УДК 551.465.48

ВЕРИФИКАЦИЯ СТРИМЛЕТНОЙ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЙ В ОКЕАНЕ

A.A.	Шупикова,
A.B .	Казанский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН¹

Целью данной статьи является верификация новой стримлетной модели, предложенной недавно для объективного анализа трехмерной структуры поля скорости океанических течений. Это простая параметрическая модель, основанная на когерентности струйных течений и вихрей (синоптических объектов). Стримлетная модель является универсальной и позволяет функционально объединить разные синоптические объекты. Ассимиляция измерений скорости состоит в подборе оптимальных параметров целевой функции с использованием хорошо известного алгоритма Нелдера-Мида. Модель применялась к синоптическим объектам различных природы и масштаба, включая как поверхностные и подповерхностные бароклинные, так и глубинные баротропные океанические течения.

введение

Объектное моделирование струйных течений и вихрей (далее - синоптических объектов, СО) - новый и очень перспективный вид объективного анализа океанических течений. В этом анализе так называемые скоростные объектные модели, предназначенные для объективного анализа полей скорости, приобретают особое значение. Причина в том, что эти поля, определяя общую динамику, задают особенности других полей. К тому же они отличаются высокой пространственной и временной изменчивостью, которую трудно воспроизвести с помощью формальной и нестабильной корреляции, используемой в традиционном объективном анализе (например, в стандартной технике «оптимальной интерполяции»). Однако нужно принять во внимание, что измерения скорости (например, по сравнению с измерениями поверхностной температуры) редки и асинхронны (буйковые, посредством слежения за дрифтерами, ADCP) или неполны (направленные однокомпонентные спутниковые измерения). Более того, большая часть измерений локализована на приповерхностном уровне, и есть необходимость продолжения течения на глубину. Преимущество объектных моделей по сравнению с точечными методами объективного анализа океанических течений заключается в их интегральном характере, который позволяет нам эффективно решать эту важную проблему.

Другая проблема, которая возникла в связи с развитием численных моделей океанических течений – это сложная проблема ассимиляции данных, известная как задача инициализации. Она состоит в выделении квазипостоянной (сбалансированной) компоненты течения путем устранения высокочастотных переходных

процессов. Из-за нелинейной природы синоптических объектов обычные фильтры и схемы интерполяции, настроенные на снижение независимых ошибок измерений, плохо решают эту проблему. Например, применение стандартных методов «оптимальной интерполяции» не обеспечивает необходимую точность в процессе ассимиляции, то есть не устраняет мелкомасштабные движения и приводит к пятнистой структуре полей скорости и ее производных. Напротив, объектные модели благодаря их функциональной целостности можно настроить на фильтрацию мелкомасштабных возмущений, что делает их перспективными в задачах инициализации и реинициализации современных вихреразрешающих моделей [1]. Мы также должны заметить, что хотя объектные моде-

¹ 690041, Владивосток, ул. Радио, 5; тел.: (423) 2313776; e-mail: antonina@iacp.dvo.ru

ли представляют собой простые аналитические функции, любое сложное поле течений можно представить с помощью их композиции. Примеры таких полей можно найти в [2].

Наконец, важной особенностью объектных скоростных моделей является введение потоковых координат, которые позволяют существенно улучшить представление градиентов любых океанографических полей (физических, химических, биологических). Изначально например, в [3, 4] - такой подход использовался только для получения осредненного поперечного сечения струйных течений, но очевидна необходимость его применения для всех синоптических объектов, включая отдельные сечения вихрей. Важно заметить, что наше определение потоковых координат отличается от других объектных моделей, оно основано на линии максимальной скорости.

Основная проблема объектного моделирования заключается в отсутствии универсальности. Скоростные объектные модели – не исключение, так как все ранее предложенные модели (например, [2, 5]) включают эмпирический набор эвристически подобранных функций, предназначенных для



Рис. 1. Простая стримлетная модель поперечного сечения поля скорости – конус скорости с произвольным основанием. Центральные сечения скорости имеют треугольную форму, остальные сечения гиперболические. Ось стримлета определяется линией максимума скорости потока. Показаны векторы **v** - скорости, шо - завихренности, **I** - Лэмба

конкретного синоптического объекта. В отличие от этих эмпирических моделей стримлетная модель, предложенная в [6], имеет ясное физическое обоснование и применима ко всем СО. Именно это будет продемонстрировано в данной статье.

1. Стримлетная модель

Хорошо известно, что СО имеют когерентную структуру – все их поперечные сечения подобны. Можно доказать, что когерентность является следствием вихревого движения, определяемого вектором 38вихренности: $\omega \equiv \nabla \times v$. Это, в свою очередь, позволяет ввести в рассмотрение векторы Лэмба $I = v \times \omega$, которые задают (ориентируют) поверхности Лэмба, образованные пересекающимися семействами линий тока и вихревых линий. Такое представление имеет два важных следствия.

Во-первых, векторы Лэмба можно интерпретировать как направленное внутрь струи ускорение Кориолиса, которое неизбежно возникает у движущейся завихренности и тем самым обеспечивает стягивание струи в компактную структуру, но убывает со снижением скорости, что несколько «размывает» границы струи.

Во-вторых, через поверхности Лэмба нет потока завихренности по определению, поэтому скорость однородна на поверхностях Лэмба, т.е. эти поверхности являются изотахическими. Исходя из этого любое течение в стримлетной модели представляется в виде композиции непрерывно вложенных вихревых соленоидов с изотахичными поверхностями Лэмба – цилиндрическими для струйных течений или тороидальными для вихрей, т.е. замкнутых струй (рис. 1).

Что касается внутреннего распределения скорости и завихренности, то все, что нам известно – что оно должно зависеть от того, как возникло течение [7]. Фактическая предыстория струйных течений и вихрей в океане связана с турбулентной диффузией (вихревым форсингом), которая одновременно есть и диффузия завихренности (благодаря свойству завихренности быть «вмороженной» в жидкость [7]). Поскольку любая диффузия всегда направлена на устранение градиентов, после завершения процесса генерации синоптических вихрей и струйных течений следует ожидать выравнивания распределения завихренности – в этом состоит физическое объяснение конуса скорости стримлетной модели. Форма основания поперечного сечения стримлетов овальная, в первом приближении может иметь эллиптическую форму. Отметим, что под действием планетарной силы Кориолиса конус становится наклонным, т.е. центр основания не совпадает с максимумом скорости. Для выходящих на поверхность СО верхняя часть струи замещается вихревой пеленой. Важно, что такое отсечение возможно только на свободной поверхности, где есть большой скачок плотности, и нигде больше. Это «отсечение» также означает сжатие поверхностей Лэмба в тонкие слои, а не их разрушение.

Итак, в стримлетной модели струйное течение или вихрь как замкнутая струя состоит из осевой линии максимальной скорости, определяющей потоковые координаты, и поперечного сечения в виде наклонного конуса с эллиптическим основанием, которое можно аппроксимировать функцией со следующими параметрами: – (a, b) – горизонтальная и вертикальная полуоси эллиптического основания конуса скорости, которые зависят от кривизны струи и внешних сил (давление, сила Кориолиса, трение);

 $-V_{\rm max}$ – максимальное значение скорости струи, постоянное для любого сечения конкретной струи;

 – *f* – угол наклона эллиптического основания;

 (x_0, y_0) – положение линии максимальной скорости струи (топология);

- (x_n , y_n) - наклон конуса скорости, обусловленный воздействием внутренней силы Кориолиса.

Итого 8 параметров.

Оценка модели проводится на натурных измерениях скорости различных синоптических объектов. Оптимальный набор параметров конуса скорости вычисляется путем минимизации функции

 $CKO = \sqrt{(\Sigma (V_{di} - V_{mi})^2 / N)},$ где i = 1: N – точки с натурными измерениями скорости V₄ и модельными значениями скорости V_т для выбранного набора параметров. Для поиска минимума используется алгоритм Нелдера-Мида. Данные скорости представляются в виде вертикальных профилей скорости на одинаковом расстоянии друг от друга, тем более что измерения скорости ADCP имеют такой вид. Основание конуса скорости поперечного сечения СО в океане очень приплюснуто и имеет некоторый угол наклона, вызванный планетарной силой Кориолиса. Два этих параметра задают крайне негладкую функцию СКО, что мешает поиску оптимального набора параметров. Для решения этой проблемы данные масштабируются по горизонтали. Поскольку в случае вихрей в наличии

имеется 2 поперечных сечения. то необходимо оптимизировать 11 параметров: *a*1, *b*1, *f*1, *V*_{max}, 11 параметров. «2, 12, 9) $x_0^{-1}, y_0^{-1}, x_n^{-1}, y_n^{-1} - для одного се-$ чения; *a*2, *b*2, *f*2, *V*_{max}, *x*₀2, *y*₀2, $x_{\rm n}2, y_{\rm n}2$ – для второго сечения. В случае большего количества поперечных сечений для одного течения функция СКО зависит от 7n+1 параметров, где n – количество сечений. Отметим, что алгоритм Нелдера-Мида имеет достаточно низкую степень сходимости, поэтому важно задавать начальные условия (начальные параметры модели), близкие к минимуму.

2. Верификация стримлетной модели

Как было сказано выше, в основе стримлетной модели лежит предположение, что все синоптические объекты имеодинаковую внутреннюю ют структуру (распределение поля скорости и завихренности). Поперечное сечение поля скорости в них может быть описано простой параметрической функцией - наклонным конусом с эллиптическим основанием. Для обоснования этого предположения были исследованы течения различной природы, включая поверхностные и подповерхностные бароклинные течения,

а также глубинные баротропные течения.

2.1. Синоптические объекты с поверхностным максимумом

Два примера поверхностных течений: продолжение Куросио (ПК) и циклонический ринг, образованный в процессе меандрирования продолжения Куросио, демонстрируют подобие бароклинных структур поперечного сечения поля скорости (рис. 2, a, b). Для исследования использовались усредненные измерения ADCP: для ПК из [8], для циклонического ринга ПК из [9].

Второй пример мезомасштабного вихря совсем иного происхождения - ветровой циклон Noah. Здесь проводились вертикальные и горизонтальные измерения скорости синоптического объекта, обнаруженного недалеко от Гавайских островов [10]. Этот пример показывает способность стримлетной модели восстанавливать структуру поля скорости по частичным (не осредненным) измерениям, а также демонстрирует способность к гладкой оценке производных.

На рис. 3, *а* представлен пример восстановления гори-



Рис. 2. Вертикальное сечение поля скорости ПК (а) и циклонического ринга ПК (б). Цветные контуры – данные АDCP, черные кривые – модельные скорости



Рис. 3. Гавайский вихрь Noah: а – горизонтальное сечение поля скорости на глубине 40 м: аппроксимация стримлетной моделью (слева), результат оптимальной интерполяции (справа); б – вертикальное сечение поля скорости: интерполированные данные ADCP, черные кривые – изолинии скорости стримлетной модели; в – вертикальное сечение поля вертикального сдвига: по данным стримлетной модели (слева), по данным оптимальной интерполяции (справа)

зонтальной структуры поля скорости на основе стримлетной модели (слева) с эллиптической формой осевой линии в сравнении с данными оптимальной интерполяции поля скорости (справа), как в [10]. Границы треугольного профиля скорости, содержащего максимальное значение, корректируются в зависимости от радиуса кривизны струи; предположительно потому, что завихренность (вертикальная для этого сечения) сохраняется вдоль горизонтально искривленных линий тока, так что соответствующий профиль скорости подчиняется уравнению:

 $-\partial V/\partial n + V/r = \omega,$

которое дает коррекцию ширины для профиля скорости в виде:

$$n_{\rm L,R} = R \, (1 - \sqrt{-2 \, V_{\rm max} \, R / \omega_{\rm L,R} + R^2}),$$

где R – радиус кривизны осевой линии, r = R - n – локальный радиус кривизны, $\omega_{\rm L,R}$ – параметр, задающий значение завихренности нулевой кривизны слева и справа от осевой линии потока (линии максимума скорости).

На рис. 3, δ показан пример интерполяции вертикальны измерений сечения 3, аппроксимированного стримлетной моделью.

Вертикальная структура вертикального сдвига скорости (горизонтальная завихренность) представлена на рис. 3, *в* (слева). Высокая чувствительность производных скорости к мелкомасштабным возмущениям приводит к пятнистости результатов оптимальной интерполяции (рис. 3, *в*, справа). Функциональная целостность стримлетной модели в описании структур скорости и завихренности дает эффективную гладкую оценку.

Заметим, что поперечные сечения этого вихря различны, поскольку условия мелководья деформируют его структуру. В этом случае совместно с процедурой осреднения должна применяться дополнительная процедура вольюм-рендеринга, поскольку для создания 3-мерной модели требуется постоянное подключение различных вертикальных сечений. Разработка таких процедур является предметом текущей работы.

2.2. Примеры подповерхностных течений

Галоклинный арктический вихрь из В92 ЮЕВ [11] является представителем подводных, так называемых meddy вихрей. Этот пример особенно хорошо демонстрирует треугольный профиль скорости и тороидальную структуру, характерную для стримлетной модели (рис. 4). Своеобразный аспект, связанный с этим высокоширотным вихрем, заключается в незначительном β-эффекте, который часто считают жизненно важным для существования синоптических объектов.

Для экваториального подповерхностного течения (ЭПТ) характерно коническое распределение поперечного сечения поля скорости. Данные, представленные на рис. 5, *a*, восстановлены на базе измерений РСМ, с корректировкой по данным ADCP [12]. Рис. 5, б демонстрирует способность модели восстанавливать данные по приповерхностным измерениям (данные ADCP до 120 м). Особенность этого примера состоит в том, что к ЭПТ неприменим геострофический баланс, поскольку сила Кориолиса на экваторе равна нулю. Этот пример явно показывает, что, вопреки распространенному мнению, синоптические объекты поддерживает не геострофический баланс.

2.3. Глубинные баротропные вихри

Интерполяция глубинных измерений ADCP вихря атлантического глубинного западного пограничного течения [5] показывает тороидальную структуру поля скорости с заметным вертикальным сдвигом скорости, с наложением изотах стримлетной модели (рис. 6).

Вихрь F моря Лабрадор по данным буйковых измерений [13] имеет такую же тороидальную структуру поля скорости (рис. 7). В дополнение к своему глубинному залеганию этот вихрь отвечает условиям баротропности сверху донизу ввиду его очень слабой стратификации.

Эти два глубинных вихря, расположенные значительно ниже пиноклина, в основном баротропны, по крайней мере в их нижней части, но имеют значительный вертикальный сдвиг. Это противоречит хорошо известной теореме Тейлора-Праудмена, запрещающей вертикальное изменение скорости для баротропных вихрей, но допускается стримлетной моделью. Ее дальнейшее развитие способно устранить имеющееся противоречие за счет учета нелинейного члена, отвечающего за адвекцию завихренности.



Рис. 4. Галоклинный арктический вихрь из B92 IOEB: а – поперечное сечение скорости: цветные контуры – интерполированные данные ADCP, черные кривые – изолинии скорости стримлетной модели; б – горизонтальное сечение на глубине 104 м: синие векторы – данные ADCP, черные – аппроксимация стримлетной моделью



Рис. 5. Вертикальное поперечное сечение поля скорости ЭПТ: а – полученное по измерениям РСМ; б – по измерениям АDCP. Цветные контуры – натурные измерения, черные кривые – изолинии конуса скорости стримлетной модели



Рис. 6. Вихрь атлантического глубинного западного граничного течения: цветные контуры – аппроксимация данных ADCP методом оптимальной интерполяции, черные кривые – изолинии поля скорости стримлетной модели по тем же данным

выводы

В статье представлен анализ наблюдений различных синоптических объектов, на основании которого была верифицирована скоростная стримлетная объектная модель, предложенная авторами для объективного анализа структуры поля скорости струйных течений и вихрей. Показано, что модель является универсальной и может применяться к синоптическим объектам различных природы и масштаба, включая как поверхностные и подповерхностные бароклинные, так и глубинные баротропные океанические те-



Рис. 7. Вихрь в море Лабрадор: а – буйковые измерения скорости (временной интервал между профилями – 4 ч); б, в – восстановленные сечения скорости

чения. Отметим, что стримлетная модель, в отличие от других объектных скоростных моделей, объединяет в себе топологически различные объекты, такие как струи и вихри. Это позволяет значительно упростить процедуру ассимиляции натурных данных, сведя ее просто к подгонке параметров модели. Одновременно были

описаны специфические особенности стримлетной модели, которые в отличие от ряда известных аналогов позволяют: оценивать производные скорости; восстанавливать глубинную структуру поля скорости по приповерхностным слоям, а также аппроксимировать вертикальный сдвиг скорости у баротропных течений, который запрещает теорема Тейлора– Праудмена.

Планируется дальнейшее развитие стримлетной модели, которое обеспечит механизм поддержания вертикального сдвига скорости в баротропных течениях за счет учета нелинейных членов, опущенных при выводе теоремы Тейлора-Праудмена. Также будет исследовано влияние центробежной силы на распределение поля скорости и завихренности внутри синоптических объектов, что позволит уменьшить количество параметров модели. В связи с тем, что стримлетная модель позволяет восстанавливать поле скорости по приповерхностным измерениям, необходимо исследовать возможность восстановления трехмерного поля скорости по данным альтиметрии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 11-01-00590-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Stewart R.H. Introduction to Physical Oceanography. USA, Texas: A&M University, Dept. Oceanography, Collage Station, 2004.

2. Gangopadhyay A., Robinson A.R. Feature-oriented regional modeling of oceanic fronts // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 2002. Vol. 36. P. 201-232.

3. Halkin D., Rossby T. The structure and transport of the Gulf Stream at 73°W // Journ. of Physical Oceanography. 1985. Vol. 15. P. 1439–1452.

4. Meinen S. Structure of the North Atlantic current in stream-coordinates and the circulation in the Newfoundland basin // Deep-Sea Research. 2001. Vol. 48. Pt I. P. 1553–1580.

5. Dengler M., Schott F.A., Eden C. *et al.* Break-up of the Atlantic deep western boundary current into eddies at 8°S // Nature. 2004. Vol. 432. P. 3134.

6. Kazansky A.V., Shupikova A.A. On the velocity field structure of jet streams and eddies in the ocean // Doklady Earth Scinces. 2010. Vol. 431. Pt 2. P. 528-532.

7. Бэтчелор Дж.К. Введение в механику жидкости. М.; Ижевск: РХД, 2004. 768 с.

8. Qiu B., Hacker P., Chen S. *et al.* Effect of mesoscale eddies on subtropical mode water variability from the Kuroshio Extension system study (KESS) // Journ. of Physical Oceanography. 2006. Vol. 36. P. 457–473.

9. Greene A.D., Donohue K.A., Watts D.R. Vorticity and potential vorticity structure of Kuroshio Extension cold core ring // The 13th Ocean Sciences Meeting: Abstract OS45G-06. 20-24 February 2006, Honolulu, Hawaii. Honolulu, 2006.

10. Kuwahara V.S., Nencioli F., Dickey T.D. *et al.* Physical dynamics and biological implications of cyclone Noah in the lee of Hawai'i during E-Flux I // Deep-Sea Research. 2008. Vol. 55. Pt 2. P. 1231–1251.

11. Krishfield R.A., Plueddemann A.J., Honjo S. Eddys in the Arctic Ocean from IOEB ADCP data // Technical Report WHOI-2002-09 / Woods Hall Oceanographic Institution. Massachusetts, USA. 2002.

12. Eric S.J., Douglas S.L. Mean zonal momentum balance in the upper and central equatorial Pacific ocean // Journ. of Geophysical Researche. 1994. Vol. 99. P. 7689–7705.

13. Lilly J.M., Rhines P.B. Coherent eddies in the Labrador sea observed from a mooring // Journ. of Physical Oceanography. 2002. Vol. 32. P. 585-598.