

УДК 551.466.6

В.Р. Фукс¹

О ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ ПОЛОЖЕНИЯ ФРОНТАЛЬНЫХ ЗОН В ОКЕАНЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Спутниковая океанография открывает новые возможности в описании пространственно-временной изменчивости фронтов в широком диапазоне масштабов. В работе предпринята попытка формализовать понятия, связанные с этой проблемой, с целью выделения фронтальных зон и фронтальных разделов по данным спутниковых измерений. Фронтальная зона представляется как зона конвергенции потоков, а линия максимальной конвергенции потоков в этой зоне принимается за фронтальный раздел или фронт. По данным спутниковой альтиметрической информации выделяются динамические фронты на поверхности океана, по спутниковым данным о температуре поверхности воды выделяются термические фронты. Примеры подобных оценок приводятся для Японского моря.

Следует признать, что понятие океанологический фронт до сих пор не установилось, у разных авторов отмечаются существенные различия как в гидродинамической интерпретации этого термина, так и в методах выделения фронтальных зон и разделов по данным натурных измерений [1-7].

Одни авторы в качестве основного критерия выделения фронта принимали высокие горизонтальные градиенты гидрологических характеристик [8-10], другие – выделяли фронт по динамическим признакам [11] (градиенты в поле скоростей течения, зоны конвергенции и дивергенции). В фундаментальной сводке знаний об океанических фронтах К.Н.Федоров [4] выделяет фронтальную зону, проявляющуюся во всей толще термоклина, по максимальным горизонтальным градиентам гидрологических характеристик и максимальным горизонтальным градиентам горизонтальной и вертикальной циркуляции вод и фронтальный раздел – как поверхность внутри фронтальной зоны, совпадающую с поверхностью максимального градиента одной или нескольких характеристик, а также фронт – линию пересечения фронтального раздела с любой выбранной поверхностью, в частности, с поверхностью моря, «поверхностный фронт».

Кроме того, выделяют главные климатические океанические фронты как границы основных океанических круговоротов, каждый из которых содержит воды определенной вертикальной структуры и фронты синоптического масштаба, связанные с процессами синоптического масштаба в атмосфере и в океане. Выделяются также термические фронты, соленостные, плотностные (стерические), термохалинные, динамические, термодинамические, фронты в поле гидрохимических характеристик, различного рода биотические фронты и т.д. По местонахождению фронты разделяют на океанические, прибрежные, эстуарные, поверхностные, придонные и другие, например, прибрежный приливной фронт как граница между стратифицированными водами открытого моря и однородными в результате приливного перемешивания прибрежными водами.

В настоящей работе предпринята попытка формализовать эти понятия с целью выделения фронтальных зон и фронтальных разделов по данным спутниковых измерений, которые открыли новые возможности в описании их пространственно-временной изменчивости в широком диапазоне масштабов [12, 13].

Будем исходить из простых феноменологических представлений: фронт возникает там, где в море сходятся потоки количества движения, тепла, солей, плотности (плаваемости), других физических, химических и биологических характеристик.

¹ Санкт-Петербургский государственный университет
© Фукс В.Р., 2009

О возможности оценки положения...

Введем, прежде всего, основные определения.

Уравнение переноса консервативной субстанции ρ удобно представлять в виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \rho \vec{V} = 0, \quad (1)$$

где \vec{V} - вектор скорости течения (u, v, w – составляющие этого вектора по координатным осям).

Уравнение (1) при $\text{div} \vec{V} = 0$ эквивалентно уравнениям

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Интегрируя уравнения (1) и первое из (2) от поверхности моря до постоянной глубины H , при условии отсутствия вертикальных потоков субстанции через ограничивающие поток поверхности и кинематическом условии на свободной поверхности $w = -\frac{\partial \xi}{\partial t}$, полу-

чим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\rho} v}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u} H}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v} H}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\bar{\rho} = \frac{1}{H} \int_0^H \rho dz$, $\bar{\rho} u = S_x = \frac{1}{H} \int_0^H \rho u dz$, $\bar{\rho} v = S_y = \frac{1}{H} \int_0^H \rho v dz$, $\bar{u} = \frac{1}{H} \int_0^H u dz$, $\bar{v} = \frac{1}{H} \int_0^H v dz$

или, опуская далее знаки операции осреднения, запишем (3) в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \vec{S} &= 0, \\ \frac{\partial \xi}{\partial t} + \text{div} \vec{V} H &= 0, \end{aligned}$$

где $\text{div} \vec{S}$ - горизонтальная дивергенция полного потока субстанции и $\text{div} \vec{V} H$ - дивергенция полного потока течения.

Очевидно (в соответствии со сформулированным ранее определением) область, где $\text{div} \vec{S} < 0$, - это фронтальная зона, т.е. зона конвергенции, а линия максимальной конвергенции в этой зоне $\text{div} \vec{S} = \max$ есть фронт или фронтальный раздел. В настоящее время доступны для выделения фронтальных зон и фронтальных разделов спутниковые альтиметрические измерения, данные о температуре поверхности океана и о концентрации хлорофилла, позволяющие выделять динамические, термические и биотические фронты на поверхности океана.

Рассмотрим с этой точки зрения элементарные динамические и термические фронты, описываемые соответственно уравнениями неразрывности движения и переноса тепла:

$$\begin{aligned} \text{div} \vec{S}_u &= -\frac{\partial \xi}{\partial t}, \\ \text{div} \vec{S}_\Theta &= -\frac{\partial \Theta}{\partial t}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\vec{S}_u = \vec{V} H$ - полный поток, $\vec{S}_\Theta = \vec{V} \Theta$ - поток тепла.

Важно отметить, что дивергенция потоков субстанции, тепла – существенно нелинейный процесс. Пусть, например, потоки количества движения определяются годовой изменчивостью течений и теплового баланса:

$$u = U(x, y) \cos \sigma t, \quad v = V(x, y) \cos \sigma t,$$

$$\Theta = \Theta_0(x, y) \cos \sigma t, \quad \sigma = \frac{2\pi}{365 \text{ сут}},$$

тогда

$$\operatorname{div} \bar{\mathbf{S}}_{\Theta} = \frac{\partial u \Theta}{\partial x} + \frac{\partial v \Theta}{\partial y} = \left(\frac{\partial U \Theta_0}{\partial x} + \frac{\partial V \Theta_0}{\partial y} \right) \cos^2 \sigma t = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U \Theta_0}{\partial x} + \frac{\partial V \Theta_0}{\partial y} \right) (1 + \cos 2\sigma t),$$

т.е. сезонный ход в изменчивости течений и тепла определяет в дивергенции из-за нелинейности процесса некую постоянную составляющую и обертона годовой гармонике.

На линии фронта внутри зон конвергенции потоков должны выполняться основные условия, следующие из определения конвергенции, и дополнительные условия, следующие из законов сохранения:

$$\operatorname{grad}(\operatorname{div} \bar{\mathbf{V}} H) = 0 \text{ и } \operatorname{grad} \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right) = 0 \text{ (динамический фронт);}$$

$$\operatorname{grad}(\operatorname{div} \bar{\mathbf{S}}_{\Theta}) = 0 \text{ и } \operatorname{grad} \left(\frac{\partial \Theta}{\partial t} \right) = 0 \text{ (термический фронт).}$$

Если при описании фронтов учитывать турбулентные потоки тепла, то последнее условие примет вид:

$$\text{для термического фронта } \operatorname{grad} \left(\frac{\partial \Theta}{\partial t} - A_{\Theta} \Delta \Theta \right) = 0,$$

где A_{Θ} - коэффициент горизонтальной турбулентной теплопроводности.

Сопоставление выполнимости основных и дополнительных условий может служить критерием достаточности упрощений, положенных в исходные уравнения модели. Для оценки потоков субстанций необходимы величины скоростей течений, которые можно определить по альтиметрическим измерениям.

Примем исходную систему уравнений движения в квазигеострофическом приближении (с учетом горизонтального турбулентного потока количества движения, внутреннего трения):

$$-fv = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} + A \Delta u$$

$$fu = -g \frac{\partial \xi}{\partial y} + A \Delta v, \quad (5)$$

где u и v – зональная и меридиональная составляющие среднего по глубине вектора скорости течения; ξ – возвышение уровня моря; A – коэффициент горизонтального турбулентного обмена; Δ – плоский лапласиан; g – ускорение силы тяжести.

Найдем из (5) зависимость каждой из составляющих скорости течения от возвышений уровня:

$$D(u) = -g \frac{\partial \xi}{\partial y} + A \left[\Delta \left(\frac{g}{f} \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \right]$$

$$D(v) = g \frac{\partial \xi}{\partial x} + A \left[\Delta \left(\frac{g}{f} \frac{\partial \xi}{\partial y} \right) \right], \quad (6)$$

О возможности оценки положения...

где дифференциальный оператор для характерных пространственно-временных масштабов синоптической и сезонной изменчивости $D(\) = f + A\Delta[\frac{A}{f}\Delta(\) \approx f$.

Тогда (6) можно представить в виде:

$$u = -\frac{g}{f} \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{A}{f} [\Delta(\frac{g}{f} \frac{\partial \xi}{\partial x})]$$
$$v = \frac{g}{f} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{A}{f} [\Delta(\frac{g}{f} \frac{\partial \xi}{\partial y})],$$

т.е. оценить составляющие скорости течения по альтиметрическим уклонам уровня моря.

Используя уравнение неразрывности в виде (3), получим выражение для дивергенции полного потока, определяемое по данным альтиметрических измерений:

$$\text{div } S_v = -\frac{\partial a}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\partial a}{\partial y} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} [aA\Delta(f^{-1} \frac{\partial \xi}{\partial x})] + \frac{\partial}{\partial y} [aA\Delta(f^{-1} \frac{\partial \xi}{\partial y})], \quad (7)$$

где $a = \frac{gH}{f}$.

Очевидно, что уровень моря во фронтальной зоне достаточно сложно зависит от основных параметров, определяющих движение.

Достаточность допущений, положенных в основу выражений (4) и (7), может быть проверена решением обратной задачи путем динамико-стохастического анализа [13, 14].

В качестве примера рассмотрим опыт выделения фронтальных зон и фронтальных разделов на основе альтиметрических измерений в Японском море.

Одним из основных центров сбора и хранения альтиметрической спутниковой информации является центр данных AVISO французского космического агентства CNES. Этот архив включает в себя данные альтиметрических измерений со спутников Т/Р, Jason-1, ERS-1 и ERS-2, и EnviSat. На сайте AVISO (<http://www.aviso.oceanobs.com/>) находятся в свободном доступе вдольтрековые данные и значения, пересчитанные в узлы регулярной сетки с шагом $1/3^\circ$ на $1/3^\circ$.

Результаты расчетов положения динамических фронтов с помощью вышеизложенной методики представлены в качестве примера для Японского моря в виде карт дивергенции полного потока [15, 16]. Процедура расчетов состояла из следующих этапов обработки и анализа альтиметрической информации:

– получение среднемесячных, среднесезонных и среднегодовых значений уровня в узлах сетки $1^\circ \times 1^\circ$ за период 2001-2006 гг.;

– расчет $\frac{\partial \xi(x, y)}{\partial t}$ и выделение зон вергенций в поле возвышений уровня: $\frac{\partial \xi}{\partial t} = 0$ -

зоны нулевой дивергенции; $\frac{\partial \xi}{\partial t} < 0$ - зоны дивергенции; $\frac{\partial \xi}{\partial t} > 0$ - зоны конвергенции пол-

ных потоков;

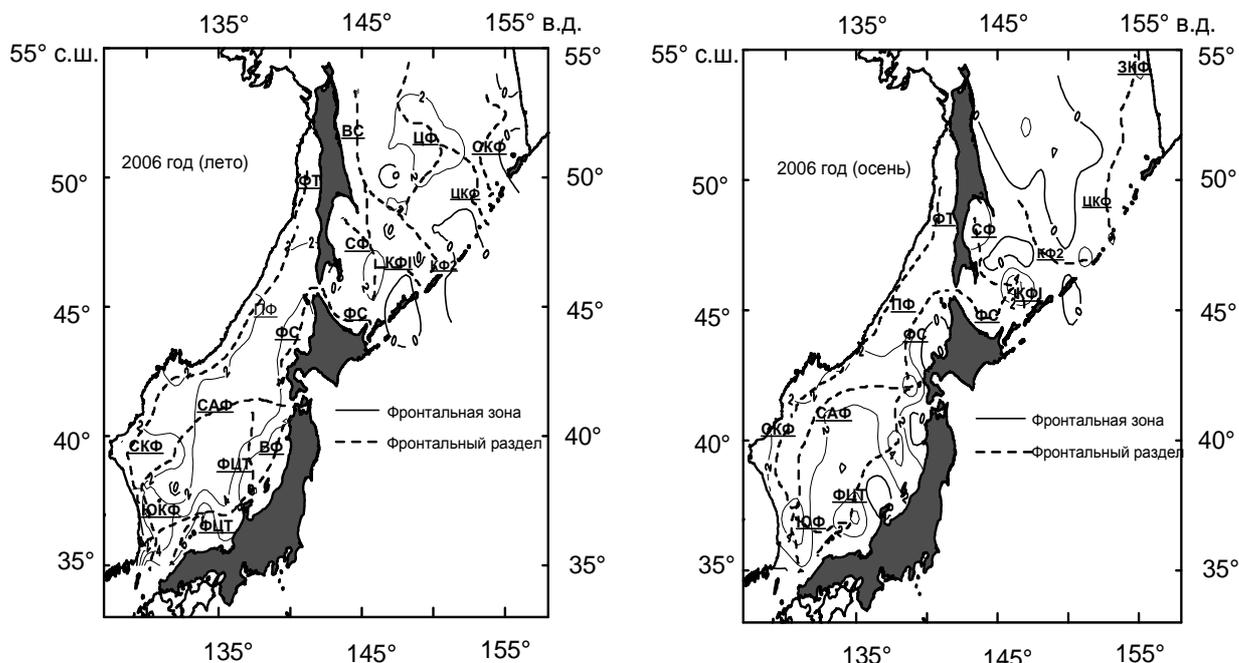
– построение карт среднесезонного, среднегодового, среднесезонного и среднемесячного положения фронтальных зон за период 2001-2006 гг.

Идентификация фронтов производилась на основе классификации термических фронтов Японского моря, выделенных А.А.Никитиным по результатам дешифрирования спутниковых ИК-снимков за 1977-2003 гг. [17].

Выделена система основного Субарктического фронта (САФ) с его двумя западными ветвями: Северо-Западной (СЗ) и Юго-Западной (ЮЗ) и двумя северными: Северо-Восточной (СВ) и Северной Центральной (СЦ). САФ ориентирован в центральной и западной части моря преимущественно по широте, а в северной - по долготе. В зоне Цусим-

ского течения выделены три фронта: Приморский фронт (ПФ), Сахалинский фронт (СФ), Северо-Корейский фронт (СКФ), фронт Татарского пролива (ТФ).

На рисунке для примера представлено положение фронтальных разделов в Японском и Охотском морях в 2006 г., вычисленных по среднесезонным полям. Сравнивая положение динамических и термических фронтов, выделенных по альтиметрическим и ИК-измерениям, отметим их принципиальное подобие при различиях, которые вполне объяснимы полученными зависимостями.



Положение фронтальных разделов в Японском и Охотском морях летом и осенью 2006 г.

Проделанная работа убедила нас в том, что выделение на основе спутниковой информации разномасштабных фронтальных зон и фронтальных разделов по конвергенции полных потоков количества движения может быть успешно реализовано.

Литература

1. Грузинов В.М. Фронтальные зоны Мирового океана. М.: Гидрометеиздат, 1975. 198 с.
2. Грузинов В.М. Гидрология фронтальных зон Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 272 с.
3. Степанов В.Н. Динамические зоны в океанах и атмосфере // Изв. АН СССР, сер. геогр., 1978. № 3. С.101-113.
4. Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
5. Шакина Н.П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 263 с.
6. Родионов В.Б., Костяной А.Г. Океанические фронты морей Северо-Европейского бассейна. М.: ГЕОС, 1998. 123 с.
7. Воробьев В.Н., Смирнов Н.П. Общая океанология. Часть II. Динамические процессы. СПб.: РГГМУ, 1999. 230 с.
8. Defant A. *Stabile Lagerung d. Ozeanischer Wasserkörper und dazu gehörige Stromsystem* // Veröff. Inst. Meer. Univ. Berlin, 1929. Neufolge A.H. P.116-124.
9. Uda M. Researches on "siome" or current rip in the seas and oceans // Geophys. Mag., 1938. V.11. N 4. P.306-372.
10. Mooers C.N.K. Frontal dynamics and frontogenesis / In: *Oceanic Fronts in Coastal Processes* / Ed. M.Bowman, W.Esaias. Springer-Verlag, 1978. P.16-22.
11. Иванов Ю.А., Нейман В.Г. Фронтальные зоны Южного океана / В кн.: *Антарктика*. М.: Наука. 1964. С.98-109.

О возможности оценки положения...

12. *Фукс В.Р.* Гидрометеорологические основы интерпретации спутниковой альтиметрической информации // Сб.: Колебания уровня морей. СПб.: Гидрометиздат, 2003. С.121-128.
13. *Фукс В.Р.* Альтиметрическая оценка положения зон вергенций течений для промысловых приложений // Тез. докл. IX Всероссийской конференции по проблемам рыбопромыслового прогнозирования. 19-21 окт.2004. г.Мурманск. Мурманск: ПИНРО, 2004. С.283-285.
14. *Фукс В.Р.* Оценка параметров динамико-стохастической модели океанографических полей на основе спутниковых измерений // Вестник СПбГУ. Сер.7. 2008. Вып.2. С.67-75.
15. *Старицын Д.К., Фукс В.Р.* Сезонная изменчивость уровня Японского моря (по данным альтиметрических измерений) // Вестник СПбГУ. Сер.7. 2004. Вып.4 (№ 31). С.56-71.
16. *Старицын Д.К., Фукс В.Р.* Анализ особенностей океанологических условий северо-западной части Тихого океана в 2002-2004 гг. на основе спутниковых вдоль трековых альтиметрических измерений // Вестник СПбГУ. Сер.7. 2005. № 2. С.32-39.
17. *Никитин А.А.* Основные черты пространственного распределения поверхностных термических фронтов в водах Японского моря и их изменчивость // Исследование Земли из Космоса. 2006. № 5. С.49-62. Владивосток: ТИНРО, 2002. 83 с.

Статья поступила в редакцию 24.07.2008 г.