УДК 551.465

10.25808/24094609.2019.29.3.003

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРИМЛЕТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛЯ СКОРОСТИ АРКТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ

А.А. Шупикова, А.В. Казанский

Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук¹

Рассматривается реконструкция трехмерного поля скорости подповерхностных вихрей в Арктическом бассейне с использованием стримлетной модели. Исходные данные скорости, полученные в ходе эксперимента IOEB (Ice-Ocean Environmental Buoy), представлены в виде последовательности вертикальных профилей, расположенных на некотором расстоянии друг от друга вдоль траектории дрейфа льдины с измерениями ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Трехмерное поле скорости вихрей восстанавливается на базе параметрической стримлетной модели путем минимизации среднеквадратичного отклонения модельных и измеренных векторов скорости. Оптимальные параметры модели подбираются с помощью хорошо известных алгоритмов нелинейной оптимизации: симплексного спуска Нелдера–Мида и метода внутренних точек (метод Ньютона). Показаны результаты восстановления поля скорости для нескольких арктических вихрей с помощью стримлетной модели и приведен сравнительный анализ результатов аппроксимации с доступными скоростными объектными моделями.

введение

Информация о синоптических вихрях в Арктическом бассейне крайне скудна. Причиной этого является почти круглогодичное покрытие льдом полярных морей, в результате чего большинство традиционных средств наблюдения являются недоступными. Также малопродуктивны в полярных условиях появившиеся в последнее время спутниковая альтиметрия и наблюдения за дрифтерами, которые и в других случаях дают измерения только поверхностных течений. Фактически доступными данными о динамических процессах в этих покрытых льдом морях до недавнего времени были эпизодические наблюдения на полярных станциях [1]. При этом скорости течений определялись так называемым динамическим методом, т.е. были косвенными измерениями. В последнее время наметился определенный прогресс: четырехлетние прямые измерения скорости в море Баффина с помощью акустического доплеровского профилометра течений (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP), привязанных к дрейфующим льдинам, выявили во множестве галоклинные вихри (линзы) [2-4]. Эти вихри подобны внутритермоклинным вихрям (meddies) в Средиземном море и восточной части Атлантического океана [5], однако их наблюдения распределены вдоль некоторой случайной траектории дрейфа,

т.е. мы имеем дело с произвольным криволинейным сечением синоптических объектов. Для восстановления трехмерного поля скорости арктических вихрей по таким частичным данным необходима специальная техника. Наш подход состоит в применении адекватной и физически обоснованной объектной модели.

1. Стримлетная модель

Скоростная стримлетная (струйная) модель является представителем нового и весьма перспективного направления объективного анализа океанических течений, названного объектным моделированием (feature modeling) [6]. Все такие модели были выведены эмпирически, на основе анализа натурных измерений. Стримлетная модель не является исключением и была получена путем анализа данных ADCP, но при этом имеет теоретическое обоснование [1, 7, 8]. Основной особенностью объектных моделей является использование струйных координат (stream coordinates), которые вводятся индивидуально для каждого синоптического объекта (вихря или

¹ 690041, Владивосток, ул. Радио, 5. Тел.: +7 (423) 313776. Е-mail: antonina@iacp.dvo.ru

струйного течения) и перемещаются вместе с ним [9]. Из нескольких возможных способов определения струйных координат мы используем способ, основанный на линии максимальной скорости. В качестве образца, подтверждающего коническую форму распределения скорости в поперечном сечении для арктических вихрей, послужил редкий (фактически единственный из сотен) случай прохождения трассы ADCP через центр вихря [3], показанный ниже. Вертикальное сечение этого вихря демонстрирует тороидальную структуру, а треугольная форма горизонтального профиля на глубине максимальной скорости подтверждает важную особенность стримлетной модели – конус скорости [8].

Для теоретического обоснования введем в рассмотрение вектор Лэмба $I = v \times \omega$, где v – вектор скорости, а ω – вектор завихренности. Векторы Лэмба задают (ориентируют) поверхности Лэмба, образованные пересекающимися семействами линий тока и вихревых линий. Такое представление имеет два важных следствия. Во-первых, через поверхности Лэмба нет потока завихренности по определению, поэтому скорость однородна по модулю на поверхностях Лэмба, т.е. эти поверхности являются изотахическими. Во-вторых, как следствие первого, имеет место нелинейный инерционный баланс:

$$(\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v} = \nabla KE - \mathbf{l} = 0, \tag{1}$$

где ∇КЕ представляет поперечный (т.е. нормальный к линиям тока) градиент кинетической энергии, который обеспечивает стягивание струи в компактную структуру. Исходя из этого, любое течение в стримлетной модели представляется в виде композиции непрерывно вложенных вихревых соленоидов с изотахичными (одинаковой скорости) поверхностями Лэмба (рис. 1). При этом вихри рассматриваются как замкнутые струи (т.е. имеют форму тора), а поперечное сечение струи приобретает овальную форму, близкую к эллиптической, вследствие замкнутости вихревых линий. Отметим, что на свободной поверхности верхняя часть струи замещается вихревой пеленой, что означает сжатие поверхностей Лэмба в тонкие слои, но не их разрушение. Важно, что такое замещение возможно только на свободной поверхности, где есть большой скачек плотности, и больше нигле.

Поскольку арктические вихри имеют относительно небольшие размеры, то считается, что они симметричны и параметры поперечного сечения поля скорости в струйных координатах одинаковы для всего объекта. Кроме того, полагаем, что в горизонтальной плоскости линия максимальной скорости для вихря



Рис. 1. Стримлетная модель вихря: серые торы – вложенные поверхности Лэмба, цветные контуры – вертикальное сечение поля скорости, - горизонтальный профиль скорости на линии максимальной скорости, - линия максимальной скорости, - Векторы скорости ти и завихренности ω

имеет форму окружности радиуса R. Тогда параметры такого вихря определяются следующим образом. Осевая линия (линия максимальной скорости) вихря задается следующими параметрами: (x_0, y_0, z_0) – положение центра вихря; R — радиус вихря.

Поперечное (вертикальное) сечение вихря определяется в плоскости, перпендикулярной к линии максимальной скорости, и задается следующими параметрами: $V_{\rm max}$ – максимальное значение скорости струи, постоянно для любого сечения конкретного вихря; $(n_{\rm L}, n_{\rm R})$ – расстояние до границы струи слева и справа; $(z_{top}, z_{\rm btm})$ – расстояние до границы струи сверху и снизу.

Всего 9 параметров, характеризующих смещение центра эллиптического основания относительно положения максимальной скорости.

Для оценки параметров модели по натуризмерениям скорости ADCP используетным СЯ функция среднеквадратичного отклонения СКО = $\sqrt{(\sum_{i} (V_{di} - V_{mi})^2/N)}$, где V_{di} – измеренные векторы скорости, V_{ті} - модельные векторы скорости, вычисленные для выбранного набора параметров в точках *i* = 1 : *N*. Для поиска минимума используется алгоритм Нелдера-Мида. Исходные данные скорости представлены в виде вертикальных профилей скорости на одинаковом расстоянии друг от друга, в том виде, в котором получены данные ADCP. Эллиптическое основание конуса скорости поперечного сечения вихря имеет очень вытянутую по горизонтали форму (эксцентриситет = 0,9999), a сам конус имеет некоторый угол наклона по вертикали. Два этих параметра задают крайне нелинейную функцию СКО, что осложняет поиск оптимального набора параметров. Для решения этой проблемы данные масштабируются по горизонтали. Отметим, что алгоритм Нелдера– Мида имеет довольно низкую скорость сходимости, поэтому важно задавать начальные условия (начальные параметры модели), близкие к минимуму. С этим, в частности, и связанно введение струйных координат.

2. Реконструкция арктических вихрей с помощью стримлетной модели

2.1. Данные IOEB ADCP

Для восстановления поля скорости вихрей были использованы данные скорости ADCP, полученные системой IOEB (Ice-Ocean Environmental Buoy) в рамках экспедиций в море Бофорта в течение 1992–1998 гг. [3, 4]. Системы IOEB были развернуты 4 раза на многолетних льдах в западной части Северного Ледовитого океана. Общее время сбора данных составило 44 месяца. Более полная информация о программе IOEB [2], а также данные о технических характеристиках оборудования и данные измерений представлены в [11].

Абсолютные значения скорости ADCP представляют собой вертикальные профили модуля скорости на глубине от 40 до 330 м. Все профили имеют координатную географическую привязку к Земле. Массивы данных созданы путем объединения отфильтрованных компонент скорости [*u*, *v*, *w*] с данными местоположения, компонентами дрейфа, углом наклона и другими вспомогательными данными IOEB ADCP. Недостающие данные восстановлены методом линейной интерполяции. Количество удаленных и интерполированных данных составляет не более 2 % для B92. Итоговые значения скорости усреднены в 2-часовом интервале.

Для основной массы профилей максимальная скорость не превышает 3-4 см/с, тем не менее встречаются профили со скоростью более 15-40 см/с. Предполагается, что подобные скачки скорости для группы соседних векторов можно идентифицировать как принадлежащие вихрям. В подборе параметров модели также участвуют ближайшие профили с меньшей скоростью. Количество таких профилей индивидуально для каждого отдельного вихря и зависит не только от размеров самого вихря, но и от траектории его пересечения аппаратом АDCP. Критерием отбора служит уменьшение максимальных значений скорости в каждом соседнем профиле до фоновых. В случае центрального пересечения профили с фоновыми значениями скорости появляются в наборе трижды, по краям и в центре.

Поскольку вихри имеют относительно небольшие размеры, то считается, что они симметричны и параметры поперечного сечения поля скорости одинаковы для всего объекта. Оптимальные параметры стримлетной модели подбираются путем минимизации СКО методом Нелдера–Мида. Из всего множества вихрей, восстановленных с помощью стримлетной модели по данным ADCP, выбрано несколько таким образом, чтобы продемонстрировать возможности модели.

2.2 Центральное и нецентральное прохождение вихрей

Эталонным примером арктического вихря является полностью затопленная тороидальная линза на глубине от 50 до 300 м с внутренним радиусом около 20 км (рис. 2). Подавляющее большинство объектов, обнаруженных в ходе эксперимента IOEB, подпадают под это описание. Горизонтальные профили скорости таких вихрей во многом зависят от криволинейной траектории дрейфа льдины с ADCP. В зависимости от того, по какой траектории был пересечен вихрь, получают центральные или нецентральные сечения поля скорости.

В ходе эксперимента В92 ЮЕВ были получены близкие к центральным сечениям для очень малого числа вихрей. Такие данные наиболее ценны, поскольку дают максимально возможную информацию об арктических вихрях: их форме и распределении скорости, что позволяет оценить параметры модели, применяемой к частичным данным. На рис. 2 (вверху), представлен галоклинный стационарный антициклон. Скорость перемещения центра вихря составила < 0,4 км/сут. Данные ADCP получены для центрального сечения вихря по всей его глубине. Значимые параметры вихря: максимальная скорость Vmax = 40 см/с на глубине 111 м, диаметр ядра около 12 км, полная глубина порядка 200 м. Сравнение векторов скорости, восстановленных с помощью стримлетной модели, с данными ADCP дает СКО = 4,5 см/с для всех векторов. Общее отклонение составляет порядка 11 %, что вполне сопоставимо с результатами оптимальной интерполяции. Например, аппроксимация выборочных горизонтальных профилей двумерной моделью Рэнкина дает СКО = 4,73 см/с. Конечно, такое сравнение не вполне корректно, поскольку стримлетная модель позволяет восстанавливать трехмерное поле скорости в отличие от модели Рэнкина, которая описывает поле скорости вихря скорости только в одном горизонтальном сечении на



Рис. 2. Примеры арктических вихрей по ADCP IOEB: вверху при центральном прохождении, внизу нецентральное прохождение. Слева: вертикальные профили ADCP B92 IOEB, полученные с 2-часовым интервалом; в центре: горизонтальное сечение поля скорости на глубине максимальной скорости (вверху) на 111 м для вихря с центральным прохождением и (внизу) то же на глубине 126 м для вихря с нецентральным прохождением. ← восстановленные по модели векторы скорости, ← исходные данные ADCP IOEB обоих вихрей, — линия максимальной скорости, – (черный треугольник) горизонтальный профиль скорости. Справа: вертикальное восстановленное сечение поля скорости вихрей. Цветные контуры – данные ADCP, черные линии – изолинии скорости, восстановленные по стримлетной модели

глубине максимальных значений. Тем не менее данный пример позволяет сравнить точность моделей, оставляя преимущество за стримлетной моделью.

Центральное прохождение вихря с помощью ADCP носит случайный характер: специфика натурных измерений предполагает, что дрейфующая льдина произвольно пересекает вихри чаще всего не в центре. На рис. 2 внизу показан пример восстановленного галоклинного вихря с параметрами: $V_{\text{max}} = 37,5$ см/с на глубине
128 м, внутренний диаметр 20 км, полная глубина порядка 260 м. Отклонение восстановленных с помощью стримлетной модели векторов скорости от данных ADCP СКО = 4,38 см/с сопоставимо с интерполяционными моделями, где для данных, аппроксимированных полиномом 3-й степени, СКО = 3,65 см/с, аппроксимированных функцией Бесселя, СКО = 6,17 см/с [3]. При этом неоспоримым преимуществом использования стримлетной модели является возможность восстанавливать (экстраполировать) поле скорости в трех измерениях. Более того, эти интерполяционные модели описывают вихрь в одном горизонтальном сечении, не принимая во внимание данные ADCP на остальных высотах.

Восстановление поля скорости по глубине

Другой важной особенностью стримлетной модели является возможность восстанавливать поле скорости по глубине. Для глубинных галоклинных вихрей, очевидно, поле скорости имеет типичную для таких объектов тороидальную форму, а вертикальные профили скорости ограничены только возможностями измерительных приборов.

Ограничение по вертикали для данных ADCP, полученных в ходе эксперимента B92 IOEB ADCP, составляет 338 м. Приведенный выше пример укладывается в этот диапазон. Но есть и другие случаи: обработка данных показала наличие нескольких затопленных вихрей с максимальными скоростями на глубине порядка 300 м. Стримлетная модель позволяет восстанавливать поле скорости таких вихрей по частичным измерениям. Восстановленное поле скорости для одного из них показано на рис. 3 (вверху). Параметры вихря: Vmax = 20 см/с, Глубина линии максимума скорости V_{max} = 302 м, диаметр ядра 6 – км, нижняя граница порядка – 400 м, СКО = 2,6 см/с.

Для приповерхностных вихрей часть вихря отсекается свободной поверхностью, как показано



Рис. 3. То же, что на рис. 2, но для приповерхностного вихря на глубине 43 м (внизу) и глубинного вихря на 309 м (вверху)

на рис. 3 (внизу). Здесь $V_{\rm max} = 15$ см/с, глубина осевой линии максимума скорости – 43 м, диаметр ядра вихря – 9 км, полная глубина порядка 84 м. Поскольку траектория перемещения буя проходит вблизи центра вихря и дважды пересекает осевую линию, в данном примере наблюдается двойной максимум скорости, как и для эталонного вихря (рис. 2, вверху). Восстановление поля скорости проведено с ошибкой 2,4 см/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены примеры реконструкции (восстановления) трехмерного поля скорости арктических вихрей по частичным измерениям ADCP с помощью стримлетной (потоковой) модели. Данные ADCP представлены в виде вертикальных профилей скорости, измеренных на единственной трассе, произвольно пересекающей вихрь, в общем случае проходящей вдали от его центра. Для глубинных вихрей измерения скорости ограничены по вертикали возможностями измерительных приборов. Восстановление поля скорости по таким данным предполагает экстраполяцию вне области измерений. Подобных

28 ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2019. № 3 (29)

попыток по имеющимся литературным сведениям до сих пор не предпринимались, что объясняется отсутствием пригодной для этого модели вихрей. Представленная в статье параметрическая стримлетная модель позволяет восстанавливать трехмерное поле скорости вихря по ограниченным измерениям, используя хорошо известный алгоритм симплексного спуска Нелдера-Мида. В случае глубинных вихрей возможна реконструкция вихря по вертикали, если в результате измерений ADCP получен частичный профиль скорости, содержащий максимальное значение скорости. Параметры стримлетной модели разделяются на две группы: параметры вертикального сечения и параметры, определяющие форму осевой линии (максимума скорости) вихрей в горизонтальной плоскости. Считается, что все аномалии скорости, выявленные в ходе эксперимента, принадлежат круглым вихрям тороидальной структуры, центр которой определяется однозначно. В рамках дополнительной верификации модели показано, что восстановление поля скорости арктических вихрей на имеющихся измерениях ADCP дает результат, сопоставимый с полиномиальной интерполяцией, которая по определению обеспечивает максимальное приближение для такого типа данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казанский А.В., Шупикова А.А. О структуре поля скорости струйных течений и вихрей в океане // Докл. АН. 2010. Т. 431, № 6. С. 808-812.

2. Honjo S., Takizawa T., Krishfield R. et al. Drifting buoys make discoveries about interactive processes in the Arctic Ocean // EOS trans. AGU. 1995. Vol. 76. P. 209–219.

3. Krishfield R.A., Plueddemann A.J., Honjo S. Eddies in the Arctic Ocean from IOEB ADCP data // Woods Hole Oceanographic Institution. 2002. Technical Report WHOI-2002-09.

4. Timmermans M.L., Toole J., Proshutinsky A. et al. Eddies in the Canada Basin, Arctic Ocean, observed from ice-tethered profilers // J. Phys. Oceanogr. 2008. Vol. 38. P. 133–145.

5. Филюшкин Б.Н., Соколовский М.А., Кожелупова Н.Г., Вагина И.М. О лагранжевых методах наблюдений за внутритермоклинными вихрями в океане // Океанология. 2014. Т. 54, № 6. С. 737–743.

6. Gangopadhyay A., Robinson A.R. Feature-oriented regional modeling of oceanic fronts // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 2002. No. 36. P. 201–232.

7. Kazansky A.V., Shupikova A.A. The theory and observational evidence for streamlets: A new velocity-based feature model of jet streams and eddies in the oceans // ISRN Oceanography. Vol. 2013. Article ID 208616. — URL: http://dx.doi.org/10.5402/2013/208616 (дата обращения: 06.08.2019)

8. Шупикова А.А., Казанский А.В. Верификация стримлетной модели на основе натурных измерений скорости течений в океане // Подводные исследования и робототехника. 2012. № 2 (14). С. 63–68.

9. Meinen C.S., Luther D.S. Comparison of methods of estimating mean synoptic current structure in "stream coordinates" reference frames with an example from the Antarctic Circumpolar Current // Deep-Sea Research. 2003. Vol. 50. P. 201–220.

10. Каменкович В.М., Кошляков М.М., Монин А.С. Синоптические вихри в океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 264 с.

