Временная изменчивость характеристик мезомасштабных вихрей в Австрало-Антарктическом бассейне (по спутниковым данным)

Т.В. Белоненко, Н.В. Сандалюк

Санкт-Петербургский государственный университет Санкт-Петербург, 199034, Россия E-mail: btvlisab@yandex.ru

Данные об аномалиях уровня моря архива AVISO, предоставляемые порталом Copernicus Marine Environment Monitoring Service, и данные массива Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH, полученные методом автоматической идентификации вихрей, сравниваются на примере двух долгоживущих мезомасштабных вихрей Австрало-Антарктического бассейна. Рассчитываются по длинноволновому приближению теоретические фазовые скорости волн Россби, эмпирические скорости по изоплетам уровня методом Радона, а также скорости перемещения рассматриваемых динамических структур по данным массива Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH. Показано, что эмпирические оценки скоростей несколько превышают теоретические, но значительно уступают оценкам скоростей, рассчитанным по массиву мезомасштабных вихрей, выделенных методом автоматической идентификации. Для рассматриваемых динамических структур анализируется временная изменчивость амплитуды, орбитальной скорости, радиуса, скорости перемещения и параметра нелинейности. Показано, что временная изменчивость этих характеристик существенно нестационарна, а экстремумы могут превышать средние значения в 2–3 раза.

Ключевые слова: уровень океана, альтиметрические измерения, мезомасштабные вихри, волны Россби, параметр нелинейности, Австрало-Антарктический бассейн, массив Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH

Одобрена к печати: 10.07.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-189-199

Введение

Теоретические исследования последних лет показывают, что основной причиной генерации мезомасштабных (синоптических) вихрей, являющихся проявлением волн Россби в океане, является бароклинная неустойчивость крупномасштабных течений приповерхностного слоя океана (Каменкович и др., 1987; Монин, Жихарев, 1990; Незлин, 1986; Жмур, 2011; Killworth et al., 1997; Maharaj et al., 2007).

Сегодня получены убедительные доказательства, что волны Россби вносят большой вклад в низкочастотную изменчивость уровня океана (Белоненко, 2012; Белоненко и др., 2004; Challenor et al., 2001; Chelton, Schlax, 1996; Chelton et al., 2007; LaCasce, Pedlosky, 2004). Интерес геофизиков к волнам Россби с каждым годом растёт, однако до недавнего времени теоретические выводы явно опережали эмпирические представления. С развитием альтиметрических методов и доступностью регулярных наблюдений за уровнем наступил новый этап исследования синоптической изменчивости океана. Спутниковые альтиметры позволяют получать измерения уровня океана с точностью 1–2 см относительно эллипсоида Земли (Fu, Le Traon, 2006) и являются сегодня основным источником непрерывно поступающей информации об уровне океана.

Анализ последовательности альтиметрических карт позволяет получить эмпирические оценки характеристик волн Россби. В зависимости от целей и задач исследования перемещение неоднородностей в поле аномалий уровня описывают в терминах волн Россби или мезомасштабных вихрей. На зональных изоплетах аномалий уровня океана, построенных по данным спутниковых альтиметров, отражено перемещение в западном направлении этих неоднородностей. Как правило, при анализе изоплет скорости их перемещения сравниваются с фазовыми скоростями волн Россби (Белоненко, 2012; Белоненко, Кубряков, 2014; Challenor et al., 2001; Chelton, Schlax, 1996; Chelton et al., 2007; Maharaj et al., 2007), а спектральный анализ данных позволяет оценить параметры этих волн (Belonenko et al., 2016; Chelton et al., 2007; Maharaj et al., 2007).

Развитие спутниковой океанологии, в частности альтиметрических продуктов, а также рост доступных вычислительных мощностей вызвали бурное развитие автоматических алгоритмов обнаружения и трекинга (отслеживания) вихрей, что позволяет получать новую информацию о динамических и кинематических характеристиках вихрей. Подробный обзор этих алгоритмов приведён в работе (Петкилёв, 2017). Среди множества различных методов автоматической идентификации наиболее популярным является алгоритм обнаружения и трекинга вихрей, применённый к полям аномалий уровня океана (Chelton et al., 2011). Одним из несомненных преимуществ этого алгоритма является систематизация мезомасштабных вихрей в открытом архиве Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH.

В настоящей работе мы рассматриваем два традиционных подхода к анализу данных на примере двух мезомасштабных вихрей, взятых из массива Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH. Из вихрей, расположенных в Австрало-Антарктическом бассейне (Сандалюк и др., 2018), представленных в массиве, мы выделили два — циклонический (С) и антициклонический (АС), которые являются наиболее долгоживущими и траектории которых в большей степени имеют выраженную зональную протяжённость. Оба вихря в течение своего жизненного цикла уверенно дрейфовали на запад. Нас интересовало, во-первых, в какой степени характеристики волн Россби соотносятся с характеристиками этих вихрей в массиве Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH, и во-вторых — как меняются во времени параметры мезомасштабных вихрей, которые, как сказано выше, являются проявлением волн Россби в океане.

Данные

Использовался массив аномалий уровня моря AVISO, доступный на портале Copernicus Marine environment monitoring service (http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=SEALEVEL_GLO_PHY_L4_REP_OBSERVATIONS_008_047). В нём содержатся аномалии уровня относительно средней динамической топографии MDT, распространяемые Aviso+ (http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/mdt.html). Данные хранятся в формате NetCDF и представляют собой трёхмерный массив, полученный путём комбинирования данных со всех альтиметрических миссий в период с 1993 г. по настоящее время, включая спутники серии TOPEX/ Poseidon и ERS. Пространственное разрешение данных составляет 0,25° широты и долготы, временная дискретность — 7 сут. Как описано подробно в работе (Pujol et al., 2016), обработ-ка данных AVISO включала новые сенсорные и атмосферные поправки, специфические для сенсоров, новую калибровку различных высотомеров, новую модель приливов и учитывала более длительный базовый период в 20 лет для оценки для среднего уровня моря.

Также использовался массив Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH, представленный на сайте (http://wombat.coas.oregonstate.edu/eddies/). Данные по мезомасштабным вихрям предоставляются для всего Мирового океана с дискретностью 1 сут. Процедура идентификации вихрей разработана авторами (Chelton et al., 2011) и усовершенствована в сотрудничестве с CLS/DUACS (Collecte Localisation Satellites/Data Unification and Altimeter Combination System).

Суть работы алгоритма идентификации заключается в следующем. Отдельный мезомасштабный вихрь, идентифицированный с помощью автоматического алгоритма, выделяется как связанный набор пикселей, которые удовлетворяют определённому ряду критериев, таких как наличие локального максимума (минимума) в поле SSH (Sea Surface Height) для антициклонического (циклонического) вихря, согласованность значений аномалий внутри контура этого скопления со знаком его экстремума. Максимальный размер вихря ограничивался количеством 1000 пикселей, минимальный — 8 пикселей, минимальная амплитуда вихря составляла 1 см. После идентификации вихрей для определения траектории каждой мезомасштабной структуры далее применялась процедура автоматического отслеживания вихрей, которая подробно описана в работах (Петкилёв, 2017; Chelton et al., 2011).

MaccuB Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH содержит следующую информацию:

- амплитуда (см) значение экстремума аномалии уровня внутри контура вихря; амплитуда каждого антициклонического вихря определялась как разница $A = h_{\text{max}} h_0$, амплитуда циклонического вихря: $A = h_0 h_{\text{min}}$, где h_0 средняя высота уровня относительно пограничного замкнутого контура SSH; h_{max} максимальное положительное отклонение от h_0 ; h_{min} максимальное отрицательное отклонение от h_0 . Таким образом, для вихря любой полярности амплитуда представляет собой положительную величину;
- радиус (км) определялся как величина, равная радиусу окружности, площадь которой совпадает с площадью пограничного замкнутого контура SSH, на котором орбитальная скорость вихря максимальна;
- орбитальная скорость (см/с) значение средней геострофической скорости, приуроченное к наиболее удалённому от центра вихря замкнутому контору SSH: $v = gf^{-1}A/L$, где g ускорение свободного падения, f параметр Кориолиса, A амплитуда вихря, L радиус;
- время существования вихря количество дней, в течение которых данный вихрь регистрировался в поле аномалий уровня.

Таким образом, основные кинематические характеристики вихрей можно получить непосредственно из массива Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH. В массиве также фиксируются данные о местоположении вихря на каждые сутки его перемещения.

Результаты

Для расчётов расстояния, пройденного вихрем в течение суток, использовалась реализация формул сфероидической геодезии, представленная в пакете MATLAB. Соответственно, мы можем определить как скорость перемещения мезомасштабного вихря (*c*) на каждые сутки, так и параметр нелинейности вихря $\eta = v/c$. Если параметр нелинейности $\eta > 1$, то утверждается, что вихри могут захватывать в себя воду и переносить её неизменные свойства вдоль своего пути распространения. Данное «условие захвата» $\eta > 1$ впервые было сформулировано М. В. Незлиным (Незлин, 1986) и затем повторно в работе (Chelton et al., 2011).

На *рис. 1a* (см. с. 192) показаны треки вихрей, выделенных методом автоматической идентификации на дату 5 июля 2008 г. Из всего множества вихрей нами выбраны два: AC (антициклонический) и C (циклонический), их траектории показаны на *рис. 16*. Вихрь C перемещается преимущественно вдоль 45° ю. ш. от 140 до 125° в.д., время жизни составляет 727 дней (04.04.2007–30.03.2009), а траектория вихря AC на участке от 135 до 125° в.д. проходит преимущественно по 36° ю. ш., время жизни равно 892 дней (09.07.2007–16.12.2009).

В *таблице* представлены средние характеристики вихрей AC и C, рассчитанные по массиву Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH. Оба вихря являются долгоживущими и, дрейфуя на запад, прошли значительные расстояния. Вихрь AC имеет большую амплитуду, чем C, и, соответственно, большую орбитальную скорость v. В то же время средние масштабы (радиусы) вихрей незначительно отличаются друг от друга.

На *рис. 2* (см. с. 192) представлены пространственно-временные разрезы в поле аномалий уровня (изоплеты) вдоль 36 и 45° ю.ш. на период существования рассматриваемых вихрей. Характерный наклон аномалий в поле уровня описывает перемещения волн Россби в западном направлении и позволяет оценить эмпирическую скорость волн Россби.



Рис. 1. Треки вихрей открытого океана в Австралийско-Антарктическом бассейне, зафиксированные на дату 5 июля 2008 г. (*a*); отдельные треки для циклонического (C) и антициклонического (AC) вихрей (б). Красным цветом показаны треки антициклонов, синим — циклонов



Рис. 2. Пространственно-временные разрезы в поле аномалий уровня океана по 36° ю. ш. (*a*) и 45° ю. ш. (*б*). Чёрной линией выделены участки, соответствующие вихрям АС (*a*) и С (*б*)

Используя метод Радона (Challenor et al., 2001), по изоплетам вдоль 36 и 45° ю.ш. мы рассчитали скорости перемещения вихрей: 3,4 см/с для AC и 1,9 см/с для C соответственно. Далее мы также получили теоретические оценки фазовых скоростей волн Россби по длинноволновому приближению:

$$c = \beta R_1^2, \tag{1}$$

где R_1 — бароклинный радиус деформации Россби ($R_1 = 45$ км для 36° ю.ш. и $R_1 = 25$ км для 45° ю.ш., см. (Chelton et al., 1996)): для AC скорость волн Россби составляет 2,9 см/с и для C — 1,3 см/с. Видно, что эмпирические фазовые скорости несколько превышают теоретические оценки. Анализируя данные массива Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH, мы также рассчитали средние скорости перемещения вихрей AC и C, которые, как оказалось, превышают и теоретические, рассчитанные методом Радона по изоплетам (см. *рис. 2*). Результаты представлены в *таблице*.

Вихрь	AC	С
Продолжительность «жизни» по данным массива Mesoscale (дни)	892	727
Пройденная дистанция по данным массива Mesoscale (км)	5419	3998
Средняя орбитальная скорость <i>v</i> по данным массива Mesoscale (см/с)	22	12
Средняя амплитуда А по данным массива Mesoscale (см)	11	7
Средний радиус L (км)	65	67
Эмпирическая скорость волн/мезомасштабных вихрей, рассчитанная по изоплетам (см/с)	3,4	1,9
Теоретическая фазовая скорость волн Россби (см/с)	2,9	1,3
Средняя скорость вихрей, рассчитанная по данным массива Mesoscale (см/с)	7	6
Среднее значение параметра нелинейности η	4,2	2,7

Полученные результаты не являются неожиданными. Большие значения эмпирических скоростей мезомасштабных вихрей по сравнению с теоретическими оценками для волн Россби отмечались многими исследователями для различных районов Мирового океана (Belonenko et al., 2016; Chelton et al., 2011). Также не удивляют увеличенные значения скоростей вихрей AC и C, рассчитанные по массиву Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH. Это связано с тем, что как по изоплетам, так и по формуле (1) вычисляется только зональная составляющая перемещения. Однако, как можно увидеть на *рис. 26*, в действительности траектории вихрей не являются прямолинейными: вихри перемещаются не только в зональном, но и в меридиональном направлении, сохраняя при этом преимущественное направление движения на запад.

Значения параметра η в *таблице* означают, что оба вихря существенно нелинейны. На *рис. 16* видно, что вихри меандрируют, их траектории имеют довольно сложный вид, в особенности у вихря AC в начале и в конце его жизненного цикла, у вихря C — в конце.

На *рис. 2* уже можно увидеть, что в вихрях амплитуда меняется во времени и в пространстве. Анализ данных массива Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH подтвердил, что не только для амплитуды, но и для всех других параметров характерно изменение во времени. Для исследования временной изменчивости характеристик вихрей AC и C мы применили сглаживание с шириной окна 30 дней, чтобы отфильтровать внутримесячные колебания.

На рис. *3* (см. с. 194) показано, что амплитуда вихрей в течение их жизненного цикла изменяется от 3,4 до 15,7 см для AC и от 1,5 до 12,2 см для C. Диапазон изменчивости орбитальной скорости для AC — от 10 до 35,7 см/с; для C — от 6,3 до 19,9 см/с.



Рис. 3. Временная изменчивость амплитуды (см) и орбитальной скорости (см/с) для АС (*a*) и С (*б*)



Рис. 4. Временная изменчивость радиуса (км) АС (а) и С (б)



Рис. 5. Временная изменчивость скорости перемещения (см/с) вихрей АС (а) и С (б)



Рис. 6. Временная изменчивость параметра нелинейности η для вихрей AC (*a*) и C (*б*). Пунктир показывает средние значения параметра

На рис. 3 можно также отметить согласованность экстремумов орбитальной скорости и амплитуды вихрей, что вполне объяснимо, так как орбитальная скорость в каждой точке сетки массива Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH рассчитывается по геострофическим формулам. Диапазон аномалий уровня на изоплете для вихря AC (см. *puc. 2a*) соответствует значениям амплитуды на *puc. 3a*. Для вихря C несколько иначе, так как для циклонических вихрей амплитуды рассчитываются как разность средней высоты уровня моря на границе замкнутого контура и минимальных значений аномалий уровня в вихре, поэтому на *puc. 26* и *36* эти значения имеют разные знаки, но они при этом и не совпадают по величинам. Судя по *puc. 26*, циклонический вихрь C был наиболее выражен только в конце жизненного цикла: в конце 2008 — начале 2009 г., однако на *puc. 36* это не проявляется. На *puc. 36* амплитуда вихря C постепенно уменьшается от 12 см, не превышая 6 см в конце его жизненного цикла.

Очевидно, подобные несоответствия связаны с особенностями процедуры автоматической идентификации, при которой могут возникать погрешности в определении радиуса вихря и, соответственно, границы замкнутого контура, относительно которой рассчитываются аномалии в поле уровня. На *рис. 4* (см. с. 194) видно, что радиусы вихрей, даже с учётом среднемесячного сглаживания, имеют максимумы, значительно превышающие средние значения. Для вихря АС подобная ситуация наблюдается в июле 2008 г. (см. *рис. 4a*), когда радиус вихря АС превышает 100 км, в то время как средние значения характеристики — 65 км (см. *таблицу*). Для вихря С радиус резко увеличивается до 114 км в начале 2009 г. (см. *рис. 4б*) при средних значениях 67 км, и не исключено, что увеличение радиуса вихрей, сопровождаемое уменьшением его амплитуды, могло быть обусловлено особенностями процедуры автоматической идентификации. Следовательно, при анализе данных массива Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH необходимо учитывать, что выделяемые автоматическим образом неоднородности в поле аномалий уровня определяются комплексом условий и не всегда полностью соответствуют физическим объектам — мезомасштабным вихрям в океане, наблюдаемым также и по изоплетам аномалий уровня океана.

На *рис. 5* (см. с. 195) показана скорость перемещения вихрей. Видно, что для обоих типов вихрей скорость меняется значительно, а их движение сильно отличается от равномерного. Возможно, это связано с бароклинной неустойчивостью вихрей, при которой баланс силы Кориолиса и градиента давления нарушается, что приводит к появлению дополнительного ускорения, заставляющего жидкую частицу двигаться к широте, где такой баланс выполняется. На движение вихрей также влияет топография. В результате, как мы видели выше (см. *рис. 26*), вихри перемещаются не только в горизонтальном, но и в меридиональном направлении, что обуславливает неравномерное изменение скорости их движения. Соответственно, и параметр нелинейности η также изменяется значительно, в отдельные промежутки времени намного превышая средние значения (*рис. 6*, см. с. 195).

Выводы

Мы проанализировали средние характеристики и временную изменчивость двух долгоживущих вихрей в Австрало-Антарктического бассейне по данным спутниковой альтиметрии и по данным массива Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH. Мы выделили на изоплетах в поле аномалий уровня моря два долгоживущих мезомасштабных вихря — антициклонический и циклонический и проследили их перемещение. Для этих вихрей рассчитали скорости перемещения и параметры нелинейности и проанализировали временную изменчивость их характеристик.

Мы показали, что значения амплитуды циклонического вихря по массиву Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH отличаются от амплитуды в поле аномалий уровня, что, возможно, связано с особенностями процедуры автоматической идентификации.

Установлено, что рассматриваемые вихри перемещаются преимущественно зонально, однако также присутствует и меридиональная составляющая. Рассчитаны скорости перемеще-

ния вихрей различными способами: по дисперсионному соотношению для волн Россби (теоретические оценки), по методу Радона (эмпирические оценки) и по массиву Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH. Выяснилось, что эмпирические оценки скоростей несколько превышают теоретические, но значительно уступают оценкам скоростей, рассчитанным по данным массива Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH. Последнее обстоятельство обусловлено тем, что в указанном массиве учитывается перемещение вихрей не только в зональном, но и меридиональном направлении. Средние скорости вихрей, рассчитанные различными способами, представлены в *таблице*. В среднем траектория циклонического вихря близка к зональной, но характеризуется наличием петель и реверсивных участков, вследствие чего средняя скорость циклонического вихря по массиву Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH оказалась выше оценённой по перемещению на запад.

Показано, что временная изменчивость характеристик существенно нестационарна, а экстремумы могут превышать средние значения в 2–3 раза.

В целом сопряжённый анализ изоплет и данных массива Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH представляется перспективным методом исследования мезомасштабной изменчивости океана. Однако при анализе данных массива Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH необходимо учитывать, что выделяемые автоматическим образом неоднородности в поле аномалий уровня определяются комплексом условий и зависят от особенностей процедуры идентификации.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-05-00452 и 17-05-00034.

Литература

- 1. *Белоненко Т. В.* Наблюдения волн Россби в северо-западной части Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 209–215.
- 2. *Белоненко Т. В., Кубряков А.А.* Временная изменчивость фазовой скорости волн Россби в Северной части Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 9–18.
- 3. *Белоненко Т.В., Захарчук Е.А., Фукс В.Р.* Градиентно-вихревые волны в океане. СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 2004. 215 с.
- 4. Жмур В. В. Мезомасштабные вихри в океане. М: Изд-во ГЕОС, 2011. 290 с.
- 5. *Каменкович В. М., Кошляков М. Н., Монин А. С.* Синоптические вихри в океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 310 с.
- 6. *Монин А. С., Жихарев Г. М.* Океанские вихри // Успехи физических наук. 1990. Т. 160. Вып. 5. С. 1–47.
- 7. Незлин М. В. Солитоны Россби // Успехи физических наук. 1986. Т. 150. Вып. 1. С. 1–58.
- 8. *Петкилёв П. С.* Обзор алгоритмов обнаружения и трекинга мезомасштабных вихрей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 129–149.
- 9. *Сандалюк Н. В., Гото К., Белоненко Т. В.* Синоптические вихри в Австрало-Антарктическом бассейне по данным спутниковой альтиметрии // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 50. С. 109–117.
- Belonenko T. V., Kubrjakov A. A., Stanichny S. V. Spectral Characteristics of Rossby Waves in the Northwestern Pacific based on Satellite Altimetry // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. V. 52. Iss. 9. P. 920–928.
- 11. *Challenor P. G., Cipollini P., Cromwell D.* Use of the 3D Radon transform to examine the properties of oceanic Rossby waves // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2001. V. 18. P. 1558–1566.
- 12. *Chelton D. B.*, *Schlax M. G.* Global observations of oceanic Rossby waves // Science. 1996. V. 272 P. 234–238.
- 13. Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M., de Szoeke R. A. Global observations of large oceanic eddies // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. No. 15.
- 14. *Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies // Progress in Oceanography. 2011. V. 91. P. 167–216.
- Fu L. L., Le Traon P.-Y. Satellite altimetry and ocean dynamics // Comptes Rendus Geosciences. 2006. V. 338. Iss. 14–15. P. 1063–1076.

- 16. *Killworth P.D., Chelton D.B., de Szoeke R.A.* The speed of observed and theoretical long extra-tropical planetary waves // J. Phys. Oceanogr. 1997. V. 27. P. 1946–1966.
- 17. *LaCasce J. H.*, *Pedlosky J.* The Instability of Rossby Basin Modes and the Oceanic Eddy Field // J. Physical Oceanography. 2004. V. 34. P. 2027–2041.
- Maharaj A. M., Cipollini P., Holbrook N. J., Killworth P. D., Blundell J. R. An evaluation of the classical and extended Rossby wave theories in explaining spectral estimates of the first few baroclinic modes in the South Pacific Ocean // Ocean Dynamics. 2007. V. 57. No. 3. P. 173–187.
- 19. Pujol M.-I., Faugère Y., Taburet G., Dupuy S., Pelloquin C., Ablain M., Picot N. DUACS DT2014: The new multi-mission altimeter dataset reprocessed over 20 years // Ocean Science. 2016. V. 12. P. 1067–1090. DOI: 10.5194/os-12-1067-2016.

Temporal variability of mesoscale eddies characteristics in the Australian – Antarctic basin (based on satellite data)

T. V. Belonenko, N. V. Sandalyuk

Saint Petersburg State University, St. Petersburg 199034, Russia E-mail: btvlisab@yandex.ru

We compare two different types of data for two long-lived eddies in the Australian – Antarctic basin. These are sea level anomaly data from the Copernicus Marine Environment Monitoring Service portal and dataset from portal Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH obtained via automated eddy identification procedure. Using altimetry data from the Copernicus Marine Environment Monitoring Service, we calculate phase velocities of the Rossby waves basing on long-wave approximation. We also calculate empirical velocities from the Hovmöller diagrams using Radon method and velocities of eddies provided by Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH. The empirical velocity estimates are shown to be slightly higher than velocity estimates predicted by the Rossby wave theory, but they are significantly lower than velocities of mesoscale eddies calculated from the dataset of Mesoscale Eddies in Altimeter Observation speed, drift speed, lifetime, radius, and parameter of nonlinearity. Temporal variability of eddy physical characteristics are proved very changeable and the extremum values can be twice to thrice the mean values.

Keywords: SLA, sea level anomaly, sea level, altimetry, mesoscale, eddies, Rossby waves, Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH, nonlinearity parameter, Australian-Antarctic basin

Accepted: 10.07.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-189-199

References

- 1. Belonenko T.V., Nablyudeniya voln Rossbi v severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana (Rossby wave observation in the Northwest Pacific), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 3, pp. 209–215.
- 2. Belonenko T. V., Kubryakov A. A., Vremennaya izmenchivost' fazovoi skorosti voln Rossbi v Severnoi chasti Tikhogo okeana (Temporal variability of the phase velocity of Rossby waves in the North Pacific), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 9–18.
- 3. Belonenko T. V., Zaharchuk E. A., Fuks V. R., *Gradientno-vikhrevye volny v okeane* (Gradient-vorticity waves in the Ocean), St. Petersburg: Izd. SPbSU, 2004, 215 p.
- 4. Zhmur V.V., *Mezomasshtabnye vikhri v okeane (Mesoscale eddies in the ocean)*, Moscow: Izd. GEOS, 2011, 290 p.
- 5. Kamenkovich V. M., Koshlyakov M. N., Monin A. S., *Sinopticheskie vikhri v okeane* (Synoptic eddies in the ocean), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987, 310 p.

- 6. Monin A. S., Zhiharev G. M., Okeanskie vikhri (Ocean eddies), *Uspekhi fizicheskih nauk*, 1990, Vol. 160, No. 5, pp. 1–47.
- 7. Nezlin M. V., Solitony Rossbi (Rossby Solitons), Uspekhi fizicheskih nauk, 1986, Vol. 150, No. 5, pp. 1–58.
- 8. Petkilev P. S., Obzor algoritmov obnaruzheniya i trekinga mezomasshtabnykh vikhrei (Review of mesoscale eddy detection and tracking algorithms), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 129–149.
- 9. Sandalyuk N. V., Goto K., Belonenko T. V., Sinopticheskie vikhri v Avstralo-Antarkticheskom basseine po dannym sputnikovoi al'timetrii (A study of mesoscale eddies in Australian-Antarctic basin using altimetry data), *Uchenye zapiski RGGMU*, 2018, No. 50, pp. 109–117.
- Belonenko T. V., Kubrjakov A. A., Stanichny S. V., Spectral Characteristics of Rossby Waves in the Northwestern Pacific based on Satellite Altimetry, *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, Issue 9, pp. 920–928.
- 11. Challenor P.G., Cipollini P., Cromwell D., Use of the 3D Radon transform to examine the properties of oceanic Rossby waves, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2001, Vol. 18, pp. 1558–1566.
- 12. Chelton D. B., Schlax M. G., Global observations of oceanic Rossby waves, *Science*, 1996, Vol. 272, pp. 234–238.
- 13. 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.
- 14. Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R.M, Global observations of nonlinear mesoscale eddies, *Prog. Oceanogr.*, 2011, Vol. 91, pp. 167–216.
- 15. Fu L. L., Le Traon P.-Y., Satellite altimetry and ocean dynamics, *Comptes Rendus Geosciences*, 2006, Vol. 338, Issues 14–15, pp. 1063–1076.
- 16. Killworth P. D., Chelton D. B., de Szoeke R. A., The speed of observed and theoretical long extra-tropical planetary waves, *J. Phys. Oceanogr.*, 1997, Vol. 27, pp. 1946–1966.
- 17. LaCasce J. H., Pedlosky J., The Instability of Rossby Basin Modes and the Oceanic Eddy Field, *J. Phys. Oceanogr.*, 2004, Vol. 34, pp. 2027–2041.
- Maharaj A. M., Cipollini P., Holbrook N. J., Killworth P. D., Blundell J. R., An evaluation of the classical and extended Rossby wave theories in explaining spectral estimates of the first few baroclinic modes in the South Pacific Ocean, *Ocean Dynamics*, 2007, Vol. 57, No. 3, pp. 173–187.
- 19. Pujol M.-I., Faugère Y., Taburet G., Dupuy S., Pelloquin C., Ablain M., Picot N., DUACS DT2014: The new multi-mission altimeter dataset reprocessed over 20 years, *Ocean Sci.*, 2016, Vol. 12, pp. 1067–109, DOI: 10.5194/os-12-1067-2016.