

П.С. Петкилёв

ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА ДНА НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ДИНАМИКУ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ В ПРОЛИВЕ ДРЕЙКА И МОРЕ СКОТИЯ

P.S. Petkilev

THE INFLUENCE OF SEAFLOOR TOPOGRAPHY ON THE SPATIAL DISTRIBUTION AND DYNAMICS OF MESOSCALE EDDIES AND TOPOGRAPHIC STEERING IN THE DRAKE PASSAGE AND THE SCOTIA SEA

На основе спутниковых альтиметрических измерений высоты уровенной поверхности океана исследованы параметры и пространственное распределение мезомасштабных вихрей в районе пролива Дрейка и моря Скотия в связи с рельефом дна и положением фронтальных зон в верхнем слое океана. Установлено, что крупные формы подводного рельефа являются блокирующими и направляющими факторами в динамике вихрей. Максимальные концентрации вихрей приурочены к планетарным и локальным фронтам в исследуемом районе. Закономерностей влияния этих факторов на параметры вихрей (радиус, скорость вращения) не выявлено.

Ключевые слова: пролив Дрейка, море Скотия, мезомасштабные вихри, рельеф дна, фронтальные зоны, пространственный ГИС анализ.

Using the satellite altimetry data, the spatial distribution and the parameters of mesoscale eddies in the Scotia Sea and Drake Passage were analyzed in connection with the seafloor topography and the main fronts positions. It was shown that seafloor topography plays blocking and direct-conductive roles in the mesoscale eddy dynamics. Maximum concentrations of eddies are related to the planetary and local fronts of the study area. The influence of these factors on the eddies parameters (radius, the speed of rotation) is not revealed.

Key words: Drake Passage, Scotia Sea, mesoscale eddies, seafloor topography, oceanic fronts, GIS spatial analysis.

Введение

Мезомасштабные (синоптические) вихри представляют собой круговороты вод с горизонтальными размерами порядка ста километров. На сегодняшний день установлено, что мезомасштабные вихри являются важным фактором горизонтального и вертикального водообмена, влияют на распределение океанологических параметров, а также оказывают значительное влияние на биопродуктивность [10].

Начиная с 1992 г. выполняются высокоточные спутниковые измерения высоты уровенной поверхности океана, что позволяет получать данные о положении, параметрах и динамике мезомасштабных вихрей. Использование автоматических алгоритмов трекинга (обнаружения и отслеживания), которые основаны на выделении в

поле альтиметрических данных вихрей и последующем определении их параметров и траектории движения существенно расширило современные представления о распределении и динамике мезомасштабных вихрей. Обзор алгоритмов трекинга представлен в работе [14]. Однако несмотря на все успехи в изучении мезомасштабных вихрей, вопрос о факторах, определяющих их пространственно-временное распределение и динамику, остался открытым.

Антарктическое циркумполярное течение (АЦТ) играет существенную роль в глобальной циркуляции Мирового океана, а также является одним из районов наибольших концентраций мезомасштабных вихрей [10]. Известно, что топография дна в значительной степени влияет на динамику АЦТ, определяя пространственное расположение его фронтов и струй на основе механизма топографического управления [11, 12, 13, 15, 17, 18, 23], описание которого будет приведено далее. Многие исследователи [9, 11, 12, 21] отмечают пространственную неоднородность процессов, протекающих в АЦТ, называя в качестве причины различия в характере топографии дна и особенностей вихревых процессов, протекающих в различных районах АЦТ. В частности, в работе [21] в качестве важной исследовательской задачи для окончательного понимания динамики АЦТ называется выявление механизма взаимодействия мезомасштабных вихрей и топографии дна.

В связи с этим, степень актуальности изучения пространственного распределения мезомасштабных вихрей и влияния топографии дна на их динамику остается высокой. При этом в существующих работах уделяется недостаточно внимания путям распространения мезомасштабных вихрей, их траекториям, местам скопления. Акцентируется внимание на кинематические параметры вихрей (скорости, размеры, амплитуды). Также значительная часть исследований вихревых процессов в Южном океане посвящена всей зоне АЦТ, без детального изучения региональных особенностей. Исключениями являются работы [9, 18], однако и в них пространственному распределению и траекториям вихрей уделено недостаточно внимания.

Помимо обозначенных выше теоретических вопросов, актуальность изучения влияния рельефа дна на динамику мезомасштабных вихрей в море Скотия и смежных акваториях определяется широким спектром практических задач. Например, масштабные вихри способны удерживать в себе и переносить промысловые скопления антарктического криля [22], а также влиять на объем богатых биогенами промежуточных вод, проникающих из Антарктики в Субантарктику [1, 2].

Цель настоящей работы заключается в выявлении и анализе пространственного распределения мезомасштабных вихрей в проливе Дрейка и море Скотия.

В работе решались следующие задачи:

- выявление районов наибольшей и наименьшей концентрации вихрей и сопоставление результатов с рельефом дна, положением фронтов изучаемого района;
- поиск взаимосвязи параметров вихрей и глубины океана под ними, а также сопоставление полученных результатов с результатами пространственного анализа.

Материалы и методы

Исходным материалом для работы стали данные о пространственно-временной изменчивости мезомасштабных вихрей и их параметров, которые представлены в базе

данных за период 14.10.1992 — 04.04.2013, созданной под руководством Д. Челтона [8]. Этот массив, созданный на основе альтиметрических спутниковых измерений высоты уровенной поверхности океана, содержит данные по следующим параметрам вихрей: дата наблюдения, координаты центра, тип вихря (циклонический или антициклонический), амплитуда (см), радиус (км), скорость вращения (см/с) [8]. Дискретность данных — недельная. Данный массив создан в рамках программы по глобальному изучению мезомасштабных вихрей и находится в свободном доступе вместе с подробным описанием (<http://cioss.coas.oregonstate.edu/eddies/>) [8].

В рамках работы из этого массива были извлечены данные, ограниченные с севера 41° ю.ш. и 63° ю.ш. с юга, 70° з.д и 20° з.д с запада и востока соответственно, за период с января 1993 г. по декабрь 2012 г. Включение в район исследования акватории за пределами моря Скотия необходимо для получения более полных представлений о влиянии рельефа дна на мезомасштабные вихри. Местоположение изучаемого района и его батиметрия представлены на рис. 1.

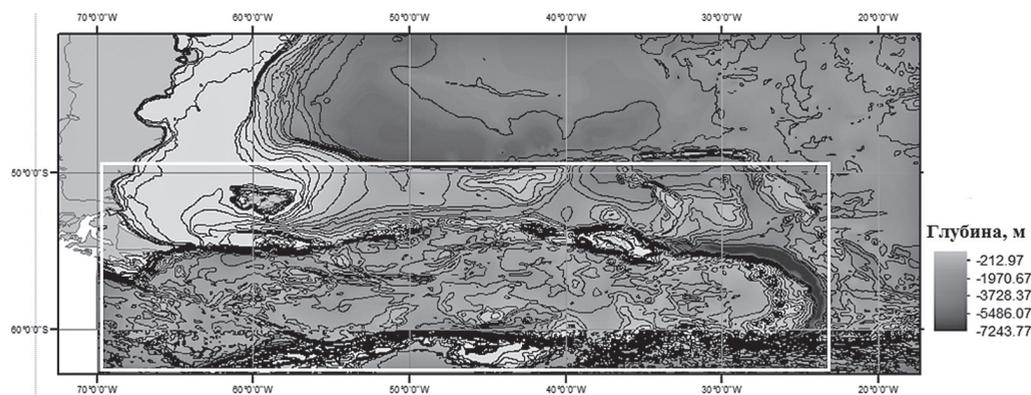


Рис. 1. Положение и батиметрия изучаемого района.

Подрайон анализа взаимосвязи параметров вихрей и глубины океана обозначен белым прямоугольником

В дальнейшем на основе этих данных был рассчитан меридиональный сдвиг (градусы) каждого мезомасштабного вихря. Данный параметр отражает полное смещение (по меридиану) вихря в момент его последней фиксации относительно первой в градусах широты. Положительные значения параметра означают смещение к северу, отрицательные — к югу. Таким образом, в результате расчета появился дополнительный анализируемый параметр.

В работе использовались также данные батиметрии проекта GEBSCO. Данные имеют глобальное покрытие на регулярной сетке с интервалами в одну угловую минуту ($\approx 1,86$ км). Пространственные границы извлекаемых данных идентичны границам для предыдущего массива. Эти данные находятся в свободном доступе (<http://www.gebco.net>).

Положение основных фронтов АЦТ (САФ — Субантарктический фронт, ПФ — Южный Полярный фронт, ЮФАЦТ — Южный фронт АЦТ, ЮгАЦТ — Фронт южной

границы АЦТ) было взято согласно работе [16]. Сезонные и межгодовые колебания положения фронтов, подобные описанным в работе [5], не учитывались.

В ходе работы данные (batimетрия и вихри) импортировались в среду ГИС (QGIS). По данным о местоположении мезомасштабных вихрей из массива Челтона было рассчитано количество вихрей на единицу площади — пространственная плотность концентрации вихрей. При этом использовался инструмент Теплокарта (Heatmap), который вычисляет плотность точечных объектов вокруг каждой ячейки выходного растра. Вокруг центра каждой ячейки растра определяется окрестность, после чего подсчитывается количество точек, попадающих в окрестность. В данной работе в качестве меры окрестности был установлен круг с радиусом $0,733^\circ$ (параметр по умолчанию для используемой системы координат). Таким образом, единицей измерения плотности концентрации мезомасштабных вихрей стало количество вихрей внутри данной меры окрестности. Подробный обзор используемого подхода приведен в документации к ГИС среде QGIS (<http://docs.qgis.org>).

Результаты расчета пространственной плотности были классифицированы на 10 классов через равные интервалы. Критерием выбора количества классов стало удобство визуального восприятия на карте. Затем карта пространственной плотности анализировалась совместно с рельефом дна изучаемого района путем наложения друг на друга. Полученная на этом этапе карта стала основой для пространственного анализа распределения мезомасштабных вихрей.

Помимо пространственного анализа в работе были использованы статистические методы для анализа взаимосвязей между параметрами вихрей и рельефом океана (фактически — с глубиной океана под ними в момент времени). Для этого к данным массива Челтона в среде ГИС присоединялись данные батиметрии при помощи инструмента объединения слоев. Теоретическая основа применяемого подхода изложена в классических работах [4, 6, 19, 20].

Данная процедура была выполнена для подрайона в пространственных границах 70–24W, 50–63S (см. рис. 1). Подрайон был выделен для проведения этого анализа с целью предотвращения ошибок, связанных с проникновением вихрей из внешних областей Южной Атлантики. Вероятность возникновения таких ошибок представляется довольно высокой вследствие возможности проникновения вихрей из зоны Бразильского течения через северную границу исходного района. Подрайон охватывает море Скотия и зону АЦТ полностью. Большинство вихрей возникло в этом подрайоне или к западу от него, так как они распространяются в восточном направлении с потоком АЦТ. В результате анализ топографического управления был выполнен только для этого подрайона.

Таким образом, к каждому вихрю (по его координатам, в каждый момент времени) присоединялось значение глубины океана, взятое из близлежащей точки с данными батиметрии массива GEBCO. Поскольку данные массива GEBCO имеют очень плотную сетку, среднее расстояние от вихря до точки с данными составило $0,0062^\circ$. В результате в массиве Челтона появился еще один новый (помимо меридионального сдвига) дополнительный параметр — глубина океана под вихрем. Статистический анализ полученного массива был выполнен при помощи программы PAST (<http://folk.uio.no/ohammer/past/>). Временные ряды параметров вихрей и глубины под ними

в момент времени были попарно проанализированы на предмет взаимосвязи между глубиной и каждым из параметров вихрей.

Для статистического анализа были отобраны 184 вихрей с временем жизни более 28 недель. Были составлены временные ряды их параметров: скорости вращения, меридионального сдвига, линейного размера, глубины океана под вихрем. Затем для каждого вихря данные глубины океана под ним попарно коррелировались с его скоростью вращения, меридиональным сдвигом и линейным размером. При этом использовалась непараметрический коэффициент корреляции Кендалла, так как средняя длина исследуемых рядов была приблизительно равна 32 значениям. Полученные на этом этапе результаты в дальнейшем были сопоставлены с результатами пространственного анализа. Для полученных коэффициентов корреляции Кендалла были рассчитаны описательные статистики для поиска самых высоких коэффициентов корреляции, которые затем были проанализированы отдельно.

Результаты

Результаты расчета плотности концентрации вихрей представлены в виде карт на рис. 2 и 3. На рис. 2 отображено распределение изучаемого параметра для всего изучаемого района. Рис. 3 отображает небольшой участок в западной части изучаемого района, удобный для детального рассмотрения и демонстрирующий наиболее характерные особенности пространственного распределения изучаемого параметра.

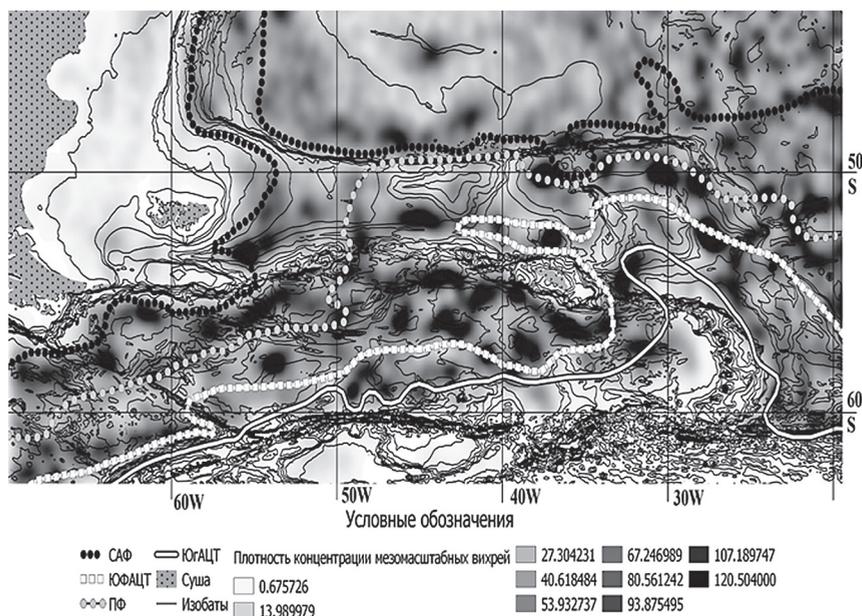


Рис. 2. Плотность концентрации мезомасштабных вихрей на фоне батиметрии и основных фронтов Южного океана. ОМКВ обозначены черным цветом

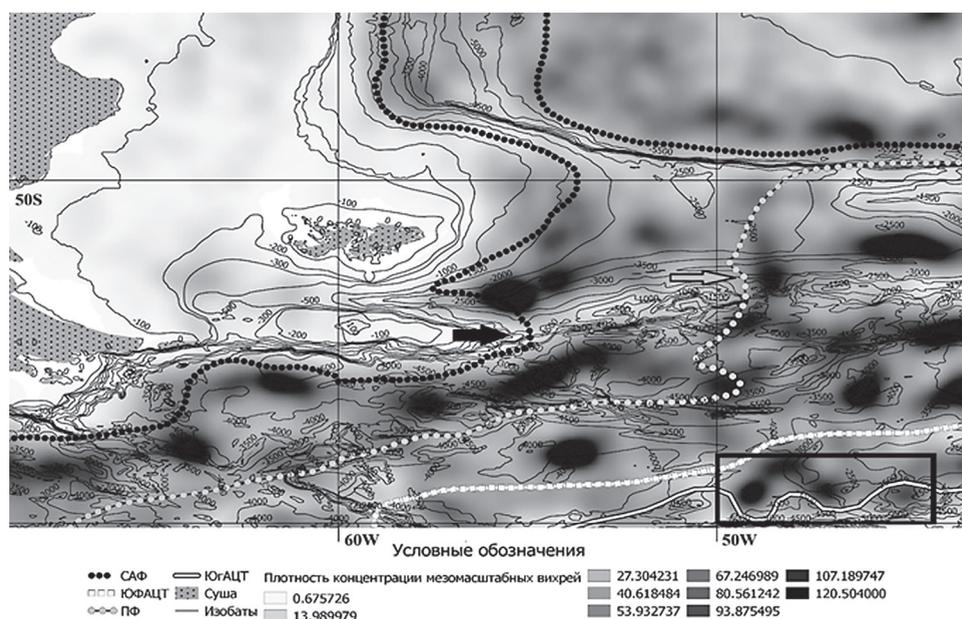


Рис. 3. Плотность концентрации мезомасштабных вихрей на фоне батиметрии и основных фронтов Южного океана. ОМКВ обозначены черным цветом

Полученные карты показывают сложную картину пространственного распределения плотности концентрации вихрей. Четко выделяются области минимальных концентраций (0–40 вихрей на окрестность с радиусом 0,733°; на картах — белый и светло-бежевый цвета), средних (40–80 вихрей; светло-коричневый цвет) и максимальных (80–120; пятна и полосы темно-коричневого цвета) концентраций вихрей.

Большая часть района исследования занята областями средних концентраций вихрей, которые целиком занимают зону АЦТ, а также открытые районы к северу АЦТ (северной границей АЦТ является Субантарктический фронт — САФ). Области минимальных концентраций вихрей приурочены к обширным мелководьям Патагонского шельфа, акватории к югу от южной границы АЦТ (ЮАЦТ), а также районам крупных подводных хребтов и поднятий. Области максимальных концентраций вихрей (далее — ОМКВ) вкраплены в области средних концентраций вихрей. ОМКВ образуют вытянутые пятна и полосы и приурочены (в подавляющем большинстве) к фронтам АЦТ, располагаясь вблизи от них. Примечательно нахождение ОМКВ в некоторых излучинах фронтов АЦТ.

Обращает на себя внимание различие размеров ОМКВ внутри и все зоны АЦТ. ОМКВ в зоне АЦТ больше по размеру, четко выражены и образуют вокруг себя значительно меньшую по площади «переходную зону» (определяемую на карте как зону уменьшения интенсивности цвета вокруг ядра ОМКВ). Анализ геометрических форм ОМКВ (направление вытягивания) показал, что подавляющее большинство ОМКВ, расположенных в зоне АЦТ, вытянуты в направлении потока (с запада на восток).

ОМКВ, расположенные к северу от зоны АЦТ, не имеют такого постоянства геометрических форм и могут быть вытянуты даже в направлении север–юг. Примечательно, что ОМКВ могут наблюдаться по разные стороны фронтов, что заметно, например, на рис. 3 (черный прямоугольник).

Сопоставление плотности концентрации вихрей с батиметрией изучаемого района также показало, что большая часть ОМКВ и областей средних концентраций вихрей приурочены к акваториям, с глубинами 3 500–4 500 м. Данный вывод подтверждают описательные статистики по глубине под вихрями приведены в табл. 1. Значения среднего и медианы данного параметра отличаются всего на 14 м и составляют приблизительно 3 800 м, а размах между верхним и нижним квартилем составляет всего 825 м. Также были обнаружены ОМКВ, локализующиеся над подводными горами. В качестве примера можно привести ОМКВ, расположенную к северу от острова Южная Георгия и находящуюся в излучине ЮФАЦТ. Однако большинство ОМКВ расположено над ложем океана.

Таблица 1

Описательные статистики анализируемых параметров вихрей

	Число наблюдений	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Нижн. квартиль	Верх. квартиль	Размах	Ст. отклонение
Радиус вихря, км	6 112	74,19	70,27	17,05	167,88	56,35	89,25	150,8	32,895
Скорость вращения, см/с	6 112	21,14	19,56	3,52	64,56	13,44	26,9	61,04	13,46
Меридиональный сдвиг, градусы долготы	6 112	0,55	0,31	-4,49	7,55	-0,22	1,24	12,04	1,46
Глубина, м	6 112	-3814	-3796	-8238	-207	-4251	-3426	8031	825

Также имеются четкие признаки направляющей и блокирующей роли подводного рельефа в пространственном положении ОМКВ и, как следствие, в траекториях движения мезомасштабных вихрей (в дальнейшем при анализе влияния топографии дна, говоря о положении ОМКВ, будут подразумеваться также траектории вихрей).

Наиболее явно проявляется блокирующая роль рельефа. В частности, очевидна роль Северного хребта Скотия в блокировании распространения ОМКВ из моря Скотия в открытую часть Атлантики (рис. 3, 4). Северный хребет Скотия является северной границей моря Скотия и протягивается от Огненной Земли до Южной Георгии. Блокирующую роль играет также цепь Южно-Сандвичевых островов, в районе которых наблюдаются очень низкие значения плотности концентрации вихрей. Блокирующую роль названных форм рельефа подтверждает наличие по обе стороны Северного хребта Скотия двух отдельных группы ОМКВ. При этом, несмотря на всю огромную протяженность хребта, ОМКВ проникают через него только в двух местах — в районе 48–49° з.д. (место выхода САФ из моря Скотия) и к востоку от Южной Георгии (вплоть до начала Южно-Сандвичевой гряды, место выхода ЮФАЦТ и ЮГАЦТ из моря Скотия). Оба эти прохода четко заметны на рис. 2, а первый из них детально изображен также на рис. 3. Глубина океана в этих местах проникновения ОМКВ составляет около

3000–4000 м и 5000 м соответственно. Очевидно, что особую роль в возможности преодоления хребта играет его высота. На рис. 3 черной стрелкой обозначена часть хребта, блокирующая ОМКВ (они формируются по обе стороны от него, глубина над хребтом около 1000 м), а серой стрелкой обозначен проход через хребет, на месте которого сформировалась единая ОМКВ (300–4000 м). Направляющая роль рельефа тесно связана с блокирующей, так как ОМКВ ориентированы вдоль непреодолимых высоких хребтов и преодолевают их только в местах со значительно большими глубинами. Смежный характер взаимного расположения ОМКВ показывает наличие своего рода «трасс» вихрей. Трасса формируется смежными ОМКВ, относительно непрерывно сменяющимися друг друга (рис. 3, 4). Наличие и четкая выраженность подобных трасс также указывают на важную роль рельефа дна и фронтов на динамику вихрей Южного океана.

Результаты анализа топографического управления в изучаемом районе показали отсутствие корреляций между параметрами вихря и глубиной под ним. Значения корреляций составляют $\pm 0,1-0,3$. Табл. 2 демонстрирует значения описательных статистик для рядов корреляций между параметрами вихрей и глубиной под ними. Примечательно, что значения всех описательных статистик практически одинаковы для всех пар коррелируемых параметров.

Таблица 2

Описательные статистики для коэффициентов корреляции между параметрами вихрей и глубиной

	Число наблюдений	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Ниж. квартиль	Верх. квартиль	Размах	Ст. отклонение
Скорость вращения, см/с	184	-0,023	0,005	-0,8	0,817	-0,196	0,135	1,617	0,274
Радиус вихря, км	184	0,015	0,011	-0,817	0,667	-0,110	0,150	1,483	0,213
Меридиональный сдвиг, градусы долготы	184	0,004	0,004	-0,816	0,6	-0,091	0,109	1,417	0,173

Тем не менее, имеются признаки хороших корреляций между глубиной и параметрами вихрей. Табл. 3 содержит информацию о вихрях с корреляциями выше чем $\pm 0,5$ для каждой коррелируемой пары параметров. В частности, для пары «скорость вращения – глубина» только 14 случаев с высокими коэффициентами было обнаружено. При этом данная пара имеет самое большое количество высоких коэффициентов корреляции. Табл. 3 также показывает, что все корреляции выше $\pm 0,65$ относятся к очень коротким временным рядам, состоящим всего из нескольких наблюдений. В результате эти корреляции не могут быть приняты во внимание и должны быть исключены из дальнейшего анализа. Наличие двух вихрей (обозначенных курсивным и жирным шрифтами в табл. 3) с длинными временными рядами (24 и 27 значений соответственно) и хорошими корреляциями внутри сразу двух пар показывает возможность осуществления чистого топографического управления. Оба этих вихря имеют близкие значения корреляций и их знаки. Однако сравнение этих вихрей показывает наличие противоположных знаков внутри общих корреляционных пар. Хотя закон

сохранения потенциального вихря показывает определенное соотношение между глубиной и другими параметрами, в анализируемых результатах нет четкого преобладания того или иного знака. В каждой паре есть примерно равное количество положительных и отрицательных корреляций.

Таблица 3

Вихри с корреляциями больше $\pm 0,5$. Повторяющиеся вихри выделены особым шрифтом

Коррелируемая пара	Номер трека из массива Челтона	Коэффициент корреляции тау Кендалла	Время жизни вихря	Длина коррелируемых рядов
Скорость вращения – глубина	<u>176712</u>	<u>0,8165</u>	<u>45</u>	<u>3</u>
	159822	0,6444	30	10
	184679	0,6060	29	12
	117745	0,5726	39	27
	61765	0,5431	30	30
	83691	-0,5203	29	29
	158849	-0,5228	34	34
	58208	-0,5478	33	33
	207532	-0,5540	31	30
	186388	-0,5636	40	11
	<i>48659</i>	<i>-0,6279</i>	<i>34</i>	<i>24</i>
	18690	-0,6370	29	29
	<u>140087</u>	<u>-0,6666</u>	<u>29</u>	<u>4</u>
70629	-0,8	32	5	
Меридиональный сдвиг – глубина	66460	0,6	54	5
	<u>176712</u>	<u>-0,8165</u>	<u>45</u>	<u>3</u>
Радиус – глубина	<u>140087</u>	<u>0,6666</u>	<u>29</u>	<u>4</u>
	32359	0,6428	30	8
	117745	0,5555	39	27
	<i>48659</i>	<i>-0,5018</i>	<i>34</i>	<i>24</i>
	121101	-0,5871	34	11
	97873	-0,6666	29	4
	<u>176712</u>	<u>-0,8165</u>	<u>45</u>	<u>3</u>

Обсуждение результатов

В работе проанализировано пространственное распределение плотности концентрации вихрей. Полученные результаты показали четкую дифференциацию данного параметра в зависимости от глубины океана, поскольку области минимальных концентраций вихрей господствуют на мелководьях и над подводными хребтами, а области средних концентраций вихрей и ОМКВ занимают глубоководные пространства (с глубинами порядка 4000 м). При этом играет роль не только глубина океана, но в

значительной мере характер топографии дна. Установлено что крупные хребты, поднятия и островные гряды играют блокирующую и направляющую роли в распределении ОМКВ и поведении вихрей. Также чем более резко происходит изменение глубины, тем более резко меняется пространственное распределение плотности концентрации вихрей, что особенно заметно на примере Патагонского шельфа (рис. 3).

В то же время очевидно, что глубина океана не является единственным фактором, определяющим распределение плотности концентрации вихрей. Значительная роль в этом принадлежит АЦТ, поскольку к югу от ЮгАЦТ значения плотности концентрации вихрей резко падают до минимумов, а также крупным планетарным фронтам, что подтверждается множеством ОМКВ на северной периферии САФ и в зоне между САФ и СТФ (рис. 3). Другими словами, высокие значения плотности концентрации вихрей приурочены к районам интенсивной динамической активности, а максимальные значения — к планетарным фронтам в зоне АЦТ.

Таким образом, распределение плотности концентрации вихрей определяется интенсивностью океанологических процессов (АЦТ и фронты), глубиной океана и топографией дна.

Приуроченность областей высоких значений плотности концентрации вихрей к районам крупных струйных течений (АЦТ, Куроисио, Гольфстрим) и планетарным фронтам Мирового океана была описана во многих работах [7, 8, 9, 10], что подтверждает полученные в данном исследовании результаты. Четкая согласованность взаимного расположения ОМКВ, фронтов и топографии дна также подтверждает возможность применения используемого подхода в дальнейших исследованиях.

Использование других исходных данных и анализируемых параметров в работах других авторов серьезно затрудняет сравнение результатов по роли топографии дна и глубины в динамике вихрей. Отчетливо выраженная приуроченность вихрей к глубоководным районам может быть объяснена законом сохранения потенциального вихря (рис. 2), согласно которому при увеличении глубины растет скорость вращения вихря. При этом, согласно [3, 19], высокая скорость вращения является одним из главных факторов выживаемости вихря в течении. Таким образом, приуроченность вихрей к глубоководным районам можно объяснить стремлением вихрей сохранить высокую скорость вращения.

Выявление двух мест проникновения вихрей из моря Скотия в открытую Атлантику позволяет сделать детальный анализ вихревого тепло- и массообмена, определить масштабы этих процессов. Небольшие пространственные масштабы этих проходов дают возможность всестороннего изучения протекающих в них процессов эффективно и с затратами ограниченных ресурсов. Формирование «трасс вихрей» из смежных ОМКВ дает также возможность проанализировать вихревой тепло- и массообмена в различных местах изучаемого района и выявить пространственную динамику этих процессов как в море Скотия, так и в открытой части Атлантики.

Попытка выявить выполнение закона сохранения потенциального вихря и топографического управления на конкретных мезомасштабных вихрях путем статистического анализа не дала однозначно интерпретируемых результатов. Несмотря на в целом низкие значения коэффициентов корреляции и разнонаправленные связи параметров для вихрей с высокими коэффициентами, полученные результаты не могут служить

доказательством невыполнения топографического управления, вследствие особенностей исходных данных. Большая временная дискретность (одна неделя) данных о мезомасштабных вихрях может вносить большую погрешность в результаты анализа. Наличие различных внешних факторов, влияющих на параметры вихрей (например, ветер) также должно быть учтено при интерпретации полученных результатов. Так, согласно [20], неизвестно, насколько точно выполняется в реальном океане закон сохранения потенциального вихря и какова роль внешних факторов. При этом определенную погрешность должна вносить многоступенчатость получения данных о мезомасштабных вихрях из исходных данных альтиметрии. В результате верифицировать данный подход и возможность его применения может использование его для анализа данных о мезомасштабных вихрях с меньшей временной дискретностью (например, суточной).

Таким образом, несмотря на установленную в работе важность топографии дна на пространственное распределение плотности концентрации вихрей выявить характер топографического управления и его выполнения для индивидуальных мезомасштабных вихрей не удалось. Причина этого кроется либо в погрешностях используемых методов, либо в особенностях используемых данных.

Заключение

В ходе работы были получены следующие результаты:

- Установлено неоднородное пространственное распределение плотности концентраций вихря в пределах изучаемого района. Минимальные концентрации наблюдаются над шельфовыми акваториями и в области к югу от ЮгАЦТ, а ОМКВ вкраплены в области средних концентраций в виде смежных пятен и полос. ОМКВ приурочены акваториям над ложем океана или располагаются над подводными горами.
- Геометрические формы ОМКВ соответствуют направлению среднего потока, а их размеры зависят от интенсивности динамических процессов в месте их нахождения.
- Крупные формы подводного рельефа играют отклоняющую и блокирующую роли в пространственном положении ОМКВ и, как следствие, в траекториях движения мезомасштабных вихрей. В частности, Северный хребет Скотия блокирует ОМКВ так, что ОМКВ проникают в открытую Атлантику только через два глубоководных прохода.
- Положение ОМКВ хорошо согласуется с положением основных фронтов изучаемого района.
- Взаимосвязи между параметрами вихрей и глубиной под ними не обнаружено.

Вместе с тем, данная работа поставила целый ряд вопросов, в том числе:

- Какой размер объектов топографии дна можно считать пороговым в вопросе влияния на траектории вихрей?
- Какова роль топографического управления в сравнении с другими факторами, влияющими на динамику вихрей и их параметры?
- Применим ли используемый в работе метод исследования топографического управления отдельных вихрей для данных другой временной дискретности?

Таким образом, на основе данных о положении и характеристиках мезомасштабных вихрей и батиметрии изучаемого района были установлены особенности пространственного распределения мезомасштабных вихрей, закономерности их движения. Результаты анализа корреляций между параметрами вихрей и глубиной под ними показали неоднозначные результаты и нуждаются в верификации.

Благодарности

Автор благодарит сотрудников кафедры географии океана БФУ имени И. Канта и своего научного руководителя профессора П.П. Чернышкова за полезные замечания.

Литература

1. *Бородин Е.В.* Вертикальная структура промежуточных водных масс Антарктического происхождения в южной части Тихого океана // Учёные записки РГГМУ, 2014, № 37, с. 143–154.
2. *Бородин Е.В.* Структура и динамика промежуточных водных масс антарктического происхождения в южной части Тихого океана: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — Калининград, 2015. — 120 с.
3. *Жмур В.В.* Мезомасштабные вихри океана. — М.: ГЕОС, 2011. — 190 с.
4. *Зырянов В.Н.* Топографические вихри в динамике морских течений. — М.: ИВП РАН, 1995. — 238 с.
5. *Гордеева С.М., Малинин В.Н.* Крупномасштабная изменчивость южного субтропического фронта в юго-восточной части Тихого океана // Учёные записки РГГМУ, 2006, № 2, с. 130–139.
6. *Каменкович В.М.* Об интегрировании уравнений теории морских течений в неоднородных областях // Докл. АН СССР, 1961, т. 138, № 5, с. 1076–1079.
7. *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, iss. 15. — doi:10.1029/2007GL030812.
8. *Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies // Progress in Oceanography, 2011, vol. 91, iss. 2, pp. 167–216.
9. *Fu L.-L.* Pattern and velocity of propagation of the global ocean eddy variability // Journal of Geophysical Research: Oceans, 2009, vol. 114, iss. C11. — doi:10.1029/2009JC005349.
10. *Fu L.-L., Chelton D.B., Le Traon P.-Y., Morrow R.* Eddy dynamics from satellite altimetry // Oceanography, 2010, vol. 23, no. 4, pp. 14–25. — doi:10.5670/oceanog.2010.02.
11. *Gille S.T., Metzger E.J., Tokmakian R.* Sea floor topography and ocean circulation // Oceanography, 2004, vol. 17, no. 1, pp. 47–54.
12. *Klinck J., Nowlin Jr W.D.* Antarctic Circumpolar Current // Encyclopedia of Ocean Sciences, 2001, pp. 151–159.
13. *Marshall D.* Topographic Steering of the Antarctic Circumpolar Current // Journal of Physical Oceanography, 1995, vol. 25(7), pp. 1636–1650.
14. *Nencioli F., Dong C., Dickey T.D., Washburn L., McWilliams J.C.* A vector geometry based eddy detection algorithm and its application to a high-resolution numerical model product and high-frequency radar surface velocities in the Southern California Bight // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, vol. 27, no. 3, pp. 564–579.
15. *Olbers D., Borowski D., Volker C., Wolf J.-O.* The dynamical balance, transport and circulation of the Antarctic Circumpolar Current // Antarctic Science, 2004, vol. 16, iss. 4, pp. 439–470.
16. *Orsi A., Whitworth T., Nowlin Jr W.D.* On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current // Deep Sea Research Part I: Oceanographic, 1995, vol. 42, iss. 5, pp. 641–673.
17. *Petersen M.R., Williams S.J., Maltrud M.E., Hecht M.W., Hamann B.* A three-dimensional eddy census of a high-resolution global ocean simulation // Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, vol. 118, iss. 4, pp. 1759–1774. — doi:10.1002/jgrc.20155.
18. *Sallée J.B., Speer K., Rintoul S.R.* Mean-flow and topography control on surface eddy-mixing in the Southern Ocean // Journal of Marine Research, 2011, vol. 69, no. 4–6, pp. 753–777.
19. *Sokolovskiy M.A., Verron J.* Dynamics of vortex structures in a stratified rotating fluid // Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, 2014, vol. 47. — 382 p.

20. *Stewart R.* Introduction to Physical Oceanography. — Department of Oceanography, Texas A & M University, 2008. — 390 p.
21. *Thompson A.* The atmospheric ocean: eddies and jets in the Antarctic Circumpolar Current // Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2008, vol. 366, iss. 1885, pp. 4529–4541.
22. *Witek Z., Kalinowski J., Grelowski A.* Formation of Antarctic krill concentrations in relation to hydrodynamic processes and social behaviour. In: *Sahrhage D.*, editor. Antarctic Ocean and Resources Variability. — Berlin: Springer-Verlag, 1988, pp. 237–244.
23. *Witter D.L., Chelton D.B.* Eddy-mean flow interaction in zonal oceanic jet flow along zonal ridge topography // Journal of Physical Oceanography, 1998, vol. 28(10), pp. 2019–2039.