Обзор алгоритмов обнаружения и трекинга мезомасштабных вихрей

П.С. Петкилев

Балтийский федеральный университет имени И. Канта, Калининград, 236016, Россия E-mail: petkilev.pavel@yandex.ru

Представлен обзор наиболее известных и широко используемых в океанологической практике алгоритмов обнаружения и трекинга вихрей. Рассматриваемые алгоритмы классифицированы на типы (физические, геометрические, смешанные) и приводятся в условно хронологическом порядке. Изложены основные принципы этих алгоритмов, исходные данные для их применения, проанализированы их основные достоинства и недостатки. Помимо этого, для некоторых алгоритмов приводятся показатели их эффективности. Показано, что успехи в направлении создания и совершенствования алгоритмов обнаружения и трекинга привели к существенному развитию представлений о распределении и динамике мезомасштабных вихрей в Мировом океане. Также показано, что разнообразие используемых в алгоритмах методов дает возможность рационального выбора конкретного алгоритма исходя из исследовательских целей и имеющихся ресурсов. Проанализированы факторы, сдерживающие развитие этих алгоритмов и их внедрение в исследовательскую практику. Сделаны выводы о перспективах и направлении развития этих алгоритмов в будущем. В работе также содержатся краткие сведения о полученных на основе применения алгоритмов обнаружения и трекинга открытых массивах данных, содержащих информацию о распределении мезомасштабных вихрей в Мировом океане.

Ключевые слова: мезомасштабные вихри, алгоритмы, обнаружение и трекинг, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 21.03.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-27-47

Введение

Мезомасштабные (синоптические) вихри являются важным фактором горизонтального и вертикального водообмена, влияют на пространственное распределение океанологических параметров, а также оказывают значительное влияние на биопродуктивность (Жмур, 2011).

Возникновение спутниковой океанологии, предоставившей снимки обширных акваторий океанской поверхности, поставило вопрос о выделении динамических структур различного масштаба в получаемых данных. Для вихрей как замкнутых образований разрабатывались собственные критерии и алгоритмы обнаружения. Последующее стремительное развитие спутниковой океанологии, в частности альтиметрических продуктов, а также рост доступных вычислительных мощностей инициировали бурное развитие автоматических алгоритмов обнаружения (АО) и трекинга (отслеживания) вихрей (далее – АТ).

Важное значение АО и АТ заключается в переходе от анализа площадных характеристик (дедуктивный подход) вихревых процессов (кинетическая энергия вихрей, вихревая диффузия и др.) к анализу параметров конкретных вихрей (индуктивный подход); при таком переходе фактически образуется связующее звено между моделированием и натурными исследованиями.

Актуальность настоящей работы определяется традиционно высоким интересом к вихрям и их динамике со стороны отечественной океанологии, а также устойчивым ростом значения автоматического выделения объектов океанской циркуляции для спутникового мониторинга процессов на поверхности океана (Алексанин, Алексанина, 2004).

Обзор алгоритмов

На сегодняшний день существует обширный список принципиально различных АО, основные и наиболее используемые из которых будут приведены и описаны ниже. В то же время большинство АТ имеют в своей основе один и тот же принцип, различаясь лишь в деталях. В связи с этим в настоящей работе будет приведено описание всего двух А с указанием их детальных отличий, в то время как основное внимание будет уделено описанию АО.

Несмотря на все свое многообразие, с точки зрения своей сути, АО могут быть классифицированы по трем условным группам: физические, геометрические и смешанные (Nencioli et al., 2010). В физических АО при выделении вихрей используется критерий, напрямую рассчитанный из значений исходного поля. В геометрических АО при выделении вихрей анализируются только геометрические характеристики изолиний исходного параметра. В свою очередь, в смешанных алгоритмах вихри выделяются на основе как физических значений, так и геометрических характеристик исходного поля.

В качестве исходных данных для обнаружения и трекинга вихрей, в зависимости от конкретного алгоритма, используются различные спутниковые или модельные данные. Наиболее часто используемыми при этом являются данные спутниковой альтиметрии.

Физические алгоритмы

Одним из ранних АО, широко применяемым вплоть до настоящего времени, является алгоритм Окубо-Вейсса (Okubo, 1970; Weiss, 1991), методическая основа которого была изначально разработана для исследования турбулентности жидкости. Суть данного АО заключается в расчете параметра Окубо-Вейсса (*W*) на основе имеющегося поля скорости течений:

$$W = s_n^2 + s_s^2 - \omega^2,$$

где s_n , s_s – нормальная и касательная компоненты деформации, ω – относительная завихренность потока.

Данные компоненты могут быть рассчитаны на основе градиентов, составляющих поля скорости:

$$s_n = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}; \ s_s = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}; \ W = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y},$$

где *и*, *v* – широтная и долготная компоненты скорости (Viikmäe, Torsvik, 2013).

Расчеты параметра W показали (Isern-Fontanet et al., 2006), что на большей части акваторий океана $W \approx 0$, что означает отсутствие каких-либо выраженных структур. Облас-

ти со значениями W < 0 идентифицируются как вихри, поскольку в них доминирует компонента завихренности.

Существенным недостатком данного метода является необходимость выделения порогового значения W_0 , которое является отсчетным для выделения вихрей, так как обычно W достаточно малы. При этом оказывается невозможным выбор оптимального W_0 для всего Мирового океана, вследствие того, что его различные регионы обладают заведомо различной вихревой активностью. Согласно (Chelton et al., 2011), выбор слишком больших значений W_0 ведет к огрублению результатов работы алгоритма и отсеиванию значительной части вихрей, в то время как выбор слишком малых значений W_0 ведет к резкому увеличению количества вихрей и серьезной переоценке их размеров. Следствием данного недостатка является неоднозначность алгоритма Окубо-Вейсса при выделении вихрей с низкими скоростями вращения, для которых характерны малые значения W (Viikmäe, Torsvik, 2013).

Также возможны ситуации, при которых поле параметра W оказывается сильно зашумленным, что может серьезно затруднить интерпретацию и выделение вихрей. Так, согласно выполненной в работе (Chaigneau et al., 2008) оценке эффективности, алгоритм Окубо-Вейсса обнаруживает в среднем 86,8% имеющихся на тестовых полях вихрей. При этом средняя доля неподтвержденных (здесь и далее под данным термином подразумеваются вихри, обнаруженные только алгоритмом) вихрей оказалась очень высока и составила 63,3%, что свидетельствует о проблематичности и ненадежности использования данного алгоритма в исходном виде без каких-либо модификаций.

При использовании алгоритма Окубо-Вейсса в работе с данными спутниковой альтиметрии сильное зашумление поля W оказывается неизбежным, поскольку происходит суммирование погрешностей исходных данных с погрешностями, возникающими при их последующих преобразованиях (Chelton et al., 2011). Дополнительной проблемой данного алгоритма является также возможное несовпадение контуров параметра W и контуров исходных альтиметрических данных. Подробный анализ причин данной проблемы и ее особенностей приводится в работе (Chelton et al., 2011).

Алгоритм Окубо-Вейсса стал первым АО, примененным к данным спутниковой альтиметрии для обнаружения вихрей в рамках работы (Fang, Morrow, 2003). Несмотря на свои недостатки, данный алгоритм широко использовался для региональных исследований мезомасштабных вихрей, например в работах (Morrow et al., 2004; Penven et al., 2005). Знаковым исследованием, выполненным на основе модифицированного алгоритма Окубо-Вейсса, стала работа (Chelton et al., 2007), в которой на основе альтиметрических данных исследовались мезомасштабные вихри всего Мирового океана. Предложенная в рамках данной работы модификация алгоритма Окубо-Вейсса заключалась в пространственном сглаживании исходных данных значений *W*. Детальное описание данного метода и полученных на его основе результатов приводится в работе (Chelton et al., 2007, 2011).

В работе (Chelton et al., 2007) критерием эффективности модифицированного алгоритма Окубо-Вейсса считался процент дисперсии поля высоты уровня моря, описываемого выделенными вихрями. Отмечается, что в районах интенсивной вихревой динамики выделенные с помощью модифицированного алгоритма вихри описывают более 50% этой дисперсии. Учитывая, что поле высоты уровня моря определяется, помимо вихрей, целым рядом процессов и явлений широкого спектра масштабов, а также принимая во внимание погрешности исходных данных и другие факторы, результаты работы модифицированного алгоритма исследователи оценили как состоятельные (Chelton et al., 2007).

Другим ранним физическим AO, идейно близким к предыдущему, является алгоритм относительной завихренности, предложенный в работе (McWilliams, 1990). Критерием выделения вихрей является замыкание изолиний относительной завихренности в эллиптический контур. Сведения об эффективности не приводятся.

Существенному усложнению более поздних АО сопутствовал рост их возможностей. Предложенный в работе (Doglioli et al., 2007) оригинальный АО на основе вейвлетанализа поля завихренности (2-D Wawelet analysis method) позволил получить существенно менее зашумленное и более однозначно интерпретируемое поле, по сравнению с АО Окубо-Вейсса. Точность данного АО также оказалась значительно лучше. При этом на основе используемого метода проводился также трекинг вихрей, что позволяет использовать данный метод для последующего АТ.

Оценка эффективности алгоритма проводилась на основе сопоставления положения идентифицированных вихрей с особенностями распределения термохалинных характеристик соответствующей акватории, а также сравнения параметров идентифицированных вихрей с результатами, полученными на основе натурных исследований вихрей. По итогам процедуры авторами отмечается высокая эффективность алгоритма. В то же время серьезным недостатком изложенной в работе (Doglioli et al., 2007) процедуры оценки эффективности можно считать малую репрезентативность тестовой выборки, состоящей из нескольких вихрей.

Среди ограничений данного метода, помимо многоступенчатости и сложной реализации, можно отметить выделение кроме вихрей также филаментов и других вытянутых в одном направлении структур (*puc. 1*).

Промежуточным результатом, достигнутым приблизительно к 2012 году, стало бурное совершенствование всех групп АО и АТ. Серьезным препятствием для оценки влияния мезомасштабных вихрей на тепло- и массообмен в Мировом океане было отсутствие репрезентативных данных об их вертикальной структуре, глубине проникновения и геометрической форме. В связи с этим значительные усилия исследователей были направлены на разработку АО и АТ, способных давать информацию о мезомасштабных вихрях и их параметрах в толще океана.

Ранние попытки таких исследований предпринимались для изучения мезомасштабных вихрей на локальных акваториях (Doglioli et al., 2007; Colas et al., 2011; Dong et al., 2012). Первой работой, посвященной изучению вертикальных характеристик мезомас-



Рис. 1. Поле относительной завихренности в районе Юго-Западной Африки, рассчитанное по методу 2-D Wawelet analysis, полученное в работе (Doglioli et al., 2007)

штабных вихрей Мирового океана в целом, стала работа (Petersen et al., 2013). При этом в качестве исходных использовались данные скоростей течений, полученные на основе моделирования. Подробное описание этих данных приводится непосредственно в работе (Petersen et al., 2013).

В основу данной работы положен R^2 -алгоритм, предложенный ранее в работе (Williams et al., 2011), который основан на расчете параметра Окубо-Вейсса (W) и его последующих математических преобразованиях. Данный алгоритм делит мезомасштабные вихри, выявленные на основе расчета параметра W согласно алгоритму Окубо-Вейсса, по нескольким группам на основе сходства их параметров с моделью идеального Гауссового вихря (Williams et al., 2011), распределение параметров которых заранее известно. В частности, для Гауссового вихря значение W линейным образом меняется по мере удаления от центра этого вихря. В результате для каждого вихря, выявленного алгоритмом Окубо-Вейсса, рассчитывается коэффициент детерминации R^2 :

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (a_{i} - f_{i})^{2}}{\sum_{i=1}^{N} (a_{i} - \overline{a})^{2}}$$

где a_i – площадь внутри контура W мезомасштабного вихря, f_i – линейная функция наилучшей аппроксимации площади контура W, \bar{a} – средняя площадь внутри контура W мезомасштабного вихря.

Значение R^2 фактически показывает, насколько хорошо вихрь, обнаруженный по значениям W, соответствует идеальному Гауссовому вихрю. При $R^2 = 1$ имеет место полное совпадение наблюдаемого и идеального вихрей. В результате имеется возможность

задания порогового значения R^2 , которое отсеивает «неидеальные» вихри – например сильно вытянутые структуры неправильной формы. В работе (Petersen et al., 2013) при исследовании глобального распределения мезомасштабных вихрей и их параметров, в качестве порогового было принято значение $R^2 = 0,90$.



Рис. 2. Обнаружение вихрей в районе течения Куросио на основе R²-алгоритма (Petersen et al., 2013): а) вихри в поле параметра W; б) Вихри, прошедшие отсев на основе R². Цветом выделены различные уровни значимости R²

Несомненным преимуществом данного алгоритма, по сравнению с оригинальным алгоритмом Окубо-Вейсса, является математическая формализация критерия выбора порогового значения. В результате R^2 -алгоритм позволяет обнаруживать вихри на основе их соответствия идеальному Гауссовому вихрю, в отличие от труднообъяснимого выбора порогового значения W в оригинальном алгоритме Окубо-Вейсса. Пример работы R^2 -алгоритма, а именно поля W и анализа полученных вихрей по R^2 , приводится на *рис.* 2.

Сравнение количества идентифицируемых вихрей при разных пороговых значениях R^2 показало, что из исходного числа вихрей (10,9 млн, обнаруженных на основе параметра *W*) отбираются 5,8 млн (53%) при $R^2 = 0,80$ и 2,4 млн (22%) при $R^2 = 0,95$ (Petersen et al., 2013). Большая часть отсеянных вихрей имеет малые размеры (диаметр менее 20 км). Таким образом, использование различных пороговых значений R^2 дает возможность получить массивы данных о вихрях различной детализации. Оценки эффективности данного алгоритма в работе (Petersen et al., 2013) не приведены.

Замечательным свойством R^2 -алгоритма является возможность его применения для вертикального анализа толщи океана с целью обнаружения вихрей путем простой замены параметра a_i (площади) на c_i (объем) при неизменности остальных составляющих уравнения. Особенности трехмерной реализации R^2 -алгоритма подробно изложены в работе (Petersen et al., 2013). Процедура трекинга для R^2 -алгоритма основана на сопоставлении размеров и местоположения вихрей на соседних участках времени. Подробности процедуры трекинга описаны в работах (Williams et al., 2011; Petersen et al., 2013).

Фактически R^2 -алгоритм, являющийся по сути глубокой модернизацией алгоритма Окубо-Вейсса, нивелирует подавляющую часть недостатков алгоритма Окубо-Вейсса, а также дает возможность анализа трехмерной структуры вихрей. Тем не менее использование в качестве исходных данных скоростей течений препятствует использованию R^2 -алгоритма для работы напрямую с данными альтиметрии (использование скоростей, рассчитанных по альтиметрии, согласно (Chelton et al., 2011) не является желательным). Стоит отметить, что R^2 -алгоритм в работе (Petersen et al., 2013) использовался для анализа данных по скоростям течений, полученных на основе моделирования. Недостатком данного алгоритма является также сильная зависимость получаемых с его помощью результатов (особенно анализа вертикальной структуры вихрей) от качества исходных данных, особенностей моделей, степени их детализации и других параметров.

Другим направлением исследований стали попытки использования данных альтиметрии напрямую, без расчета по ним полей скорости (или использования этих полей лишь во вспомогательных целях), которые предпринимались в работах (Isern-Fontanet et al., 2003; Chaigneau, Pizarro, 2005). При этом для идентификации вихря использовались специально подобранные пороговые значения анализируемых параметров.

В работе (Isern-Fontanet et al., 2003) для обнаружения вихрей использовался алгоритм (I-S-03), основанный на расчете параметра Q, значения которого пропорциональны высоте уровенной поверхности океана. Центры вихрей идентифицировались по локальным экстремумам параметра Q, а их контуры – путем расчета порогового значения Q относительно этих экстремумов. Согласно (Isern-Fontanet et al., 2003), положительным свойством алгоритма является его ожидаемая независимость от особенностей исходного поля, таких как его сезонные колебания. В результате относительная простота алгоритма и возможность использования напрямую для данных альтиметрии являются его преимуществами. Тем не менее полученные результаты продемонстрировали возможность успешного применения данного алгоритма для обнаружения мезомасштабных вихрей только при условии привлечения вспомогательных данных, поскольку проблема отбраковки неподтвержденных вихрей и уточнения границ успешно выделенных вихрей систематически возникала в ходе исследования. Сведения об эффективности алгоритма не приводятся.

В работе (Chaigneau, Pizarro, 2005) для идентификации вихрей по данным аномалиям уровня океана использовалось пороговое значение ±6 см, которое было выбрано на основе анализа распределения статистических характеристик поля аномалий уровня. Таким образом, в данном алгоритме (CP-05) все замкнутые области, ограниченные изолиниями ±6 см, определялись как вихри. Оценка эффективности алгоритма проводилась на основе сопоставления характеристик идентифицированных вихрей с характеристиками, полученными в ходе натурных исследований, и позволила авторам (Chaigneau, Pizarro, 2005) судить о его надежности. Других сведений об эффективности алгоритма не приведено.

Стоит отметить, что использование аномалий уровня океана в качестве исходных данных для обнаружения и отслеживания вихрей имеет некоторые существенные недостатки. Примером является появление ложных сигналов в поле аномалий уровня океана вследствие особенностей интерполяции вдольтрековых данных альтиметрии (Xu et al., 2009). Другой проблемой является недостаточное пространственное разрешение альтиметров, следствием чего являются неточности в разрешении мезомасштабных структур (Le Traon, 2013). Помимо инструментальных и интерполяционных ошибок, при использовании аномалий уровня возможна ошибочная идентификация в качестве вихрей структур другой природы, например, меандров течений. Относительно упомянутых выше работ, основанных на использовании аномалий уровня, в исследовании (Isern-Fontanet et al., 2003) сведений о применении специальных процедур для редуцирования погрешностей исходных данных не содержится, в то время как в работе (Chaigneau, Pizarro, 2005) к исходным данным применялась дополнительная фильтрация.

Таким образом, описанные выше алгоритмы основаны на физических характеристиках – полях скорости, завихренности и др., и согласно предложенной в (Sadarjoen, Post, 2000) классификации могут быть классифицированы как физические. Примечательно, что, несмотря на бурное развитие АО в целом, алгоритм Окубо-Вейсса, вследствие своей простоты, продолжает широко использоваться как в исходном виде, так и при создании новых АО (например, является основой для R^2 и Wawelet алгоритмов). Главной причиной столь устойчивого интереса к алгоритму Окубо-Вейсса являются широкие возможности нивелирования его недостатков при помощи ввода, например, дополнительных статистических процедур.

Геометрические алгоритмы

Принципиально другими являются геометрические алгоритмы, которые основаны на геометрических характеристиках изолиний параметров без учета их абсолютных значений. Характерным примером геометрических алгоритмов является алгоритм Центров Кривизны (The Curvature Centre Method), изложенный в (Sadarjoen, Post, 2000). С помощью данного алгоритма анализируется поле изолиний определенного физического параметра. С точки зрения данного алгоритма, все изолинии рассматриваются как кривые, и для ка-

ждой точки этих изолиний строятся радиусы кривизны. Радиус кривизны по определению совпадает с радиусом соприкасающейся окружности в данной точке кривой. При этом центр этой окружности называется центром кривизны (*puc. 3*). Основная идея алгоритма заключается в том, что для замкнутых изолиний, характеризующих вихри, центры кривизны для всех точек этих изолиний совпадут (*puc. 3a*). В противоположном случае центры кривизны для разных участков изолинии не совпадут (*puc. 3b*). При равенстве кривизны кривой нулю соприкасающаяся окружность вырождается в прямую.



Рис. 3. Принцип действия алгоритма Центров Кривизны по (Sadarjoen, Post, 2000): а) для замкнутых изолиний центры кривизны их разных участков совпадают; б) в остальных случаях центры кривизны для разных участков изолиний не совпадают

На основе полученных на данном этапе центров кривизны рассчитывается новое поле характеристик этих центров, отражающих наличие или отсутствие вихрей. Существенный недостаток метода – проблемная идентификация вихревых диполей, а также вытянутых эллиптических вихрей. Информация об эффективности данного алгоритма отсутствует. Пример результатов использования данного алгоритма для поля поверхностных скоростей Северо-Восточной части Тихого океана представлен на *рис. 4*.



Рис. 4. Поле плотности центров кривизны – результат применения алгоритма Центров Кривизны к данным по распределению поверхностных скоростей в Северо-Восточной части Тихого океана (Zhu, Moorhead, 1995; Sadarjoen, Post, 2000)

Значительно более широкое распространение получил геометрический алгоритм Углов Вращения – Winding Angle (далее – *WA*), предложенный в работе (Sadarjoen, Post, 2000). Идея алгоритма состоит в том, что индикатором вихря служат изолинии физического параметра, образующие замкнутые контуры в течение нескольких шагов их расчета. Суть алгоритма заключается в представлении каждой изолинии в виде сегментов, рассчитываемых от начальной точки изолинии, при этом количество этих сегментов равно пространственному шагу сетки (*puc. 5*).



Рис. 5. Принципиальная схема составляющих алгоритма Winding Angle no (Viikmäe, Torsvik, 2013). P₁₋₆ – сегменты изолинии, α₂₋₅ – углы вращения между отдельными сегментами изолинии

Угол вращения (*WA*) изолинии от начальной ее точки P_1 рассчитывается как кумулятивная сумма углов (α) между соседними сегментами ($P_2...P_n$) этой изолинии:

$$WA = \sum_{j=2}^{N-1} \alpha_j.$$

Значение WA > 0 характерно для кривых с вращением против часовой стрелки, в то время как WA < 0 ассоциируются с кривыми с вращением по часовой стрелке. Критерием выделения вихрей является выполнение соотношения $|WA| \ge 2\pi$ (Sadarjoen, Post, 2000). В качестве критерия обнаружения и трекинга вихрей в АОТ требуется соблюдение уже двух условий: $|WA| = k \cdot 2\pi$, где $k \ge 1$, а также относительно небольшое расстояние между начальной и конечной точкой изолинии.

Для данного алгоритма характерна высокая точность, а также возможность его использования в качестве основы для АТ. Также данный алгоритм не требует введения пороговых значений обнаружения вихря, в отличие от алгоритмов, основанных на физических параметрах. По итогам оценки эффективности данного алгоритма, выполненной в работе (Chaigneau et al., 2008), для выборки из 50 полей исходных данных на основе сопоставления идентифицированных алгоритмом вихрей с вихрями, обнаруженными экспертами, алгоритм обнаруживает в среднем 92,7% имеющихся на тестовых полях вихрей. При этом средняя доля неподтвержденных вихрей составила 18,7%.

Тем не менее его использование требует значительно больших вычислительных мощностей, по сравнению, например, с алгоритмом Окубо-Вейсса (Viikmäe, Torsvik, 2013). Другим недостатком данного метода, отмеченным в работе (Chelton et al., 2011), является его неспособность редуцировать зашумленность и погрешности исходных данных альтиметрии, что потенциально может вести к неточностям обнаружения и отслеживания вихрей. Примером использования данного АО в отечественной океанологии является работа (Кубряков и др., 2016). Алгоритм *WA*, адаптированный для прибрежных вод, также использовался в работах (Kubryakov, Stanichny, 2015а, 2015b).

В результате геометрические алгоритмы идейно противоположны физическим. Независимость данных алгоритмов от абсолютных значений физических параметров является их серьезным преимуществом, которое уравновешивается высокими требованиями к вычислительным мощностям, дискретности исходных данных и метода их интерполяции, а также другими особенностями.

Смешанные алгоритмы

Появление смешанных алгоритмов обусловлено стремлением исследователей объединить достоинства и редуцировать недостатки геометрических и физических алгоритмов. В результате смешанные алгоритмы соединяют вместе черты и подходы геометрических и физических алгоритмов.

Алгоритм доминантной ориентации термического контраста (ДОТК), предложенный в (Алексанин, Алексанина, 2004) и развитый в серии работ (Алексанин, Загуменнов, 2008; Алексанин, Загуменнов, 2011), идейно близок алгоритму Центров Кривизны. В качестве данных для алгоритма используются спутниковые ИК-изображения. Согласно (Алексанин, Алексанина, 2004), для ИК изображений поверхности океана доминантная ориентация термического контраста (ДОТК) является касательной к статистически значимой изотерме в заданной окрестности точки поля. Поскольку ДОТК имеют высокую корреляцию с направлениями поверхностных течений, пересечение ортогоналей к доминантам будет точкой центра вихря. Характерный размер вихря при этом задается исследователем. В данном алгоритме форма вихря может аппроксимироваться как определенным геометрическим объектом (эллипсоидом), так и произвольной фигурой, за счет дополнительного расчета оптимальной границы вихря.

При разработке данного алгоритма было уделено значительное внимание его эффективности, которая подробно анализируется в работе (Алексанин, Загуменный, 2011). Показано, что при тонкой настройке (выборе оптимального характерного размера вихря и др.) алгоритм обнаруживает подавляющее большинство вихрей (94%). При менее тщательной настройке (выборе малого характерного размера вихря) данный алгоритм способен в несколько раз увеличивать список ложно выделенных объектов. В результате, согласно (Алексанин, Загуменнов, 2011), задача автоматического выделения вихрей на основе ДОТК алгоритма решается с высокой надежностью и близка по эффективности к результатам дешифрирования изображений экспертом. Основной проблемой является отбраковка ложно выделенных объектов, к которым могут быть отнесены, в том числе и мелкие, вихри. При этом даже тонкая настройка критериев отбраковки не гарантирует полного исключения ложных объектов. Тем не менее использование даже простых критериев отбраковки способно серьезно улучшить качество трекинга вихрей.

Таким образом, данный алгоритм обладает довольно сложной структурой критериев и их расчетов, требует тонкой настройки и отбраковки ложных вихрей. Несомненным

плюсом данного алгоритма является возможность его использования в исследовании локальных акваторий и выделении субмезомасштабных структур. Примеры других алгоритмов, работающих с данными ИК-изображений, приведены в работе (Алексанин, Загуменнов, 2011).

В последующие годы были предложены новые алгоритмы. В числе заслуживающих отельного внимания можно выделить алгоритм Векторной Геометрии (Vector Geometry Based Eddy Detection Algorithm – далее VG), разработанный и описанный в рамках работы (Nencioli et al., 2010). Данный алгоритм используют для выделения вихрей на основе данных по скоростям течений. В оригинальной работе (Nencioli et al., 2010) эти данные были получены на основе моделирования и при помощи радарной съемки. В основе VG-алгоритма лежат несколько критериев анализируемого поля:

- 1. Поле скоростей вихря образует замкнутый контур.
- 2. Минимум скорости внутри замкнутого контура соответствует центру вихря.
- 3. Наблюдается постепенный рост скоростей по мере удаления от центра вихря.

Оценка эффективности алгоритма выполнялась при различных вариантах его настройки путем идентификации вихрей на случайно отобранных десяти полях исходных данных и сравнения полученных результатов с результатами ручного дешифрования. Было получено (Nencioli et al., 2010), что при оптимальных настройках алгоритма им обнаруживается, в среднем, 92,9% вихрей из числа имеющихся на тестовых полях. Средняя доля обнаруживаемых алгоритмом неподтвержденных вихрей при аналогичных настройках составляет 2,9% от общего количества вихрей, имеющихся на тестовых полях (Nencioli et al., 2010).

Преимуществом данного алгоритма является его относительная простота и интуитивность, однако использование поля скорости в качестве исходных данных затрудняет его применение на основе альтиметрических данных, поскольку скорости, рассчитанные по альтиметрии, неизбежно внесут погрешности в итоговые результаты.

ДОТК и VG алгоритмы были разработаны в рамках исследований локальных акваторий океана. Отличительной особенностью алгоритмов, описанных далее, является их разработка и последующее успешное применение для обнаружения и трекинга вихрей в масштабах всего Мирового океана.

В работе (Chelton et al., 2011) был предложен алгоритм обнаружения вихрей (далее – алгоритм Челтона), идейно близкий к методу, использованному в упомянутых выше работах (Fang, Morrow, 2003; Chaigneau, Pizarro, 2005). Важнейшее значение алгоритма Челтона в мировой океанологии обусловлено появлением на его основе свободно доступных данных о распределении мезомасштабных вихрей в Мировом океане.

Алгоритм Челтона использует в качестве исходных данных сглаженные альтиметрические данные по аномалиям уровня океана. В результате сглаживания и остальных преобразований (которые в итоге редуцируют часть недостатков исходных массивов аномалий уровня) анализу по алгоритму Челтона подвергаются преобразованные данные аномалий уровня океана на регулярной сетке с шагом 0,25° с недельной временной дискретностью. Описание исходных данных, процедура сглаживания и детали алгоритма приводятся в работе (Chelton et al., 2011).

В основу алгоритма заложено разделение анализируемого поля аномалий уровня на пиксели (квадраты со стороной 0,25°) и последующее выделение на их основе мезомасштабных вихрей. Алгоритм выделяет вихри как скопления пикселей, удовлетворяющих ряду обязательных критериев, таких как компактность, наличие экстремума аномалии уровня внутри этого скопления, согласованность значений аномалий внутри контура этого скопления со знаком его экстремума. Также ограничивался максимальный (1000 пикселей) и минимальный (8 пикселей) размер вихря и его минимальная амплитуда (1 см).

Трекинг вихрей, полученных на основе алгоритма Челтона, осуществлялся на основе АТ, согласно которому для каждого вихря, обнаруженного в момент времени k, проводился поиск ближайшего вихря в момент времени k + 1. Поиск проводился внутри области поиска, которая определялась на основе ряда условий (Chelton et al., 2011). С целью избежать ошибок, связанных с объединением в один трек генетически разных вихрей, был введен дополнительный критерий, согласно которому разница в амплитудах одного и того же вихря в соседние моменты времени должна была удовлетворять определенному диапазону соотношений. Анализ ошибок, проведенный до и после фильтрации (Chelton et al., 2011), показал, что подавляющее большинство треков итогового массива являются надежными. При этом надежность установленных параметров вихрей, вследствие их независимости от траекторий движения, согласно (Chelton et al., 2011), была определена как еще более высокая.

Использованный в работе (Chelton et al., 2011) АТ был практически аналогичен использованному в работе (Chelton et al., 2007). Сопоставление итоговых результатов этих работ в виде сравнения статистических показателей по обнаруженным вихрям (Chelton et al., 2011), показало намного более высокую эффективность алгоритма Челтона, по сравнению с модифицированным алгоритмом Окубо-Вейсса, использованным в (Chelton et al., 2007). В частности, по итогам сопоставления алгоритм Челтона выделил в несколько раз больше вихрей, чем алгоритм Окубо-Вейсса из работы (Chelton et al., 2007): 21671 единица против 11174 единицы соответственно. Для вихрей со временем существования в один год и более эта разница становится уже пятикратной (Chelton et al., 2011). Полученные результаты позволили утверждать (Chelton et al., 2011), что эффективность алгоритма Челтона серьезно превышает аналогичный параметр алгоритма Окубо-Вейсса из работы (Chelton et al., 2007). Других оценок эффективности в работе (Chelton et al., 2011) не приведено.

В результате, несмотря на свою сложность, алгоритм Челтона редуцирует широкий спектр ошибок и погрешностей исходных альтиметрических данных, не требует определения порогового значения аномалии уровня, а также избегает трудно интерпретируемых ситуаций несовпадения геометрических контуров исходных данных и контуров, полученных в ходе применения алгоритма. Помимо этого, к сильным сторонам данного алгоритма можно отнести его глубокую теоретическую проработку. Тем не менее алгоритм имеет ряд недостатков, таких как тенденция к ложному слиянию близлежащих относительно друг друга вихрей, следствием которой становится недооценка времени их существования. Данные о положении и характеристиках мезомасштабных вихрей Мирового океана на основе алгоритма Челтона находятся в свободном доступе (http://wombat.coas.oregonstate. edu/eddies_May2013/). Данный массив содержит информацию о вихрях со временем существования не менее четырех недель (введение данного порога направлено на удаление ложных вихрей).

В июле 2016 г. была представлена модифицированная версия алгоритма Челтона и сформированный на ее основе массив данных о положении и характеристиках мезомасштабных вихрей. Модификация алгоритма была проведена на основе использования некоторых принципов алгоритма, изложенного в работе (Williams et al., 2011) путем частичного изменения условий обнаружения и трекинга вихрей. Появление модифицированной версии алгоритма Челтона может служить сигналом новой тенденции к унификации алгоритмов. Подробная информация о модифицированном алгоритме Челтона, а также массив данных, сформированный на его основе, находятся в открытом доступе (http:// wombat.coas.oregonstate.edu/eddies/index.html).

Один из наиболее новых алгоритмов (далее – алгоритм Фагмуса) был предложен в работе (Faghmous et al., 2015). Данный алгоритм также стал основой для открытого массива данных о мезомасштабных вихрях Мирового океана. Алгоритм Фагмуса использует в качестве исходных альтиметрические данные аномалий уровня океана ежедневной дискретности на регулярной сетке с разрешением 0,25°. Данный алгоритм имеет в основе предпосылку о существовании и единственности экстремума (максимума или минимума) аномалии уровня внутри вихря. Границей вихря считается наиболее удаленный от экстремума замкнутый контур. Экстремум аномалии уровня соответствует пикселю, содержащему минимальное или максимальное значение данного параметра, по сравнению со значениями соседних 24 пикселей, образующих квадрат со стороной в 5 пикселей (*рис. 6*, левая панель).

После определения экстремумов алгоритм определяет вихрь и его границы исходя из предположения о единственности экстремума внутри замкнутого контура, наиболее удаленного от этого экстремума. Процедура определения вихря и его границ выполняется пошагово до тех пор, пока хотя бы один из двух критериев определения вихря не будет нарушен (*рис. 6*, правая панель). Если происходит нарушение хотя бы одного из критериев, алгоритм возвращает положение границы вихря, определенное на предыдущем шаге. Алгоритм Фагмуса имеет шаг аномалии уровня равный 0,05 см, что является минимальным из имеющихся на сегодняшний день пороговым значением обнаружения вихря (для сравнения – аналогичное значение для алгоритма Челтона составляет 1 см). Нижний порог обнаружения вихря составляет 4 пикселя.

Как было отмечено выше, большинство АТ основаны на общем принципе и различаются лишь в деталях. Использованный в рамках алгоритма Фагмуса АТ также-соответствует АТ, использованному в рамках алгоритма Челтона, но отличается некоторыми деталями своей настройки. Схематическое изображение процедуры трекинга представлено на *рис.* 7.



Рис. 6. Схематическая иллюстрация обнаружения вихрей алгоритмом Фагмуса (Faghmous et al., 2015). Левая панель – схема определения экстремума аномалии уровня. Правая панель – схема обнаружения мезомасштабного вихря и определения его границ: а) определение экстремумов;
b-d) идентификация вихря и последующее обнаружение его границ путем анализа экстремумов;
e) на данном этапе нарушается предположение о единственности экстремума внутри вихря, что запускает процесс возврата к ранее полученному контуру; f) итоговый контур вихря



Рис. 7. Схема процедуры трекинга, использованная при алгоритме Фагмуса (Faghmous et al., 2015). По горизонтальной оси отложены шаги по времени, по вертикальной – этапы трекинга. По итогам первого этапа имеется набор вихрей, обнаруженных в исходных данных. На втором этапе вихри соединяются в трек, при этом происходит выбор из двух вариантов на шаге t₃, отсутствие вихря на шаге t₄ ведет к включению в трек вихря из шага t₅ вследствие удовлетворения соответствующим критериям, а отсутствие вихрей на шагах t₆ и t₇ свидетельствует о прекращении трека на шаге t₅. Третий этап – финальный вид трека вихря

При реализации алгоритма Фагмуса в работе (Faghmous et al., 2015) было значительное внимание уделено оценке его эффективности. Эффективность алгоритма оценивалась на основе многоступенчатой процедуры анализа полученных на его основе результатов. Так, привлекались дополнительные спутниковые данные по ТПО и скоростям поверхностных течений, распределение значений которых сопоставлялось с результатами работы алгоритма, что позволило авторам работы (Faghmous et al., 2015) судить о соответствии обнаруживаемых вихрей реальным вихрям океана. Помимо этого, проводился экспертный контроль результатов работы алгоритма, суть которого состояла в сравнении количества вихрей, обнаруженных данным алгоритмом и группой из семи ученых-океанологов на основе одних и тех же исходных данных. В итоге, эксперты обнаружили 27 вихрей из 33, в то время как алгоритм Фагмуса успешно идентифицировал все присутствующие вихри. Третьей ступенью контроля результатов алгоритма Фагмуса стало его тестирование на данных климатической модели (GFDL CM2,5 High-Resolution Coupled Climate Model). Дополнительные сведения об эффективности алгоритма отсутствуют. Вопрос борьбы с недостатками аномалий уровня в качестве исходных данных в работе (Faghmous et al., 2015) подробно не освещается.

Таким образом, несомненным преимуществом алгоритма Фагмуса является тщательная процедура его валидации, детали которой изложены в (Faghmous et al., 2015). Помимо высокой точности и подробности, среди положительных сторон алгоритма Фагмуса также можно отметить его устойчивость к ложному слиянию близлежащих относительно друг друга вихрей, оценку геометрической формы вихрей, устойчивость к «потере» вихрей при их трекинге (Faghmous et al., 2015). В результате алгоритмы Челтона и Фагмуса представляют собой непараметрический тип алгоритмов, способный идентифицировать вихри исходя только из экстремумов исходных данных.

Особенности настройки алгоритма Фагмуса (а именно выбор всего двух критериев, на основе которых выполняется обнаружения вихря) привели к тому, что итоговый массив вихрей, полученных в результате работы данного алгоритма, содержит информацию о значительно большем количестве вихрей разного масштаба, по сравнению с массивом Челтона. Также массив Фагмуса, подробно описанный в (Faghmous et al., 2015), содержит дополнительные характеристики вихрей (например, геометрическую форму вихря), которые отсутствуют в массиве Челтона. Тем не менее малое число критериев обнаружения вихря ведет к многократному увеличению числа идентифицируемых вихрей, по сравнению с массивом Челтона, что затрудняет анализ при работе с массивом Фагмуса.

Таким образом, массивы Челтона и Фагмуса являются единственными на сегодняшний день массивами (известными автору), находящимися в открытом доступе и предоставляющими данные по всему Мировому океану. Предполагаемое развитие этих алгоритмов, согласно (Faghmous et al., 2015), должно идти в направлении преодоления недостатков используемых ими исходных данных (аномалий уровня по спутниковой альтиметрии), таких как их зашумленность и наличие ложных сигналов.

В итоге сложность и многоступенчатость смешанных алгоритмов требуют глубокого анализа и учета их особенностей. Вследствие своей гибкости, являющейся результатом сочетания черт физических и геометрических алгоритмов, смешанные алгоритмы стали основой для создания первых глобальных массивов данных о мезомасштабных вихрях Мирового океана (массивы Челтона и Фагмуса).

Заключение

Многообразие современных АО весьма велико и значительно превышает разнообразие АТ. Результатом этого являются широкие возможности внедрения АО и АТ в исследовательскую практику для решения как фундаментальных, так и прикладных задач (в частности, мониторинга). При этом богатство используемых методов дает возможность рационального выбора АО исходя из имеющихся ресурсов и целей.

В то же время; сложности при оценке эффективности этих алгоритмов, а также в ряде случаев недостаточное внимание к данному вопросу в соответствующих публикациях ограничивают развитие данного направления в исследовании мезомасштабных вихрей. С одной стороны, оценка эффективности любого АО изначально затруднена из-за недостаточной уверенности в том, что идентифицируемые мезомасштабные структуры в действительности являются вихрями (Faghmous et al., 2015). Решение данного вопроса представляется затруднительным без существенного прогресса в понимании динамики мезомасштабных структур в реальном океане. С другой стороны, оценки эффективности любого АО на основе сравнения результатов его работы с результатами работы другого АО (работа которого основана на другом методе или исходных предпосылках) зачастую не могут считаться надежными и должны интерпретироваться с большой осторожностью (Chelton et al., 2011). Наиболее эффективным решением можно считать валидацию результатов работы АО на основе совместного использования нескольких методов оценки эффективности: привлечения дополнительных спутниковых данных, экспертного контроля, тестирования на модельных данных и др.

В результате перспективными направлениями развития АО и АТ являются их оптимизация, унификация, рост качества оценок их эффективности, а также адаптация к задачам оперативной океанографии. С учетом постоянного улучшения исходных данных и увеличением вычислительных мощностей рост качества АО и АТ будет во многом зависеть от прогресса в этих направлениях. В сжатом виде характеристики рассмотренных АО представлены в *maбл. 1*.

Название АО	Tun AO	Опубликован в	Исходные данные	Краткое описание
Центров Кривизны	Геометрический	Sadarjoen, Post, 2000	Изолинии физиче- ского параметра	Геометрический анализ изолиний
Winding Angle	Геометрический	Sadarjoen, Post, 2000	Изолинии физиче- ского параметра	Геометрический анализ изолиний
Челтона	Смешанный	Chelton et al., 2011	Аномалии уровня океана по спутни- ковой альтиметрии	Поиск геометри- ческих паттернов в поле физического параметра
Фагмуса	Смешанный	Faghmous et al., 2015	Аномалии уровня океана по спутни- ковой альтиметрии	Поиск геометри- ческих паттернов в поле физического параметра

Таблица 1. Краткие характеристики рассмотренных алгоритмов обнаружения и трекинга мезомасштабных вихрей

Продолжение Таблицы 1

Название АО	Tun AO	Опубликован в	Исходные данные	Краткое описание
Vector Geometry	Смешанный	Nencioli et al., 2010	Поле скорости течений	Поиск геометри- ческих паттернов в поле физического параметра
дотк	Смешанный	Алексанин, Алексанина, 2004	Спутниковые ИК-изображения	Поиск геометри- ческих паттернов в поле физического параметра
Wawelet	Физический	Doglioli et al., 2007	Поле относитель- ной завихренности	Выделение вихрей на основе физичес- кого и статистичес- кого критерия
Относи- тельной завихренности	Физический	McWilliams, 1990	Поле относитель- ной завихренности	Выделение вихрей на основе физиче- ского критерия
I-S-03	Физический	Isern-Fontanet et al., 2003	Аномалии уровня океана по спутни- ковой альтиметрии	Выделение вихрей на основе физиче- ского критерия
CP-05	Физический	Chaigneau, Pizarro, 2005	Аномалии уровня океана по спутни- ковой альтиметрии	Выделение вихрей на основе физиче- ского критерия
R^2	Физический	Williams et al., 2011	Поле скорости течений	Выделение вихрей на основе физичес- кого и статистичес- кого критерия
Окубо-Вейса	Физический	Okubo, 1970; Weiss, 1991	Поле скорости течений	Выделение вихрей на основе физичес- кого критерия

Приведенный в настоящей работе список АО и АТ содержит лишь ключевые по своему значению наименования. Примеры АО, не упомянутых в настоящей работе, можно найти в работах (Алексанин, Загуменнов, 2011; Conti et al., 2016). Пример модификации АО для региональных исследований и особенности сравнительного применения нескольких различных алгоритмов приводятся соответственно в (Vortmeyer-Kley et al., 2016) и (Cheng et al., 2014).

Литература

4.

^{1.} Алексанин А.И., Алексанина М.Г. Автоматическое выделение вихрей по спутниковым ИК-изображениям // Тр. Всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного исследования Земли из космоса». 11-13 ноября 2003. М.: ИКИ РАН, 2004. С. 382-386.

Алексанин А.И., Загуменнов А.А. Автоматическое выделение вихрей океана и расчет их формы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 2. № 5. С. 17–21. 2.

^{3.} Алексании А.И., Загуменнов А.А. Проблемы автоматического обнаружения вихрей океана по спутниковым ИК-изображениям // Исследования Земли из космоса. 2011. № 3, С. 65–74. Жмур В.В. Мезомасштабные вихри океана. М.: ГЕОС, 2011. 190 с. Кубряков А.А., Белоненко Т.В., Станичный С.В. Влияние синоптических вихрей на температуру морской

^{5.} поверхности в северной части Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 34-43.

Chaigneau A., Pizarro O. Eddy characteristics in the eastern South Pacific // J. Geophys. Res. 2005. Vol. 110, 6. C06005.

- Chaigneau S., Gizolme A., Grados C. Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: identification algorithms 7. and eddy spatio-temporal patterns // Progr. Oceanogr. 2008. Vol. 79. P. 106-119.
- Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M., de Szoeke R.A. Global observations of large oceanic eddies // Geo-8. physical Research Letters. 2007. Vol. 34. Issue 15. DOI: 10.1029/2007GL030812.
- 9 Chelton D.B., Schlax M.G. Samelson, R.M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies // Prog. Oceanogr. 2011. Vol. 91. P. 167-216
- 10. Cheng Y.-H., Ho C.-R., Zheng Q., Kuo N.-J. Statistical Characteristics of Mesoscale Eddies in the North Pacific Derived from Satellite Altimetry // Remote Sens. 2014. Vol. 6. P. 5164-5183.
- *Colas F., McWilliams J.C., Capet X., Kurian J.* Heat balance and eddies in the Peru–Chile current system // Clim. Dyn. 2011. URL: http://dx.doi.org/10.1007/s00382-011- 1170-6.
- 12. Conti D., Orfila A., Mason E., Sayol J., Simarro G., Balle S. An eddy tracking algorithm based on dynamical systems theory // Ocean Dynamics. 2016. Vol. 66. 1415.
- 13. *Doglioli A.M., Blanke B., Speich S., Lapeyre G.*, Tracking coherent structures in a regional ocean model with wavelet analysis: Application to Cape Basin eddies // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. C05043
- 14. Dong C., Lin X., Liu Y., Nencioli F., Chao Y., Guan Y., Chen D., Dickey T., McWilliams J.C. Three-dimensional oceanic eddy analysis in the Southern California Bight from a numerical product // J. Geophys. Res. 2012. Vol. 117. C00H14.
- 15. Faghmous J.H., Frenger I., Yao Y., Warmka R., Lindell A., Kumar V. A daily global mesoscale ocean eddy dataset from satellite altimetry // Sci. Data 2. 2015. 150028.
- Fang F., Morrow R. Evolution, movement and decay of warmcore Leeuwin Current eddies // Deep Sea Res.-Pt. II. 2003. Vol. 50 P. 2245–2261.
- 17. Isern-Fontanet J., García-Ladona E., Font J. Identification of marine vortices from altimetric maps // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2003. Vol. 20. P. 772-778.
- *Isern-Fontanet J., García-Ladona E., Font J.* Vortices of the Mediterranean Sea: an altimetric perspective // Journal of Physical Oceanography. 2006. Vol. 36. P. 87–103.
 Kubryakov A.A., Stanichny S.V. Mesoscale eddies in the Black Sea from satellite altimetry data // Oceanology.
- 2015a. Vol. 1. No. 55. P. 56-67
- 20. Kubryakov A.A., Stanichny S.V. Seasonal and interannual variability of the Black Sea eddies and its dependence on characteristics of the large-scale circulation // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2015b. Vol. 97, P. 80-91
- 21. Le Traon P.Y. From satellite altimetry to Argo and operational oceanography: three revolutions in oceanography // Ocean Science. 2013. Vol. 9. P. 901-915
- McWilliams J.C. The vortices of two-dimensional turbulence // J. Fluid Mech. 1990. Vol. 219. P. 361-385.
- 23. Morrow R., Birol F. Griffin D., Sudre J. Divergent pathways of cyclonic and anti-cyclonic ocean eddies // Geophys. Res. Lett. 2004. Vol. 31. L24311.
- 24. Nencioli F., Dong C., Dickey T.D., Washburn L., McWilliams J.C. A vector geometry based eddy detection algorithm and its application to a high-resolution numerical model product and high-frequency radar surface velocities in the Southern California Bight // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2010. Vol. 27. No. 3. P. 564–579
- 25. *Okubo A*. Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences // Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. 1970. Vol. 17. P. 445–454.
- 26. Penven P., Echevin V., Pasapera J., Colas F., Tam J. Average circulation, seasonal cycle, and mesoscale dynamics
- of the Peru Current System: A modeling approach // J. Geophys. Res. 2005. Vol. 110. C10021.
 27. Petersen M.R., Williams S.J., Maltrud M.E., Hecht M.W., Hamann B. A three-dimensional eddy census of a high-resolution global ocean simulation // J. Geophys. Res.-Oceans. 2013. Vol. 118. P. 1759–1774.
- 28. Sadarjoen A., Post F.H. Detection, quantification, and tracking of vortices using streamline geometry // Visualization and Computer Graphics. 2000. Vol. 24. P. 333-341.
- 29 Viikmäe B., Torsvik T. Quantification and characterization of mesoscale eddies with different automatic identification algorithms // Journal of Coastal Research. 2013. Special Issue No. 65. Vol. 2. P. 2077-2082
- 30. Vortmeyer-Kley R., Gräwe U., Feudel U. Detecting and tracking eddies in oceanic flow fields: a Lagrangian descriptor based on the modulus of vorticity // Nonlin. Processes Geophys. 2016. Vol. 23. P. 159-173
- 31. 31. Weiss J. The dynamics of enstrophy transfer in two-dimensional hydrodynamics // Physica D. 1991. Vol. 48. P. 273–294.
- 32. Williams S., Petersen M., Bremer P.-T., Hecht M., Pascucci V., Ahrens J., Hlawitschka M., Hamann B. Adaptive extraction and quantification of geophysical vortices // IEEE T. Vis. Comput. Gr. 2011. Vol. 17. P. 2088-2095
- 33. Xu Y., Li J., Dong S. Ocean circulation from satellite altimetry: progresses and challenges. Long A., Wells D. (eds.) // Ocean Circulation and El Nino. New York. Nova Science Publishers, Inc. 2009. P. 291
- Zhu Z., Moorhead R.J. Extracting and Visualizing Ocean Eddies in Time-Varying Flow Fields // 7th International 34 Symposium on Flow Visualization, Seattle, WA, Sept. 11-14, 1995.

Review of mesoscale eddy detection and tracking algorithms

P.S. Petkilev

I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad 236016, Russia *E-mail: petkilev.pavel@yandex.ru*

The principal objective of this paper is to describe the most well-known and widely used algorithms of mesoscale eddies detection and tracking in the World Ocean. Considered algorithms are classified into types (physical, geometric, mixed) and then discussed in chronological order. The basic principles of these algorithms, the data required, and the main advantages and disadvantages are analyzed. In addition, efficiency parameters are given for some of the algorithms. Improvements in the detection and tracking algorithms led to a significant progress in the understanding of the distribution and dynamics of mesoscale eddies in the World Ocean. It is also shown, that a variety of methods used in the algorithms enables a rational choice of a particular algorithm based on the scientific goals and available resources. The factors constraining the development of algorithms and their implementation in research practice are also described. The prospects and ways of development of these algorithms are highlighted. The paper also briefly discusses open access datasets, created by means of the detection and tracking algorithms; these datasets contain information about the distribution of mesoscale eddies in the World Ocean.

Keywords: mesoscale eddies, algorithms, detection and tracking, remote sensing

Accepted: 21.03.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-27-47

References

- 1. Aleksanin A.I., Aleksanina M.G., Avtomaticheskoe vydelenie vikhrei po sputnikovym IK-izobrazheniyam (Automatic detection of eddies based on infrared (IR) images), Tr. Vseros. konf. "Sovremennye problemy *distantsionnogo issledovaniya Zemli iz kosmosa*" (All-Russia Conference on Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space), Moscow, 11–13 November 2003, Moscow: IKI RAS, 2004, pp. 382–386.
- Aleksanin A.I., Zagumennov A.A., Avtomaticheskoe vydelenie vikhrei okeana i raschet ikh formy (Automatic 2 detection of ocean eddies and the estimation of its shapes), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya *Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 2, No. 5. pp. 17–21. Aleksanin A.I., Zagumennov A.A., Problemy avtomaticheskogo obnaruzheniya vikhrei okeana po sputnikovym
- 3. IK-izobrazheniyam (The problems of automatic detection of ocean eddies based on satellite infrared (IR) images), Issledovaniye Žemli iz kosmosa, 2011. No. 3, pp. 65-74.
- 4.
- Zhmur V.V., *Mezomasshtabnye vikhri okeana* (Mesoscale eddies in the ocean), Moscow: GEOS, 2011, 190 p. Kubryakov A.A., Belonenko T.V., Stanichnyi S.V., Vliyanie sinopticheskikh vikhrei na temperaturu morskoi 5 poverkhnosti v severnoi chasti Tikhogo okeana (Impact of mesoscale eddies on sea surface temperature in the North Pacific Ocean), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2016. Vol. 13. No. 2. pp. 34-43.
- Chaigneau, A., Pizarro O., Eddy characteristics in the eastern South Pacific, J. Geophys. Res., 2005, Vol. 110, 6. C06005.
- Chaigneau S., Gizolme A., Grados C., Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: identification algorithms 7.
- and eddy spatio-temporal patterns, *Progr. Oceanogr.*, 2008, Vol. 79, pp. 106–119. Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M., de Szoeke R.A., Global observations of large oceanic eddies, *Geophysical Research Letters*, 2007, Vol. 34, No. 15. DOI: 10.1029/2007GL030812. 8.
- 9. Chelton D.B., Schlax M.G. Samelson R.M., Global observations of nonlinear mesoscale eddies, *Prog. Oceanogr.*, 2011, Vol. 91, pp. 167–216.
 Cheng Y.-H., Ho C.-R., Zheng Q., Kuo N.-J., Statistical Characteristics of Mesoscale Eddies in the North Pacific
- Derived from Satellite Altimetry, Remote Sens., 2014, Vol. 6, pp. 5164-5183.
- 11. Colas F., McWilliams J.C., Capet X., Kurian J., Heat balance and eddies in the Peru-Chile current system, Clim.
- Dyn., 2011, available at: http://dx.doi.org/10.1007/s00382-011-1170-6.
 Conti D., Orfila A., Mason E. Sayol J., Simarro G., Balle S., An eddy tracking algorithm based on dynamical systems theory, *Ocean Dynamics*, 2016, Vol. 66, 1415.
- 13. Doglioli A.M., Blanke B., Speich S., Lapeyre G., Tracking coherent structures in a regional ocean model with wavelet analysis: Application to Cape Basin eddies, *J. Geophys. Res.*, 2007, Vol. 112, C05043
 14. Dong C., Lin X., Liu Y., Nencioli F., Chao Y., Guan Y., Chen D., Dickey T., McWilliams J.C., Three-dimensional
- oceanic eddy analysis in the Southern California Bight from a numerical product, J. Geophys. Res., 2012, Vol. 117, C00H14.
- 15. Faghmous J.H., Frenger I., Yao Y., Warmka R., Lindell A., Kumar V., A daily global mesoscale ocean eddy dataset from satellite altimetry, *Sci. Data 2*, 2015, 150028.
- 16. Fang F., Morrow R., Evolution, movement and decay of warmcore Leeuwin Current eddies, Deep Sea Res.-Pt.
- II. 2003, Vol. 50, pp. 2245–2261.
 I7. Isern-Fontanet J., García-Ladona E., Font J., Identification of marine vortices from altimetric maps, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, Vol. 20, pp. 772–778.

- 18. Isern-Fontanet J., García-Ladona E., Font J., Vortices of the Mediterranean Sea: an altimetric perspective, Journal of Physical Oceanography, 2006, Vol. 36, pp. 87–103.
- 19. Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Mesoscale eddies in the Black Sea from satellite altimetry data, Oceanology, 2015a, Vol. 1, No. 55, pp. 56–67.
- 20. Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Seasonal and interannual variability of the Black Sea eddies and its dependence on characteristics of the large-scale circulation, Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2015b, Vol. 97, pp. 80-91.
- 21. Le Traon P.Y., From satellite altimetry to Argo and operational oceanography: three revolutions in oceanography, Ocean Science, 2013, Vol. 9, pp. 901–915
 22. McWilliams J.C., The vortices of two-dimensional turbulence, J. Fluid Mech., 1990, Vol. 219, pp. 361–385.
- 23. Morrow R., Birol F. Griffin D., Sudre J., Divergent pathways of cyclonic and anti-cyclonic ocean eddies, Geophys.
- *Res. Lett.*, 2004, Vol. 31, L24311.
 24. Nencioli F., Dong C., Dickey T.D., Washburn L., McWilliams J.C., A vector geometry based eddy detection algorithm and its application to a high-resolution numerical model product and high-frequency radar surface velocities in the Southern California Bight, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, Vol. 27, No. 3, pp. 564-579.
- 25. Okubo A., Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences, Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, 1970, Vol. 17, pp. 445–454.
- Penven P., Echevin V., Pasapera J., Colas F., Tam J., Average circulation, seasonal cycle, and mesoscale dynamics of the Peru Current System: A modeling approach, *J. Geophys. Res.*, 2005, Vol. 110, C10021.
 Petersen M.R., Williams S.J., Maltrud M.E., Hecht M.W., Hamann B., A three-dimensional eddy census of a high-resolution global ocean simulation, *J. Geophys. Res.-Oceans.*, 2013, Vol. 118, pp. 1759–1774.
- 28. Sadarjoen A., Post F.H., Detection, quantification, and tracking of vortices using streamline geometry, Visualization and Computer Graphics, 2000, Vol. 24, pp. 333-341.
- Viikmäe B., Torsvik T., Quantification and characterization of mesoscale eddies with different automatic identification algorithms, *Journal of Coastal Research*, 2013, Special Issue No. 65. Vol. 2. pp. 2077–2082. 29.
- 30. Vortmeyer-Kley R., Gräwe U., Feudel U., Detecting and tracking eddies in oceanic flow fields: a Lagrangian descriptor based on the modulus of vorticity, *Nonlin. Processes Geophys.*, 2016, Vol. 23, pp. 159–173.
 Weiss J., The dynamics of enstrophy transfer in two-dimensional hydrodynamics. *Physica D.*, 1991, Vol. 48, pp. 273–294.
- Williams S., Petersen M., Bremer P.-T., Hecht M., Pascucci V., Ahrens J., Hlawitschka M., Hamann B., Adaptive 32. extraction and quantification of geophysical vortices, IEEE T. Vis. Comput. Gr., 2011, Vol. 17, pp. 2088–2095.
- 33. Xu Y., Li J., Dong S., Ocean circulation from satellite altimetry: progresses and challenges, Long A., Wells D. (eds.), Ocean Circulation and El Nino, New York. Nova Science Publishers, Inc., 2009, p. 291.
- 34. Zhu Z., Moorhead R.J., Extracting and Visualizing Ocean Eddies in Time-Varying Flow Fields, 7th International Symposium on Flow Visualization, Seattle, WA, Sept. 11-14, 1995.