

УДК [551.461:551.465.48]:528.8(211-13)

**СИНОПТИЧЕСКИЕ ВИХРИ В АВСТРАЛО-АНТАРКТИЧЕСКОМ  
БАССЕЙНЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ*****Н.В. Сандалюк<sup>1</sup>, К. Гото<sup>2</sup>, Т.В. Белоненко<sup>1</sup>***<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, nikitasantaliuk@gmail.com<sup>2</sup> Токийский университет, sig.terza.3@gmail.com

Анализируется синоптическая изменчивость уровня океана на примере акватории, расположенной в Южном полушарии. Представлены результаты анализа вихрей открытого океана, выделенных методом автоматической идентификации для Австрало-Антарктического бассейна на дату 08.04.1994. Рассчитывались и анализировались основные физические характеристики: амплитуда, окружная скорость и скорость перемещения, продолжительность жизни вихрей и их радиус. Для каждого вихря получены оценки адвективного параметра нелинейности. Отслежены траектории перемещения каждого отдельного вихря — с начала его зарождения до момента его исчезновения с карт аномалий уровня. Эмпирические оценки характеристик наблюдаемых вихрей сравнивались с теоретическими, полученными на основе линейной теории. Было выявлено существенное доминирование вклада нелинейных эффектов в синоптическую изменчивость уровня в рассматриваемой акватории. Вместе с тем, для отдельных вихрей  $\beta$ -эффект оказывает значительное влияние на вихревую динамику в данном бассейне.

*Ключевые слова:* уровень океана, альтиметрические измерения, мезомасштабные вихри, волны Россби, критерий нелинейности, Южный океан, Индийский океан, SLA, синоптические вихри, аномалии уровня океана.

**MESOSCALE EDDIES IN AUSTRALIAN-ANTARCTIC BASIN  
BASED ON ALTIMETRY DATA*****N.V. Sandalyuk<sup>1</sup>, K. Goto<sup>2</sup>, T.V. Belonenko<sup>1</sup>***<sup>1</sup> Saint Petersburg State University<sup>2</sup> The University of Tokyo

In this work we studied mesoscale eddies, identified with automated eddy identification procedure in the Australian-Antarctic basin for April, 8 1994. We studied and analyzed main physical characteristics of eddies: amplitude, rotation speed, translocation speed, lifetime, and radius. The advective nonlinearity parameter was calculated for each eddy separately. For each tracked eddy we calculated its trajectory from the moment of eddy origin until it disappears from the map of sea level anomalies. The calculated empirical estimates for the observed vortices were compared with the theoretical estimates obtained from the linear theory. It was demonstrated that nonlinear effects play a key role in the mesoscale sea level variability in the studied region. At the same time, for some eddies, the  $\beta$  effect has significant influence on the vortex dynamics in the region.

*Keywords:* altimetry, SLA, sea level, mesoscale eddies, Rossby waves, Southern Ocean, Indian Ocean, sea level anomalies.

**Введение**

Синоптическая изменчивость океана проявляется в генерации в океане синоптических (мезомасштабных) вихрей (их масштабы достигают сотен километров, а период вращения составляет от нескольких суток до месяцев), а также

волн Россби. Основной причиной их возникновения является потеря устойчивости океанскими течениями, которая заключается в резком возрастании скорости течения или в смене его направления, в результате чего возникает баротропная неустойчивость (изменение с расстоянием скорости течения в целом) или бароклинная неустойчивость (изменение с расстоянием поля плотности). Теоретические исследования последних лет показывают, что основной причиной генерации синоптических вихрей и волн Россби в океане является бароклинная неустойчивость крупномасштабных течений приповерхностного слоя океана [6, 7, 17, 18].

Незлин [6], рассматривая синоптические вихри в океане, открытые советскими исследователями, как проявление волн Россби на нашей планете, указывает что при их интерпретации необходимо учитывать неоднородность плотности океана по вертикали (обусловленную зависимостью плотности воды от температуры, давления и концентрации растворенных в ней солей). Однако эта неоднородность влечет за собой необходимость учета волнового движения не только по горизонтали, но и по вертикали. Учет вертикального волнового движения в волнах Россби приводит к интересному результату: дисперсионное уравнение для волн структурно остается тем же самым, но в качестве характерного размера дисперсии выступает уже не радиус Россби — Обухова (баротропный радиус деформации), а так называемый внутренний (или бароклиновый) радиус деформации Россби:

$$r_1 = \frac{NH}{m\pi f}, \quad (1)$$

где  $N$  — частота Брента — Вэйсяля,  $m$  — номер моды вертикальных колебаний,  $H$  — глубина бассейна. В океане при  $m = 1$  величина бароклинового радиуса деформации Россби  $r_1$  оказывается весьма близкой к размерам наблюдаемых синоптических вихрей, а скорость их дрейфа на запад, имеющая порядок нескольких см/с, приблизительно соответствует скорости волн Россби в длинноволновом приближении:

$$c = -\beta r_1^2. \quad (2)$$

Поэтому синоптические вихри в океанах рассматриваются как бароклинные волны Россби [6].

До недавнего времени синоптические вихри в океане и волны Россби исследовались преимущественно на теоретическом уровне, не представлялось возможным достоверно оценить их вклад в исследуемые процессы и выделить волны Россби в океане на основе статистически представительных наблюдений, исследовать закономерности их распространения и трансформации в реальных условиях, сопоставить эмпирические данные с теорией. С появлением спутниковой альтиметрии начался новый период изучения синоптической изменчивости океана — по данным спутниковых альтиметрических измерений. Альтиметрические данные имеют широкий пространственный охват и длительный временной ряд (с октября 1992 г.) и регулярно обновляются. На одном из этапов развития альтиметрия достигла высокой точности, равной 1—2 см [15].

В настоящее время доказано, что синоптические вихри и волны Россби вносят большой вклад в низкочастотную изменчивость уровня Мирового океана;

анализируются их характеристики для различных бассейнов, рассчитываемые на основе представительных, статистически обеспеченных массивов данных. При этом остается открытым вопрос об идентификации вихрей на основе данных наблюдений, включая результаты наблюдений со спутников. Отчасти это обстоятельство связано с проблемой аксиоматики и отсутствия однозначного определения вихря, его границы по спутниковым данным, в связи с чем в различных работах эти вопросы решаются по-разному. Очевидно, эта проблема будет решаться в будущем.

Существует четыре основных подхода к описанию вихрей на основе спутниковых альтиметрических данных [8]:

- 1) оценка относительной завихренности [21, 22];
- 2) оценка параметра Окубо — Вейса [23, 28];
- 3) 2-D вейвлет-преобразование [14];
- 4) метод автоматической идентификации, в частности «*winding angle*» method [10, 25].

В настоящей работе рассматриваются синоптические вихри, выделенные методом автоматической идентификации [12] для Австрало-Антарктического бассейна (ААБ), который, являясь частью Австрало-Антарктического сегмента Индийского океана, расположен южнее Австралии и примыкает к границе Южного океана. Полученные оценки масштабов синоптических вихрей и скорости их перемещения для ААБ сравнивались с теоретическими оценками. Эта работа является частью большого исследования, в котором анализ характеристик мезомасштабных вихрей проводится для различных районов Южного полушария. В дальнейшем планируется провести сравнение результатов, полученных для ААБ, с синоптическими вихрями Австрало-Антарктического сегмента Индийского океана, образующимися в стрежне Антарктического циркумполярного течения (АЦТ), которое служит волноводом для волн Россби и синоптических вихрей [16], являясь одним из самых динамически активных районов Южного океана.

## Данные

Метод автоматической идентификации вихрей применяется к данным MSLA DT-2014, а его результаты представлены в массиве «Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH»<sup>1</sup>. Процедура идентификации вихрей разработана *Chelton, Schlax* [12] и усовершенствована в сотрудничестве с CLS/DUACS (Collecte Localisation Satellites/Data Unification and Altimeter Combination System). Для идентификации использовался массив аномалий уровня моря (MSLA) DT-2014 за 22-летний период (с января 1993 г. по апрель 2015 г.), размещенный на сайте AVISO. Как описано подробно в работе [24], обработка данных AVISO включала новые сенсорные и атмосферные поправки, специфические для сенсоров, новую калибровку различных высотомеров, новую модель приливов и учитывала более длительный базовый период (20 лет) для оценки среднего уровня моря. Данные MSLA DT-2014 интерполированы в сетку 0,25° с временной дискретностью один день.

<sup>1</sup> <http://wombat.coas.oregonstate.edu/eddies/>

В процедуре, применяемой для идентификации, каждый вихрь определялся на основе связанных пикселей, которые удовлетворяли определенным критериям. Процедура представляет собой модифицированную версию метода, представленную в работе Уильямса [29]. В массиве учитывались только те вихри, время жизни которых составляло не менее четырех недель. Подробный анализ массива данных можно найти в работе [12]. В массиве «Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH» содержатся различные характеристики вихрей: данные о полярности, которая определяется по знаку аномалий, максимальная окружная скорость  $U$ , а также геометрические характеристики вихрей — амплитуда и радиус. Согласно [12, 24, 29], средние параметры вихрей за каждую отдельную дату в целом характеризуют вихревую активность в районе, не отличающемся повышенной динамической активностью, как, например, районы Гольфстрима или Куро시오, поэтому выбор даты для анализа не имеет существенного значения.

Для выбранной даты (8 апреля 1994 г.) мы построили траектории вихрей, выделенных методом автоматической идентификации, оценили время «жизни» с момента зарождения до момента диссипации и пройденную дистанцию каждого вихря, рассмотрели средние и экстремальные значения скорости дрейфа вихрей  $c$ , а также рассчитали средний параметр нелинейности вихрей в течение их жизненного цикла [7, 12]. Полученные оценки в целом дают наглядное представление о характеристиках синоптических вихрей в ААБ.

### Результаты

В рассматриваемом бассейне 8 апреля 1994 г. наблюдалось 33 синоптических вихря, из которых 21 — антициклонические вихри (АС) и 12 — циклонические (С). В табл. 1 даны осредненные характеристики этих вихрей. На рис. 1 показаны перемещения (треки) вихрей.

Мы видим, что все вихри являются сравнительно долгоживущими: минимальная продолжительность жизни этих вихрей составляет 28 дней, максимальная — 198 дней (два с половиной года). Из рис. 1 видно, что доминирующее направление

Характеристики синоптических вихрей в ААБ,

Полярность	АС	АС	АС	АС	С	С	С	АС	АС	АС	АС	АС	С	С	АС	
Продолжительность жизни, число дней	474	232	146	93	64	28	138	44	68	68	513	98	98	54	232	69
Пройденная дистанция, км	2306	1299	597	319	425	168	1265	270	538	200	1773	364	902	148	1257	347
$c$ , см/с	5,6	6,5	6,3	4,0	7,8	7,2	10,7	7,2	9,3	3,5	4,0	4,4	10,8	3,2	6,3	5,9
$U$ , см/с	11,0	12,4	8,9	14,3	8,6	5,9	12,5	10,3	8,5	7,9	13,6	8,4	9,1	10,0	10,5	8,3
$\eta$	2,0	1,9	1,4	3,6	1,1	0,8	1,2	1,4	0,9	2,3	3,4	1,9	0,8	3,1	1,7	1,4
$A$ , см	6,4	6,2	4,0	5,3	3,5	1,8	4,5	2,8	2,2	2,0	8,1	2,9	2,7	3,9	6,1	3,3
$L$ , км	72	62	66	62	68	67	55	52	61	54	69	64	60	61	66	50

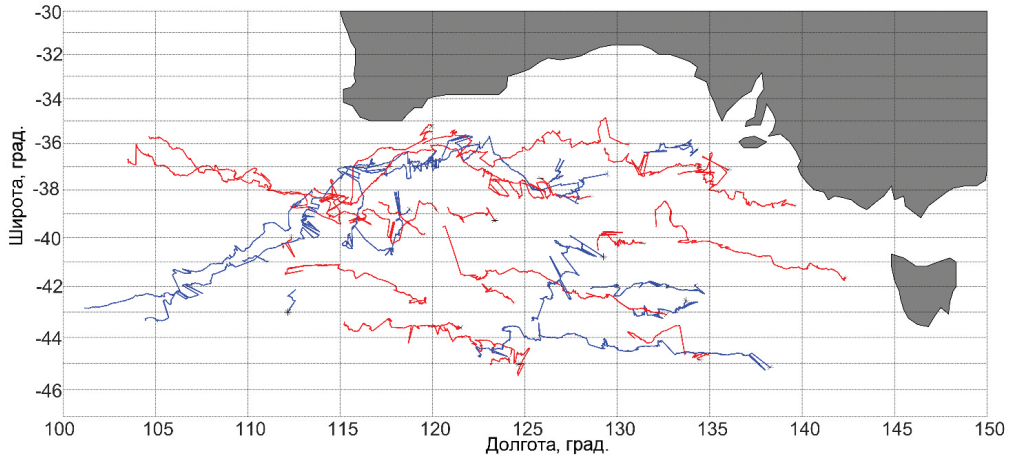


Рис. 1. Треки вихрей открытого океана в ААБ, зарегистрированные на 8 апреля 1994 г.

Красным цветом показаны треки антициклонов, синим — циклонов.

перемещения вихрей — западное. Перемещаясь на запад, вихри проходят огромные расстояния: минимальное расстояние 168 км, максимальное — 4780 км.

Средняя скорость перемещения вихрей ( $c$ ) варьируется в диапазоне от 3,5 до 10,8 см/с. Соответственно и окружная скорость в вихрях ( $U$ ), рассчитанная по геострофическим формулам, изменяется значительно: от 5,9 до 28,0 см/с. Следует отметить, что в таблице указывается максимальная окружная скорость, так как в самом вихре скорость вращения частиц существенно изменяется: от нуля в центре вихря до максимальной с уменьшением к периферии [1]. В табл. 1 приведены также и средние геометрические характеристики синоптических вихрей в рассматриваемом бассейне: амплитуда ( $A$ ) изменяется от 1,8 до 15,7 см, а радиус вихря ( $L$ ) минимальный 50 км и максимальный 81 км.

Таблица 1

зафиксированных на дату 8 апреля 1994 г.

АС	АС	С	АС	АС	АС	С	АС	АС	АС	С	АС	С	АС	С	С	АС
299	147	141	158	152	366	646	654	449	303	284	350	512	421	475	660	918
2732	934	933	430	593	1994	2848	3888	2225	1208	2294	1544	4456	2161	1937	4780	4078
10,6	7,4	9,0	3,2	4,5	6,3	5,1	6,9	5,7	4,6	9,4	5,1	10,0	5,9	4,7	8,4	5,1
11,5	9,3	8,0	12,2	15,3	18,4	10,8	15,4	11,5	10,7	10,6	12,9	14,1	19,5	18,0	28,0	23,0
1,1	1,3	0,9	3,8	3,4	2,9	2,1	2,2	2,0	2,3	1,1	2,5	1,4	3,3	3,8	3,3	4,5
5,1	3,8	3,0	5,4	8,0	8,6	6,9	8,2	6,8	4,5	4,9	8,2	5,8	10,0	10,4	15,7	13,3
66	78	56	64	70	70	81	73	70	81	58	71	76	70	64	67	77

Заметим, что значения радиуса синоптических вихрей в ААБ существенно превышают оценки бароклинного радиуса деформации Россби по формуле (1): согласно [11], оценки бароклинного радиуса деформации для этого района  $r_1 = 2040$  км (в зависимости от широты). Эмпирические оценки скорости перемещения вихрей также превышают теоретические, рассчитанные по формуле (2), которые изменяются в диапазоне от 0,8 до 3,2 см/с. Это может свидетельствовать о существенной роли нелинейных эффектов в формировании синоптического компонента в поле скорости течения и заметной его «турбулизации», в результате чего в уравнении сохранения потенциального вихря нелинейные эффекты подавляют вклад  $\beta$ -эффекта в синоптическую изменчивость [2].

В монографии [3] В.В. Жмур рассматривает значения  $\beta$ -эффекта для различных вихрей и показывает, что для некоторых фиксированных вихрей ведущим эффектом является адвекция вихря, а влияние  $\beta$ -эффекта незначительно. К таким же выводам пришел в 1976 г. Маквилльямс [20, 21], изучавший результаты полигона MODE. К.Н. Фёдоров и А.И. Гинзбург [9], исследовав результаты натуральных измерений и лабораторных экспериментов, также доказали, что в реальных локализованных вихрях  $\beta$ -эффект играет значительно меньшую роль, чем нелинейность. Согласно классификации, представленной в работе Иванова и др. [4],  $\beta$ -эффект должен учитываться, но им можно пренебречь в случае мезомасштабных вихрей. Но в этом случае считается, что теряется возможность описания динамики вихря вдали от ядра, и мы можем изучать только деформацию ядра вихря, а не его траекторию [3].

Однако метод автоматической идентификации позволяет нам изучать и траектории вихрей. Из рис. 1 видно, что траектории вихрей имеют преимущественно зональную направленность, и рассматриваемые вихри в ААБ, так или иначе, все перемещаются на запад.

В работе [12] указывается, что наблюдаемые значения скорости распространения вне тропической зоны, как правило, систематически оказываются выше, чем фазовые скорости, предсказываемые классической теорией свободно распространяющихся линейных волн Россби. Авторы работы [12] ставят под сомнение общепринятую интерпретацию направленного на запад потока энергии как переноса линейными волнами Россби и указывают на важность учета нелинейных динамических процессов в обширных регионах океана.

При исследовании синоптических вихрей используется так называемый параметр нелинейности ( $\eta$ ) вихрей, который определяется как отношение окружной скорости ( $U$ ) к скорости распространения, или дрейфа ( $c$ ). Если параметр нелинейности больше единицы:  $\eta = U/c > 1$ , то утверждается, что вихри могут захватывать в себя воду и переносить ее неизменные свойства вдоль своего пути распространения [6, 12]. По результатам модельных вычислений, в основу которых положен указанный критерий нелинейности, 99 % вихрей на поверхности Мирового океана нелинейны, причем для 84 % циклонов и 75 % антициклонов параметр нелинейности  $\eta \geq 5$ . Параметр нелинейности немного меньше в более низких широтах, где скорость распространения больше, однако даже в широтном поясе 15—25° для 95 % вихрей параметр нелинейности  $\eta > 1$  [12].

В табл. 1 представлены также оценки среднего параметра нелинейности ( $\eta$ ), рассчитанные для вихрей ААБ. Из таблицы видно, что для большинства рассматриваемых вихрей параметр нелинейности превышает единицу, однако для трех вихрей этот параметр меньше единицы, а для несколько вихрей незначительно превышает единицу. Это может означать, что для этих вихрей  $\beta$ -эффект сравним с нелинейными (адвективными) слагаемыми. Для большинства вихрей параметр нелинейности равен 2, а максимальное значение составляет 4,5. Следует отметить, что средние характеристики вихрей показывают сглаженную картину и не учитывают изменения во времени этих параметров, в то время как эти изменения довольно значительные.

### Выводы

Таким образом, анализ синоптических вихрей, выделенных методом автоматической идентификации для ААБ, подтвердил известный вывод о том, что значения эмпирических характеристик наблюдаемых вихрей значительно превышают теоретические оценки, полученные на основе линейной теории [12, 17, 18]. В частности, эмпирические оценки скорости перемещения вихрей ( $c$ ), представленные в табл. 1, превышают теоретические значения, которые изменяются в диапазоне 0,8—3,2 см/с.

Для большинства вихрей оценки среднего параметра нелинейности вихрей за весь период их существования превышают единицу, что означает существенное доминирование вклада нелинейных эффектов в синоптической изменчивости уровня в данном регионе. В сильно нелинейных вихрях линии тока содержат сепаратрису, внутри которой заключены захваченные частицы, переносимые вместе с вихрями; при этом параметр нелинейности значительно превышает единицу [6]. Вместе с тем, для отдельных вихрей параметр нелинейности меньше единицы, и это означает, что для них  $\beta$ -эффект в равной или большей степени влияет на вихревую динамику в рассматриваемом регионе.

На основе анализа 33 синоптических вихрей в ААБ получены средние оценки их характеристик, которые в целом дают представление о синоптической изменчивости в ААБ:

- продолжительность жизни вихрей 28—918 дней;
- расстояние, которое проходят вихри, 148—4780 км;
- средняя скорость перемещения 3,5—10,8 см/с;
- средняя окружная скорость 5,9—28,0 см/с;
- параметр нелинейности 0,8—4,5;
- амплитуда вихрей 1,8—15,7 см;
- радиус 50—81 км;
- доминирующее направление перемещения вихрей западное.

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

## Список литературы

1. Баимачников И.Л., Белоненко Т.В., Куйбин П.А. Приложение теории колоннообразных Q-вихрей с винтовой структурой к описанию динамических характеристики Лофотенского вихря Норвежского моря // Вестник СПбГУ. 2017. Т. 62. Вып. 3. С. 221—336.
2. Белоненко Т.В., Сандалюк Н.В. Сравнение вклада линейных и нелинейных эффектов в изменчивость уровня океана по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018 (в печати).
3. Жмур В.В. Мезомасштабные вихри в океане. М.: ГЕОС, 2011. 290 с.
4. Иванов Ю.А., Корт В.Г., Монин А.С. О мезомасштабных неоднородностях океана // Докл. АН СССР. 1986. Т. 286. № 3. С. 706—709.
5. Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С. Синоптические вихри в океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1987.
6. Незлин М.В. Солитоны Россби // Успехи физических наук. 1986. Т. 150. Вып. 1. С. 1—58.
7. Монин А.С., Жихарев Г.М. Океанские вихри // Успехи физических наук. 1990. Т. 160. Вып. 5. С. 1—47.
8. Петкилёв П.С. Влияние рельефа дна на пространственное распределение и динамику мезомасштабных вихрей в проливе Дрейка и море Скоттия // Ученые записки РГТМУ. 2016. № 42. С. 81—93.
9. Фёдоров К.Н., Гинзбург А.И. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 303 с.
10. Chaigneau, A., Gizolme, A., & Grados, C. Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns // Progr. Oceanogr. 2008. V. 79 (2). P. 106—119.
11. Chelton D.B., DeSzoeke R.A., Schlax M.G. Geographical variability of the first baroclinic Rossby radius of deformation // J. Phys. Oceanogr. 1998. V. 28. No. 3. P. 433—460.
12. Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies // Prog. Oceanogr. 2011. V. 91. P. 167—216.
13. De-Leon, Y. and Paldor, N. Trapped planetary (Rossby) waves observed in the Indian Ocean by satellite borne altimeters // Ocean Sci. 2017. V. 13. P. 483—494.
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. Geoph. Res. 2007. V. 112. Is. C5. C05043.10.1029/2006JC003952.
15. Fu L.L., Le Traon P.-Y. Satellite altimetry and ocean dynamics // Comptes Rendus Geosciences. 2006. V. 338. Is. 14—15. P. 1063—1076.
16. Hughes C.W. The Antarctic Circumpolar Current as a Waveguide for Rossby Waves // J. Phys. Oceanogr. 1996. V. 26. P. 1375—1387.
17. 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.
18. 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. McWilliams J.C. Maps from mid-ocean dynamics experiment. Part 1: Geostrophic stream-function // J. Phys. Oceanogr. 1976. V. 6. Is. 6. P. 810—827.
20. McWilliams J.C. Maps from mid-ocean dynamics experiment. Part 2: Potential vorticity and its conservation // J. Phys. Oceanogr. 1976. V. 6. Is. 6. P. 828—846.
21. McWilliams J.C. The vortices of 2-dimensional turbulence // J. Fluid Mechanics. 1990. V. 219. P. 361—385. 10.1017/S0022112090002981.
22. McWilliams J.C. The vortices of geostrophic turbulence // J. Fluid Mechanics. 1990. V. 219. P. 387—404. 10.1017/S0022112090002993.
23. Okubo A. Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences // Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. Elsevier. 1970. V. 17. No. 3. P. 445—454.
24. 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. V. 12. P. 1067—1090, doi: 10.5194/os-12-1067-2016.



25. *Sadarjoen I.A., Post F.H.* Detection, quantification, and tracking of vortices using streamline geometry // *Computers & Graphics*. 2000. V. 24 (Iss. 3). P. 333—341.
26. *Weijer W.* An almost- free barotropic mode in the Australian- Antarctic Basin // *Geoph. Res. Lett.* 2010. V. 37. L10602. doi:10.1029/2010GL042657.
27. *Weijer W., Gille S.T., Vivier F.* Modal Decay in the Australia-Antarctic Basin // *J. Phys. Oceanogr.* 2009. V. 39. P. 2893—2909.
28. *Weiss J.* The dynamics of enstrophy transfer in two-dimensional hydrodynamics // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1991. V. 48. No. 2. P. 273—294.
29. *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 Transactions Visualization and Computer Graphics*. 2011. V. 17. P. 2088—2095.