www.pacificinfo.ru/cdrom/2/HTML/5_00.htm)] (слева), а также схема циркуляции Прикурильского района [7] (справа)

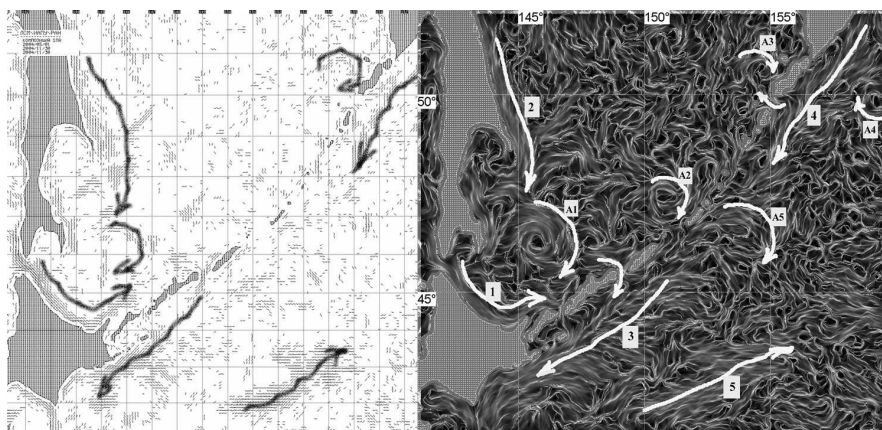


Рис. 6. Композиция ДОТК за 2004 год (слева) и соответствующая картина плотности интегральных кривых- «линий тока» (справа). Течения: 1 – Соя; 2 – Восточно-Сахалинское; 3 – Ойясио; 4 – Курило-Камчатское; 5 – Субарктическое

Однако плотности интегральных кривых, построенных по полю ДОТК, (рис. 6) на фоне мелкомасштабной пестроты очень чётко проявили почти все наиболее крупные и энергичные образования основных климатических течений -

1. течение Соя и его проникновение в проливы Екатерины и Кунаширский;
2. Восточно-Сахалинское течение;
3. течение Ойясио;
4. Курило-Камчатское течение;
5. участок Субарктического течения между 150-155 в.д.;

орографических антициклонических вихрей –

1. у южного Сахалина (А1) и
2. у северных Курильских островов (А3);

а также крупных антициклонических вихрей зон активного перемешивания –

1. у средних Курильских островов (А2),
2. восточнее северных Курильских островов (А4) и
3. восточнее средних Курильских островов (А5).

### Заключение

Анализ полученных результатов показал, что композиционные поля доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК) позволяют восстанавливать общую картину устойчивых во времени и пространстве струйно-вихревые структур на поверхности океана, как в течение месяца, так и года. Наиболее устойчивые доминанты и построенные по ним плотности интегральных кривых – «линии тока» связаны с положениями основных синоптических объектов - геострофическими течениями и орографическими вихрями, присущими данной акватории.

Работа поддержана грантами РФФИ №04-07-930, №04-01-00683 и грантами Президиума ДВО РАН.

Выражаем благодарность сотрудникам Лаборатории космических методов исследования океана ТИНРО - Центра (Владивосток) Е.В. Самко и Н.В. Булатову за обсуждение и интерпретацию полученных результатов.

### Литература

1. *Алексанина М.Г.* Автоматическое выделение поверхностных структур океана по инфракрасным данным спутников NOAA // Исследование Земли из космоса, 1997. №3. С.44-51.
2. *Александрин А.И., Алексанина М.Г., Горин И.И.* Спутниковые ИК-изображения: от термических структур к полю скоростей // Исследование Земли из космоса, 2001. №2. С.7-15.
3. *Alexanin A.I., Alexanina M.G.* Quantitative analysis of thermal sea surface structures on NOAA IR-images // Proc.CREAMS'2000 Int. Symp., Vladivostok, Russia, 2001. P.158-165.
4. *Александрин А.И., Алексанина М.Г.* Автоматическое выделение вихрей по спутниковым ИК-изображениям // Материалы Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного исследования Земли из космоса», Москва, 11-13 ноября, 2003. М: ИКИ РАН. 2004. С.382-386.
5. *Aleksanin and M. G. Aleksanin.* Detection of Stable Synoptic Structures of Ocean Surface on Satellite IR Images//Pattern Recognition and Image Analysis, Vol. 15, No. 2, 2005, pp. 487–489.
6. *Ванник В., Глазкова Т., Коцеев В., Михальский А., Червоненкис А.* Алгоритмы и программы восстановления зависимостей // М. Наука, 1984. 815 с.
7. *Самко Е.В., Новиков Ю.В.* Среднеголетняя геострофическая циркуляция вод Прикурильского района Тихого океана // Океанология, 2003. Т.43. №6. С.1-7.