

УДК 551.465

О ВЫДЕЛЕНИИ ЗАМКНУТЫХ ЦИРКУЛЯЦИЙ НА СПУТНИКОВЫХ КАРТАХ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА

© 2019 г. Р. Ю. Тараканов

Институт океанологии им. П.П. Ширинова РАН

117997, Москва, Нахимовский пр-т, 36

E-mail: rtarakanov@gmail.com

Поступила в редакцию 16.05.2019 г.

Принята к печати 29.05.2019 г.

В настоящей работе описан алгоритм выделения замкнутых многоядерных циркуляций на цифровых картах динамической топографии (ДТ). Алгоритм заключается в их расширении по площади от ядер (локальных максимумов/минимумов ДТ) до достижения соответствующих этим ядрам седловин ДТ, и осуществляется в несколько итераций до полного исчерпания точек, принадлежащих замкнутым циркуляциям. Алгоритм является точным численным решением задачи об определении значения ДТ для замкнутого контура, наиболее удаленного от ядра циркуляции. Алгоритм учитывает проблемы вложенности друг в друга циркуляций разного знака, возможное пересечение друг с другом на численной сетке циркуляций разного знака, а также возможное существование островов или участков плавучего льда внутри циркуляций. Описывается метод склейки меньших карт ДТ с выделенными на них циркуляциями в большие.

Ключевые слова: замкнутые циркуляции, динамическая топография, спутниковая альтиметрия.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-351555114-125>

ВВЕДЕНИЕ

Течения верхнего, бароклинного слоя океана (~1500–2000 м) формируются, главным образом, за счет ветрового воздействия на океан и приспособления поля плотности к этому воздействию, а также за счет теплообмена и обмена пресной водой с атмосферой. За исключением тонкого приповерхностного слоя (до 50 м) эти течения имеют геострофическую природу. Линии тока геострофического течения на большей части поверхности Мирового океана соответствуют изолиниям отклонения уровня этой поверхности (изогипсам) от геоида (поверхности равного геопотенциала). Такое отклонение называют абсолютной динамической топографией поверхности океана (здесь и далее — АДТ). В Северном полушарии большие значения АДТ располагаются справа от направления течения, в Южном — слева. Сгущения изогипс на картах АДТ соответствуют зонам повышенных скоростей течения. Картина линий тока геострофического течения в глубине на горизонтах в пределах бароклинного слоя океана в основном подобна картине линий тока этого течения на

поверхности океана. Это обстоятельство позволяет исследовать качественно и количественно некоторые аспекты структуры и циркуляции бароклинного слоя океана в целом, используя только карты АДТ.

Синоптическая (мгновенная) АДТ представляет собой сумму средней (по времени) АДТ и синоптической аномалии уровня океана (АУО), определяемой на основе измерений спутников-альтиметров и также являющейся вариантом динамической топографии (ДТ). Эти спутники измеряют расстояние от себя до поверхности океана, тем самым определяя ее форму. Осреднение данных этих измерений по времени дает геометрию средней поверхности океана, мгновенное отклонение от нее — АУО. Разница между средней поверхностью океана и геоидом представляет собой среднюю АДТ, которая рассчитывается на основе разнообразных измерений в толще океана. Наилучшая средняя АДТ — CNES-CLS13 [1]. Для расчета цифровых карт ДТ поверхности океана (АУО или АДТ) данные измерений спутников интерполируются с их треков, прописываемых на поверхности Земли, на регулярную сетку.

Замкнутые изогипсы на поверхности океана образуют замкнутые геострофические циркуляции. За исключением зоны перехода через экватор, циркуляции с пониженными значениями АДТ по отношению к контурным изогипсам соответствуют циклоническому (по часовой стрелке в Южном полушарии, против часовой — в Северном) вращению, с повышенными — антициклоническому. В зависимости от масштаба и широты замкнутые циркуляции могут представлять собой океанские круговороты, отдельные вихри или конгломераты вихрей, волны Россби. При этом на мезомасштабах (до нескольких первых сотен километров) в низких широтах преобладают волны Россби, переносящие только механическую энергию, в высоких — вихри, переносящие воду, тепло, соль [2, 3]; кроме того, именно вихри за счет их баротропизации передают из бароклинного слоя в абиссаль энергию, сообщаемую поверхности океана ветром [4, 5]. Натурные исследования вихрей в океане долгое время исчерпывались измерениями в толще океана на специально спланированных для этой задачи полигонах. С наступлением в начале 1990-х гг. эры спутниковых альтиметрических наблюдений за поверхностью океана объем данных, на основе которых можно изучать характеристики поля вихрей, вырос на порядки.

С точки зрения выделения вихрей, данные по АДТ обладают существенным недостатком: они зависят от плохо описанного в количественном отношении для этой задачи геоида. Большая часть работ по выделению вихрей по данным спутниковой альтиметрии опирается на данные АУО, которые от геоида не зависят, и использует так называемый геометрический подход, когда в качестве границы вихря выделяется самая дальняя от ядра замкнутая изогипса [2, 6–11]. Однако замкнутые изолинии АУО далеко не всегда соответствуют вихрям. Поэтому для выделения вихрей, в т.ч. их мгновенного положения, во всех этих методиках существенным является отслеживание во времени объектов, претендующих на статус вихря. Впервые геометрический подход был применен в методике [2] для выделения т.н. нелинейных вихрей, т.е. характеризующихся более высокими орбитальными скоростями по сравнению со скоростью смещения вихря. В рамках методики исходные данные АУО фильтруются по пространству для удаления крупномасштабного стерического эффекта (сезонного хода уровня океана, связанного с прогревом/охлаждением его приповерхностного слоя), а также накладываются огра-

ничения на форму, площадь, линейный размер и минимальное время жизни вихрей. На каждой карте предварительно обработанных данных АУО наличие потенциальных вихрей проверяется пошагово с пороговыми уровнями от -100 до 100 см с шагом 1 см, путем выделения связанных областей со значениями АУО, превышающих пороговые. Для потенциальных антициклонов перебор уровней начинается на -100 см и движется в сторону увеличения АУО, для циклонов — все наоборот. Таким образом, могут определяться все параметры потенциальных вихрей. Описанная пошаговая методика может быть также использована для определения замкнутых циркуляций и на картах АДТ. Отметим, что в основном именно эта методика с некоторыми модификациями лежит в основе большинства работ с геометрическим подходом к выделению вихрей.

В практике модельных и натуральных исследований вихрей применяются и другие источники данных и методы автоматической идентификации вихрей. Метод Окубо–Вайсса, использующий физический параметр — меру вращения и деформации в потоке жидкости [12, 13], вейвлет-анализ [14–16], метод угла намотки [17–19], векторная геометрия [20], анализ поля скорости [21, 22], выведение поля течений из поля температуры поверхности океана [23], спутниковые ИК-изображения [24], выделение вихрей в комбинации со струями [25], комбинирование геометрических и физических методов [26, 27]. Более детальный обзор методик можно найти в работе [28].

В настоящей работе описывается альтернативный геометрический алгоритм выделения замкнутых циркуляций по данным цифровых карт ДТ, без использования каких-либо пороговых значений ДТ. Алгоритм заключается в расширении циркуляции по площади от ядер (локальных максимумов/минимумов ДТ) до достижения седловин ДТ и осуществляется в несколько итераций до полного исчерпания точек, принадлежащих замкнутой циркуляции. Алгоритм является, в известной степени, развитием способа выделения циркуляций, использованного в работе [8], где процедура расширения, стартуя от значения ДТ в ядре, идет с шагом порогового уровня 0.05 см в сторону увеличения для циклонов и уменьшения для антициклонов. Для каждого нового уровня определяются новые точки циркуляции. Процедура заканчивается, когда расширяемая циркуляция поглощает ядро другой циркуляции того же знака, после чего осуществляется отступление на один шаг порогового

уровня. Описанная процедура выделяет только одноядерные циркуляции.

Предлагаемый в настоящей работе алгоритм лежал в основе выделения вихрей по данным АДТ, выполненных в работах по исследованию Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) [29–33]. Физическая обоснованность отождествления между вихрями и замкнутыми циркуляциями АДТ в полосе АЦТ подтверждается результатами анализа характеристик вихревого поля в проливе Дрейка, показавшими, что линейный масштаб циркуляций, занимающих здесь наибольшую суммарную площадь, находится в хорошем соответствии с масштабом Россби, характерном для вновь образующихся вихрей [34]. Отметим также, что с точки зрения выделения вихрей данные АДТ по сравнению с АУО обладают тем преимуществом, что для них не существен упоминавшийся выше стериический эффект. Несмотря на то, что в своем нынешнем виде методика выделения вихрей не подразумевает их идентификации во времени, существует круг задач по исследованию вихрей, для которых достаточно описываемого алгоритма, в частности: исследование энергообмена между струями АЦТ и образованными ими вихрями [29, 30], анализ синоптической картины течений на гидрофизическом разрезе [33], оценка статистических характеристик вихрей в этой зоне и некоторые другие задачи. Это обстоятельство определяет необходимость детального описания алгоритма выделения замкнутых циркуляций на картах ДТ, не вдаваясь в физическую сторону интерпретации этих циркуляций. Для иллюстрации работы алгоритма расчеты по нему проводились на основе цифровых карт по АДТ (DT-Global-MADT-Upd product)

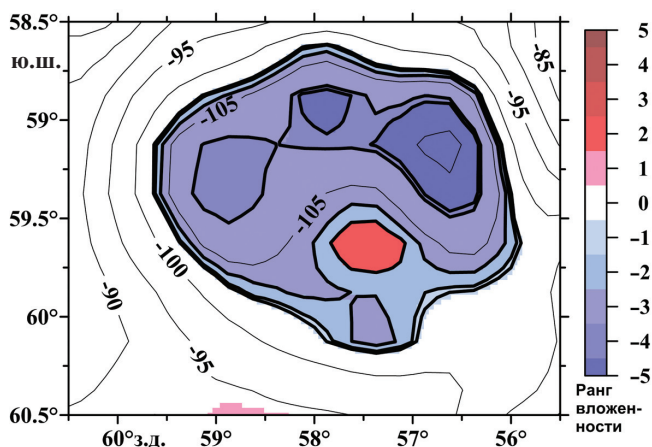


Рис. 1. Пример многоядерной циклонической циркуляции с вложенным в нее антициклоном. Изолинии с оцифровкой — линии равной ДТ (в см).

с сеткой $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, построенных французским агентством CLS (Collecte Localisation Satellites) по данным спутниковых альтиметрических наблюдений и находящихся в открытом доступе в Интернете (DT Global-MADT-Upd product, <http://www.avisio.altimetry.fr>). Далее именно эти данные будут обозначаться как АДТ-AVISO.

МЕТОДИКА

Зачастую замкнутые циркуляции на картах ДТ имеют сложную структуру в виде нескольких ядер (локальных максимумов/минимумов ДТ). В этом случае простые циркуляции, соответствующие одному ядру, оказываются вложенными в большие циркуляции, причем подобное вложение может повторяться многократно, формируя таким образом сложную циркуляцию (рис. 1). Введем понятие ранга вложенности циркуляций на примере рис. 2, показывающего схематично вертикальные срезы (в поле ДТ) циркуляций от одно- до четырехядерной. Первый ранг имеет ни во что не вложенная циркуляция в диапазоне значений ДТ от граничного до вершины (в случае одноядерной циркуляции), либо до седловины, имеющей наименьшее значение ДТ, внутри этой циркуляции. Второй ранг имеют циркуляции от граничных значений ДТ либо до вершины простой циркуляции, либо до следующей седловины, имеющей наименьшее значение ДТ. Последующие ранги определяются аналогичным образом. Наличие ядер разного знака не меняет ситуацию (рис. 2г). Принадлежность циркуляций 3-го и более высоких рангов к конкретной циркуляции 1-го ранга определяется граничным значением ДТ циркуляции 2-го ранга, в которую вложены эти циркуляции высоких рангов. На рис. 2г приведен пример, когда антициклон и циклон 3-го ранга, вложенные в циклон 2-го, имеют значения ДТ, меньшие, чем значения ДТ в большом антициклоне 1-го ранга. При этом принадлежность простых антициклона и циклона к большому антициклону определяется тем, что граничное значение ДТ циклона выше, чем антициклона 1-го ранга.

Предлагаемый алгоритм выделения многоядерных замкнутых циркуляций представляет собой последовательные итерации, осуществляемые до полного исчерпания на карте точек сетки, принадлежащих замкнутым циркуляциям. Каждая итерация разделяется на два этапа:

1. Выявление ядер циркуляций обоих знаков, включая плоские, т.е. состоящие из нескольких точек сетки с одинаковыми значениями ДТ.

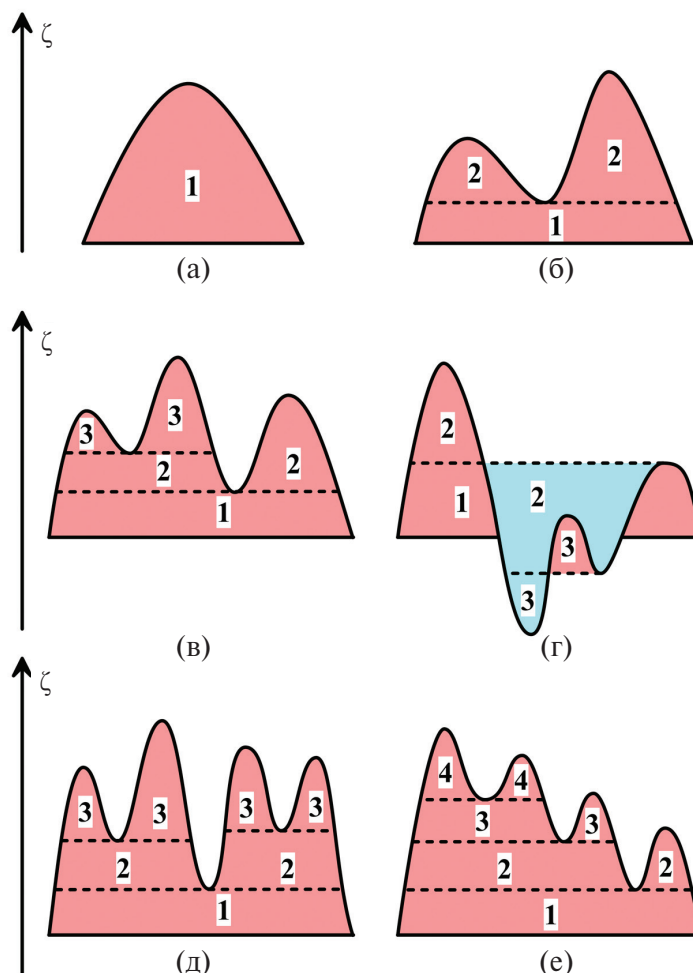


Рис. 2. Примеры схематических вертикальных срезов (в поле ДТ, ζ) циркуляций: а) одноядерной; б) двухядерной; в) и г) — трехядерных; д) и е) — четырехядерных. Цифрами обозначены ранги вложенности соответствующих циркуляций.

Для этого используется восьмиточечная схема (рис. 3). В случае участка карты с одинаковыми значениями ДТ выявляются все такие точки, формирующие связную область, и затем эта область проверяется на соответствие плоскому максимуму/минимуму. При этом краевые точки карты исключаются из анализа.

2. Выделение вокруг каждого ядра множества точек сетки, принадлежащих соответствующей этому ядру замкнутой циркуляции. При этом сначала выявляются все циркуляции одного знака, затем другого. Описываемая процедура иллюстрируется рис. 4 и 5. Вначале по восьмиточечной схеме определяются наборы точек ядра, соприкасающихся с внешним пространством (внутренний периметр), и точек внешнего пространства, смежных с ядром (внешний периметр). Затем во внешнем периметре отыскивается точка, ближайшая по значению к значению ДТ в ядре (ближайшее меньшее значение для антициклонических, и ближайшее большее для циклонических циркуляций), которая мар-

кируется на принадлежность циркуляции и ее внутреннему периметру и исключается из внешнего. Смежные с ней точки, не принадлежащие этой циркуляции, определяются как новые точки внешнего периметра. Точки циркуляции, не соприкасающиеся с внешним пространством, исключаются из внутреннего периметра. На каждом следующем шаге процедуры значения ДТ точек из внешнего периметра сравниваются

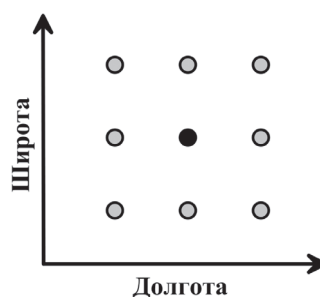


Рис. 3. Восьмиточечная (светлые кружки) схема определения локального экстремума относительно центральной точки (темный кружок).

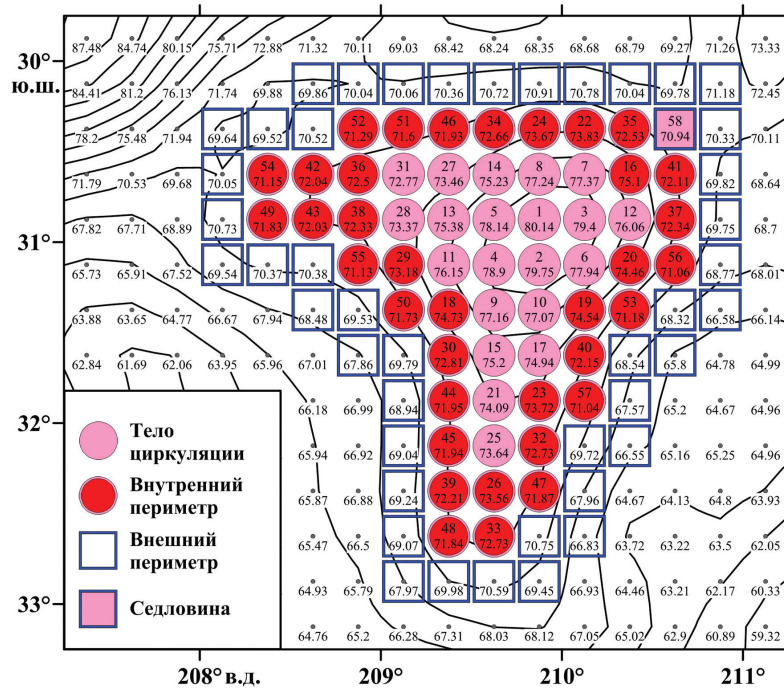


Рис. 4. Тело, внутренний и внешний периметры и седловина (порог) на примере антициклонической циркуляции. Номера кружков соответствуют последовательности определения узлов сетки, составляющей тело циркуляции. Числа — единицы ДТ (в см). Изолинии — линии равной ДТ.

со значениями ДТ последней выявленной точки циркуляции. Процедура продолжается до достижения хотя бы одного из следующих условий:

А) Среди точек внешнего периметра, смежных с последней выявленной (проверяемой) точкой, появляются такие точки, значения ДТ в которых больше по сравнению с ДТ в проверяемой точке для антициклонов и меньше — для циклонов. Последняя выявленная точка в этом случае является седловиной (порогом).

Б) Циркуляция касается границы карты. При этом границы суши и льда в качестве границ карты на данной стадии алгоритма не рассматриваются. Касание определяется тем, что пред-

последняя выявленная точка циркуляции находится на краю карты.

В) Во внешнем периметре появляется точка, принадлежащая циркуляции того же знака, выявленной на одной из предыдущих итераций. Условие учитывает, что разные циркуляции одного знака не могут иметь смежных точек. В противном случае они составляли бы единую циркуляцию.

Г) Новая проверяемая точка циркуляции совпадает с точкой циркуляции противоположного знака, выявленной на одной из предыдущих итераций. Условие учитывает, что циркуляции разного знака могут иметь смежные точки.

После этого значение ДТ последней выявленной точки принимается в качестве граничного для данной циркуляции. Причем сама эта точка индексируется как пороговая и исключается из множества точек, принадлежащих циркуляции, для того чтобы не возникало ситуаций, когда она является общей сразу для двух соприкасающихся циркуляций. Кроме того, из циркуляции исключаются точки со значениями ДТ, идентичными граничному. В случае если прерывание происходит по условиям (В) или (Г), процедура продолжается до тех пор, пока не выполняются условия (А) или (Б). В этом случае на одной итерации выявляется несколько вложенных друг в друга циркуляций, как показано на рис. 5 (циркуляции 3.1—3.3).

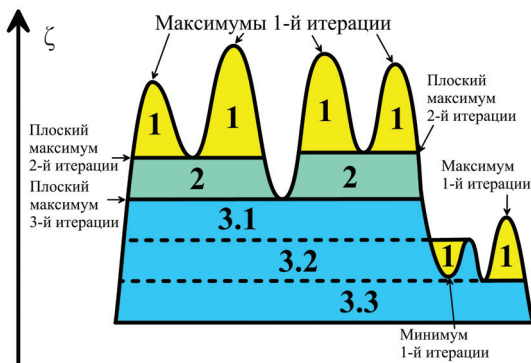


Рис. 5. Схематичный вертикальный срез (в поле ДТ, ζ) многоядерной циркуляции. Цифрами обозначены итерации процедуры выделения циркуляций.

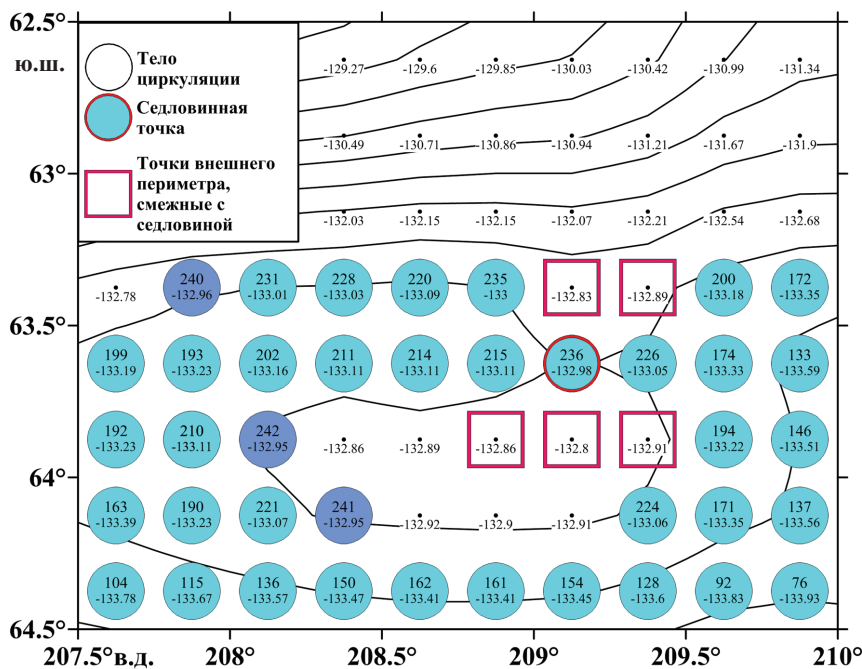


Рис. 6. Участок неодносвязной циклонической циркуляции, содержащий среди своих точек локальную седловину (точка 236). Значения ДТ в смежных с ней точках, не принадлежащих телу циркуляции (отмеченных квадратами), оказываются больше значений ДТ локальной седловины. В результате процедура расширения не прекращается по указанному в тексте статьи условию (А) и выделяется еще ряд точек (отмеченных более темными кружками), в качестве принадлежащих циркуляции. Номера кружков соответствуют последовательности определения узлов сетки, составляющей тело циркуляции. Числа — единицы ДТ (в см). Изолинии — линии равной ДТ.

Главное условие (А) процедуры расширения позволяет правильно определить пороговые точки только для таких циркуляций, внутри которых отсутствуют вложенные циркуляции противоположного знака, выявляемые на одной и той же итерации. При наличии же таковых, циркуляция является неодносвязной и процедура расширения не фиксирует по условию (А) ближайшую (по значению ДТ) к ядру пороговую точку, проскакивая ее; на рис. 6 приведен пример такой ситуации. Это обстоятельство обуславливает необходимость удаления неодносвязных циркуляций из числа циркуляций, обнаруженных на данной итерации. Часть неодносвязных циркуляций выявляется еще на этапе их расширения по площади, когда наблюдается совпадение новой проверяемой точки с точкой ядра циркуляции противоположного знака или с ее седловиной, обнаруженной на той же самой итерации. В обоих случаях неодносвязной является расширяемая циркуляция. На схеме на рис. 7 это соответствует расширению антициклона от ядра, в первом случае — прежде циклонов, когда их пороговые точки не выявлены, во втором — после циклонов, когда они уже выявлены. Кроме того, после выделения каждая циркуляция проверяется на наличие внутренних пустых областей путем оп-

ределения связности всех точек внешнего периметра по восьмиточечной схеме. Пример обнаружения неодносвязной циркуляции приведен на рис. 8. Отметим, что существование пустых областей внутри циркуляций может быть обусловлено также наличием островов или участков плавучего льда. Исходя из этого те циркуляции, неодносвязность которых определяется только внутренними островами или льдом, не удаляются. Остальные циркуляции смежные с землей/льдом сокращаются по площади до касания с этими

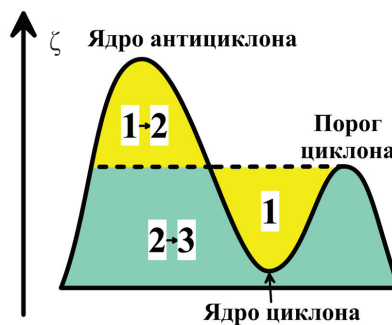


Рис. 7. Схематичный вертикальный срез (в поле ДТ, ζ) антициклонической циркуляции с вложенным в нее циклоном на одной итерации. Цифрами обозначены итерации процедуры выделения циркуляций. Выделение двухсвязного антициклона переходит с первой итерации на вторую, а антициклона первого ранга со второй на третью итерацию.

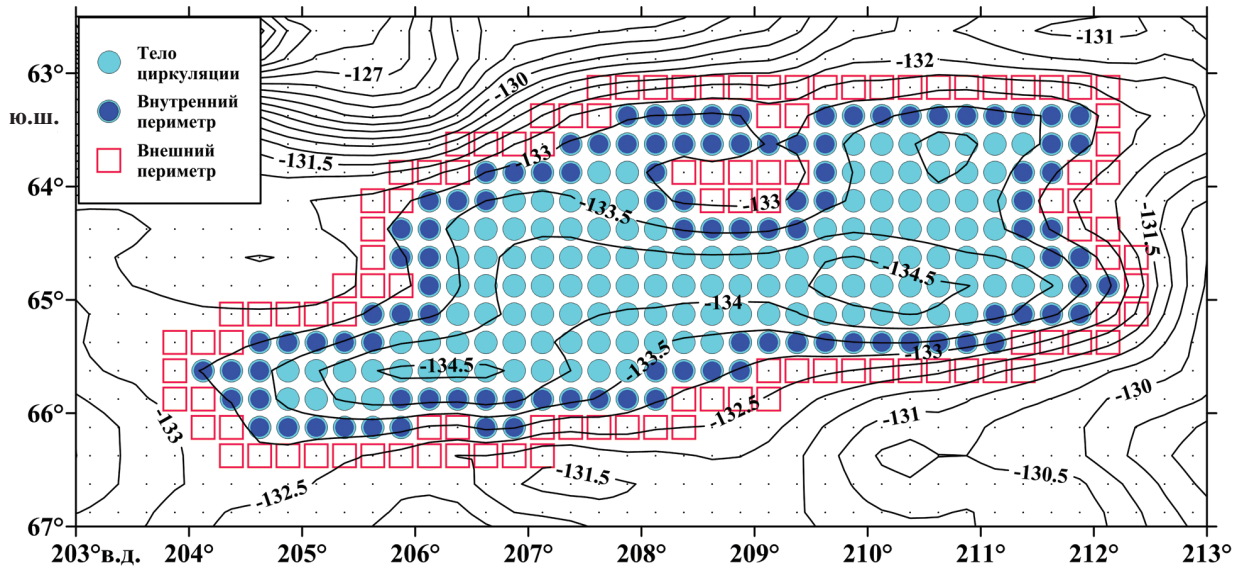


Рис. 8. Пример выделения неодносвязной на одной итерации циркуляции. Точки внешнего периметра образуют две независимых связанных области. Изолинии — линии равной АДТ-AVISO (в см).

участками карты в одной точке, как в случае с краем карты; среди них циркуляции, касающиеся земли/льда ядром, удаляются полностью. В конце итерации определяется структура вложенности выявленных односвязных циркуляций друг в друга, а значения ДТ всех их точек замещаются граничными значениями ДТ, найденными по условиям (А) или (Б). Таким образом, для следующей итерации формируется поле ДТ, на котором областям уже выявленных циркуляций соответствуют плоские участки ДТ. Такой прием позволяет, в частности, неодносвязные циркуляции сделать на последующих итерациях односвязными.

Общее количество итераций в описанном выше алгоритме, необходимое для выделения сложной циркуляции, зависит от наличия в ней вложенных циркуляций противоположного знака. В отсутствие таковых, оно в точности равно наивысшему рангу вложенных циркуляций. При этом наивысший ранг может быть меньше количества ядер внутри циркуляции 1-го ранга, но не может его превышать. В качестве пояснения этой мысли на рис. 2д и 2е приведены вертикальные срезы четырехядерных циркуляций с наивысшими 3-м и 4-м рангами вложенности. Максимальное количество итераций m , необходимых для выделения циркуляции с n ядрами определяется из условия:

$$m = \lceil \log_2 n \rceil + 1,$$

где квадратные скобки обозначают целую часть числа. При наличии вложенных циркуляций

противоположного знака количество итераций может достигать количества ядер. Это происходит в случае чередования вложенности друг в друга циркуляций противоположного знака наподобие матрешки. Максимальное количество итераций, необходимое для выделения всех замкнутых циркуляций на карте ДТ определяется количеством итераций, требуемым для самой сложной циркуляции.

Примененный алгоритм выделения замкнутых циркуляций допускает такую их конфигурацию, когда отдельные части одной циркуляции связаны только по диагонали сетки, как это показано на рис. 9а. При этом оказываются возможны случаи взаимного пересечения циркуляций разного знака с одинаковым рангом вложенности (рис. 10). Такое пересечение в реальности (т.е. в непрерывном поле) невозможно, что требует дополнительного разделения этих циркуляций. Отметим, что для непересекающихся циркуляций никаких физически обоснованных ограничений на конфигурацию «по диагонали» не существует. С целью выявления пересечений для каждого ранга вложенности проверяется маркировка точек, находящихся в вершинах квадрата сетки. Если в противоположных вершинах квадрата номера циркуляций попарно совпадают, но номера пар имеют разный знак, то это означает, что циркуляции с соответствующими номерами пересекаются. Если для обеих пересекающихся циркуляций соответствующая им диагональ квадрата является единственной связью между частями циркуляции, то каждая из цирку-

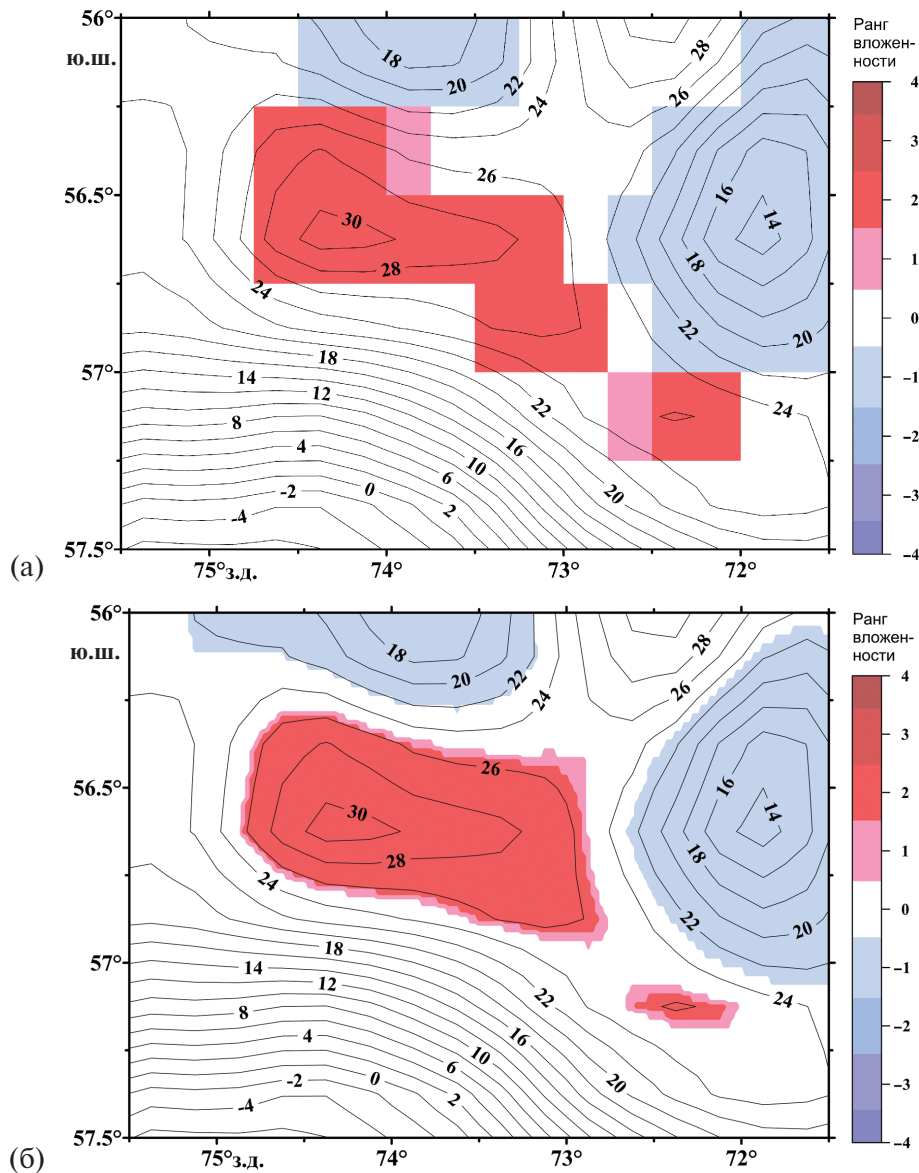


Рис. 9. Пример разделения связанной антициклонической циркуляции на две части при интерполяции на более мелкую, чем изначально, сетку. Рис. 9а соответствует исходной четверть-градусной сетке ДТ, рис. 9б — интерполяции с шагом 0.025 градуса. Изолинии — линии АДТ в см.

ляций разделяется на две. На рис. 11 приведен пример, когда две циркуляции по указанному признаку пересекаются, но для одной из них квадрат пересечения не является единственной связью между ее частями. В этом случае дополнительного разделения циркуляций не происходит. Отметим, что одна циркуляция может разделяться описанным выше способом несколько раз. При этом части разделенной циркуляции могут не иметь локального максимума/минимума по восьмиточечной схеме. Для частей разделенной циркуляции граничное значение ДТ принимается равным наименьшему (наибольшему) значению ДТ из внешнего периметра части циклонической (антици-

клонической) циркуляции (рис. 10); при этом вместо точки по диагонали квадрата пересечения, в периметр включается центр этого квадрата со средним арифметическим значением ДТ его вершин. В этом случае количество рангов вложенности внутри сложной циркуляции не меняется. В случае упрощенной схемы, т.е. без необходимости выделения всей внутренней структуры циркуляции, анализ проводится только для первого ранга вложенности.

Глобальное поле замкнутых циркуляций может восстанавливаться как по глобальным цифровым картам ДТ, так и строиться из отдельных локальных карт ДТ. Замкнутые циркуляции вблизи открытых, т.е. пересекающих

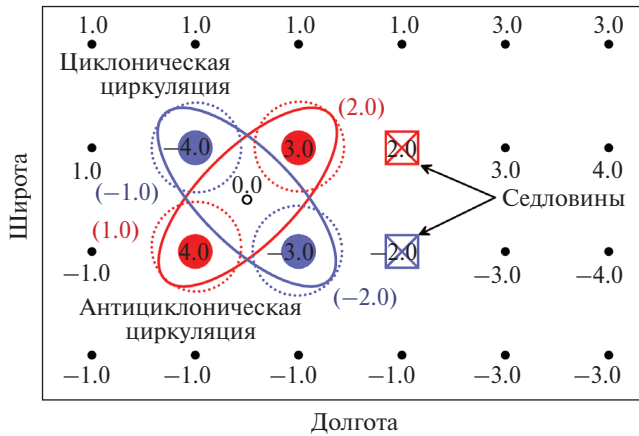


Рис. 10. Пересечение двух циркуляций разного знака в использованном алгоритме выделения замкнутых циркуляций. Числа — значения ДТ в соответствующих точках. Пунктирными линиями показаны разделенные части циркуляций. Числа в скобках — их граничные значения. Черным кружком показано положение центра квадрата пересечения.

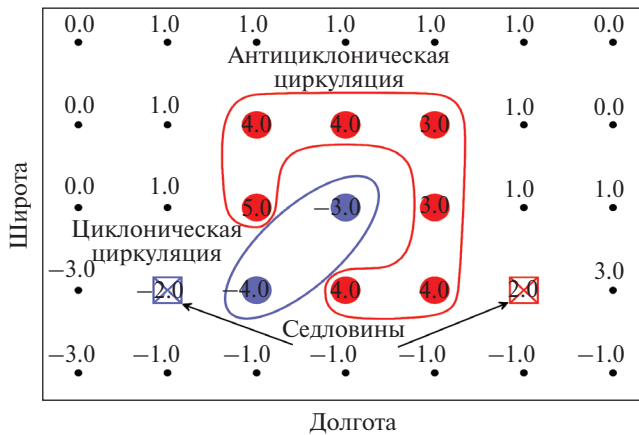


Рис. 11. Пример формального пересечения по диагонали двух циркуляций разного знака. Антициклоническая циркуляция имеет дополнительную внутреннюю связь, поэтому разделения циркуляций на части не происходит.

океан, края карт ДТ выделяются некорректно, или вообще не выделяются. Таким образом, для восстановления глобального поля замкнутых циркуляций из отдельных локальных карт требуется, чтобы эти карты географически перекрывали друг друга. Глобальное поле циркуляций, выделяемое целиком в конфигурации сетки ДТ с шагами по меридиану и широте, в силу наличия свободного от материковых барьеров антарктического кольца, также требует склейки с перекрытием. Для такого расчета глобальная карта ДТ должна быть продолжена на восток и запад от меридиана склейки, в качестве которого целесообразно выбирать меридиан, пересекающий пролив Дрейка. Размер области перекрытия карт выбирается так, чтобы он был больше выбранного ограничения

линейных размеров выделяемых замкнутых циркуляций.

Для выбора замкнутых циркуляций в области перекрытия двух цифровых карт достаточно сравнить на них циркуляции 1-го ранга вложенности. Выбор циркуляции 1-го ранга полностью определяет выбор всех вложенных в нее циркуляций более высокого ранга. При сравнении полей замкнутых циркуляций на двух картах могут возникнуть следующие ситуации:

1. На одной карте замкнутая циркуляция существует, на другой в этой же области какие-либо замкнутые циркуляции отсутствуют. Тогда именно эта циркуляция выбирается для построения склеенной карты.

2. Области замкнутой циркуляции на одной карте соответствует одна или несколько циркуляций на другой, но меньшего размера. Тогда для склеенной карты выбирается большая циркуляция, независимо от знака меньших по размеру циркуляций.

3. На двух картах замкнутые циркуляции совпадают. Тогда выбор циркуляции для построения склеенной карты произволен.

Для построения графических карт ДТ с выделением замкнутых циркуляций, а также для проведения некоторых расчетов, связанных с такими циркуляциями, может потребоваться дополнительная интерполяция исходных данных. При этом могут возникать указанные ниже нежелательные эффекты, которые обусловлены тем, что поверхность ДТ внутри квадрата, образованного соседними узлами сетки, не является плоской, вследствие чего внутри такого квадрата могут возникать дополнительные седловины ДТ:

1. Если сначала данные ДТ интерполировать на более мелкую сетку, а затем выделять замкнутые циркуляции, то в узлах исходной сетки могут образовываться фальшивые локальные максимумы/минимумы и соответствующие им циркуляции, масштаб которых меньше шага исходной сетки. Поэтому, сначала проводится выделение замкнутых циркуляций, а затем узлы более мелкой интерполяционной сетки размечаются на принадлежность к той или иной циркуляции в соответствии с граничными значениями циркуляций, к которым принадлежат вершины квадрата исходной сетки, внутри которого находится данная интерполяционная точка.

2. Если отдельные части циркуляции на исходной сетке связаны либо только по диагона-

ли (как на рис. 9а), либо только по широте или долготе по одной линии, то при более мелкой интерполяционной сетке эти части могут оказываться отделенными друг от друга. На рис. 9б приведен пример разделения циркуляции на две части при линейной интерполяции исходных данных в зональном и меридиональном направлениях. Для уменьшения этого эффекта могут использоваться более сложные алгоритмы интерполяции, например, учитывающие не только значения ДТ, но также и их градиенты.

ПРИМЕР КАРТЫ

На рис. 12 приведен пример карты АДТ-AVISO за 01.01.1993 для Тихого океана к югу от экватора (от 1° ю.ш. до 75° ю.ш.) с выделенными на ней по настоящему алгоритму замкнутыми циркуляциями 1-го ранга вложенности. Карта построена из пяти перекрывающихся меридиональных полос: 120° – 180° в.д., 150° – 210° в.д., 180° – 240° в.д., 210° – 270° в.д. и 240° – 300° в.д. Всего на карте выделяется 1273 циклонических и 1165 антициклонических циркуляций 1-го ранга вложенности. Наивысший ранг вложенности (33-й) внутренних циркуляций отмечается в обширной антициклонической циркуляции в тропической зоне Тихого океана от 165° в.д. до 205° в.д. Весь набор циркуляций выделяется для каждой меридиональной полосы не более чем за 5 итераций.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый в настоящей работе алгоритм выделения замкнутых многоядерных циркуляций на картах ДТ заключается в расширении циркуляции по площади от ядер (локальных максимумов/минимумов ДТ) до достижения соответствующих этим ядрам седловин ДТ и осуществляется в несколько итераций до полного исчерпания точек, принадлежащих замкнутым циркуляциям. Алгоритм является точным численным решением задачи об определении значения ДТ для замкнутого контура, наиболее удаленного от ядра циркуляции. Отметим в этой связи, что в отличие от других работ, использующих геометрический подход к выделению циркуляций, настоящий алгоритм не использует каких-либо пошаговых пороговых величин ДТ. Кроме того, алгоритм учитывает, что на одной итерации могут обнаруживаться вложенные друг в друга циркуляции разного знака. В этом случае, по крайней мере, одна из них является неоднозначной, и процедура расширения этой циркуляции не фиксирует соответствующую ей седловинную точку. Количество таких неоднозначных циркуляций по данным АДТ-AVISO оценивается в 0.03 – 0.04% от общего количества циркуляций. Проблема решается путем удаления неоднозначных циркуляций из числа выявленных, задания точкам внутри выявленных однозначных циркуляций граничных значений ДТ,

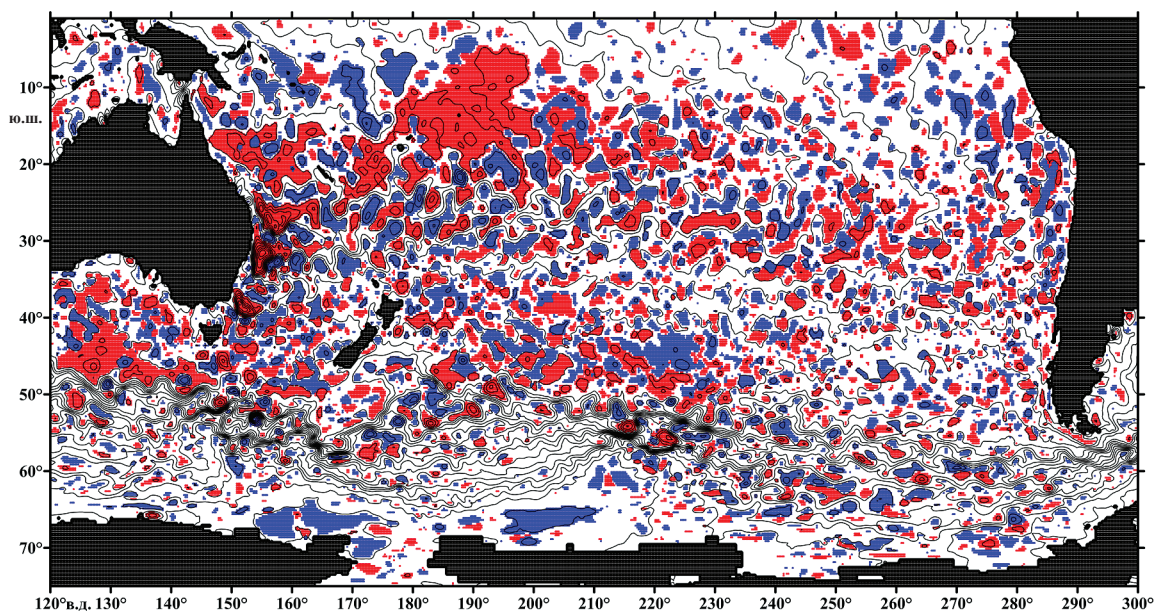


Рис. 12. Замкнутые циркуляции 1-го ранга по данным АДТ-AVISO в южной части Тихого океана (от 1° ю.ш. до 75° ю.ш.) за 01.01.1993. Карта построена из пяти меридиональных полос: 120° – 180° в.д., 150° – 210° в.д., 180° – 240° в.д., 210° – 270° в.д. и 240° – 300° в.д. Изолинии — линии АДТ с шагом 10 см. Оцифровка изолиний не приводится, чтобы не перегружать карту.

в качестве которых принимается пороговое для циркуляции значение ДТ, и переходом к следующим итерациям, на одной из которых за счет изменения ДТ неодносвязные циркуляции становятся односвязными. Алгоритм учитывает возможное пересечение друг с другом на численной сетке циркуляций разного знака, а также возможное существования островов или участков плавучего льда внутри циркуляций. Описывается метод склейки меньших карт ДТ с выделенными на них циркуляциями в большие.

Рассчитанное поле многоядерных циркуляций с учетом их структуры вложенности может быть в дальнейшем использовано для отслеживания траекторий вихрей, их эволюции и трансформации, включая разделение крупных вихрей на более мелкие и, наоборот, слияние мелких в крупные.

Источники финансирования. Работа над статьей в части разработки алгоритма выделения замкнутых циркуляций поддержана грантом РНФ 16-17-10149п, в части подготовки данных спутниковых наблюдений — темой Госзадания № 0149-2019-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rio M.H., Mulet S., Picot N.* Beyond GOCE for the ocean circulation estimate: Synergetic use of altimetry, gravimetry, and in situ data provides new insight into geostrophic and Ekman currents // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41. № 24. P. 8918–8925. doi: 10.1002./2014GL061773
2. *Chelton D., Schlax M., Samelson R.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Prog. Oceanogr.* 2011. V. 334. P. 328–332.
3. *Tulloch R., Marshall J., Smith K.S.* Interpretation of the propagation of surface altimeter observations in terms of planetary waves and geostrophic turbulence // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. C02005.
4. *Кошляков М.Н., Грачев Ю.М., Михайличенко Ю.Г., Сажина Т.Г., Яремчук М.И.* Генерация синоптических океанских вихрей в районе ПОЛИМОДЕ // *Океанология.* 1984. Т. 24. № 1. С. 5–14.
5. *Мирабель А.П., Монин А.С.* Геоострофическая турбулентность // *Изв. АН СССР.* 1980. Т. 16. № 10. С. 1011–1023.
6. *Cui W., Yang J., Ma Y.* A statistical analysis of mesoscale eddies in the Bay of Bengal from 22-year altimetry data // *Acta Oceanologica Sinica.* 2016. V. 35. № 11. P. 16–27.
7. *Cui W., Wang W., Zhang J., Yang J.* Multicore structures and the splitting and merging of eddies in global oceans from satellite altimeter data // *Ocean Sci.* 2019. V. 15. P. 413–430.
8. *Faghmous J.H., Frenger I., Yao Y., Warmka R., Lindell A., Kumar V.* A daily global mesoscale ocean eddy dataset from satellite altimetry // *Scient. Data.* 2015. V. 2. P. 150028.
9. *Mason E., Pascual A., McWilliams J.C.* A new sea surface height-based code for oceanic mesoscale eddy tracking // *J. Atmos. Ocean. Tech.* 2014. V. 31. P. 1181–1188.
10. *Souza J., de Boyer Montegut C., Cabanes C., Klein P.* Estimation of the Agulhas ring impacts on meridional heat fluxes and transport using ARGO floats and satellite data // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L21602.
11. *Sun M., Tian F., Liu Y., Chen G.* An improved automatic algorithm for global eddy tracking using satellite altimeter data // *Remote Sensing.* 2017. V. 9. P. 206.
12. *Okubo A.* Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences // *Deep Sea Res. Oceanogr. Abstr.* 1970. V. 17. P. 445–454.
13. *Weiss J.* The dynamics of enstrophy transfer in two-dimensional hydrodynamics // *Phys. D.* 1991. V. 48. P. 273–294.
14. *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. V. 112. C05043.
15. *Tambie J.D., Farag-Miller M., Miller K., Ramlal B., Sutherland M.* A New Wavelet Method for Identification of Eddies and Assessment of Incidents on Islands of the Eastern Caribbean // *Mar. Geodesy.* 2019. V. 42. № 3. P. 227–245.
16. *Turiel A., Isern-Fontanet J., Garca-Ladona E.* Wavelet filtering to extract coherent vortices from altimetric data // *J. Atmos. Ocean. Tech.* 2007. V. 24. P. 2103–2119.
17. *Кубряков А.А., Станичный С.В.* Синоптические вихри в Черном море по данным спутниковой альтиметрии // *Океанология.* 2015. Т. 55. № 1. С. 65–77.
18. *Chaigneau A., Gizolme A., Grados C.* Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns // *Prog. Oceanogr.* 2008. V. 79. P. 106–119.
19. *Sadarjoen A., Post F.H.* Detection, quantification, and tracking of vortices using streamline geometry // *Vis. Comp. Graph.* 2000. V. 24. P. 333–341.
20. *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 // *J. Atmos. Ocean. Tech.* 2010. V. 27. № 3. P. 564–579.

21. *Ashkezari M.D., Hill C.N., Follett C.N., Forget G., Follows M.J.* Oceanic eddy detection and lifetime forecast using machine learning methods // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. № 23. P. 12234–12241.
22. *Isern-Fontanet J., Garcia-Ladona E., Font J.* Identification of marine eddies from altimetric maps // *J. Atmos. Ocean. Tech.* 2003. V. 20. P. 772–778.
23. *Dong C., Nencioli F., Liu Y., McWilliams J.C.* An automated approach to detect oceanic eddies from satellite remotely sensed sea surface temperature data // *IEEE Geosci. Rem. Sens. Lett.* 2011. V. 8. P. 1055–1059.
24. *Александрин А.И., Александрина М.Г.* Автоматическое выделение вихрей по спутниковым ИК-изображениям // *Всерос. конф. Современные проблемы дистанционного исследования Земли из космоса.* 11–13 ноября 2003. М.: ИКИ РАН. 2004. С. 382–386.
25. *Matsuoka D., Araki F., Inoue Y., Sasaki H.* A new approach to ocean eddy detection, tracking, and event visualization—application to the northwest Pacific Ocean // *Procedia Comput. Sci.* 2016. V. 80. P. 1601–1611.
26. *Viikmäe B., Torsvik T.* Quantification and characterization of mesoscale eddies with different automatic identification algorithms // *J. Coastal Res.* 2013. SI 65. 2077–2082.
27. *Yi J., Du Y., He Z., Zhou C.* Enhancing the accuracy of automatic eddy detection and the capability of recognizing the multi-core structures from maps of sea level anomaly // *Ocean Sci.* 2014. V. 10. P. 39–48.
28. *Петкилёв П.С.* Обзор алгоритмов обнаружения и трекинга мезомасштабных вихрей // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2017. Т. 14. № 3. С. 129–149.
29. *Кошляков М.Н., Савченко Д.С., Тараканов Р.Ю.* Энергообмен между струями Антарктического циркумполярного течения и синоптическими вихрями в проливе Дрейка и море Скотия // *Океанология.* 2018. Т. 58. № 3. С. 347–357.
30. *Кошляков М.Н., Савченко Д.С., Тараканов Р.Ю.* Энергия струй Антарктического циркумполярного течения и синоптических вихрей в приповерхностном слое Южного океана // *Океанология.* 2019 а. Т. 59. № 3. С.
31. *Кошляков М.Н., Репина И.С., Савченко Д.С., Тараканов Р.Ю., Тароян В.К.* Структура и изменчивость синоптических океанских возмущений в проливе Дрейка и море Скотия // *Океанология.* 2019 б. Т. 59. № 2. С. 187–197.
32. *Тараканов Р.Ю.* Море Скотия и пролив Дрейка как орографический барьер для Антарктического циркумполярного течения // *Океанология.* 2012. Т. 52. № 2. С. 176–189.
33. *Тараканов Р.Ю., Грищенко А.М.* Струи Антарктического циркумполярного течения в проливе Дрейка по данным гидрофизических разрезов // *Океанология.* 2018. Т. 58. № 4. С. 541–555.
34. *Тароян В.К., Тараканов Р.Ю.* Оценка параметров вихревого поля в проливе Дрейка и море Скотия статистическими методами // *Материалы Первой международной научно-технической по термогидромеханике океана «Современные проблемы термогидромеханики океана СПТО-2017»:* Сб. ст./ [Костяной А.Г., Свиридов С.А.]. М.: ИО РАН. 2017. С. 173.

On the Revealing Closed Circulations on Satellite Maps of Dynamic Topography of the Ocean Surface

R. Y. Tarakanov

*P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS
Nakhimovskiy pr-t, 36, Moscow, 117997, Russia
E-mail: rtarakanov@gmail.com*

Received: 16.05.2019

Accepted: 29.05.2019

An algorithm for revealing closed multi-core circulations on digital maps of dynamic topography (DT) is described. The algorithm consists in the expansion of eddies over the area from their cores (local maxima/minima of the DT) until the DT sills corresponding to these cores are reached, and is carried out in several iterations until the points belonging to the closed circulations are completely exhausted. The algorithm is an exact numerical solution of the problem of determining the value of the DT for a closed loop, the most distant from the core of circulation. The algorithm takes into account the problems of nesting into each other circulations of a different sign, the possible intersection with each other of the circulation of a different sign on the numerical grid, as well as the possible existence of islands or floating ice inside the circulations. A method is described for gluing smaller DT maps with the circulations revealed on them to larger maps.

Keywords: closed circulations, dynamic topography, satellite altimetry.