

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ БАРЕНЦЕВА, КАРСКОГО И БЕЛОГО МОРЕЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

О.А. Атаджанова¹, А.В. Зимин^{1,3}, А.А. Коник^{1,2}, Е.И. Свергун^{1,2}, Д.А. Романенков¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

FEATURES OF SURFACE MANIFESTATIONS OF SUBMESOSCALE EDDIES IN THE BARENTS, KARA AND WHITE SEAS USING SATELLITE DATA

A.A. Atadzhanova¹, A.V. Zimin^{1,3}, A.A. Konik^{1,2}, E.I. Svergun^{1,2}, D.A. Romanenkov¹

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

³Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

На основе разнородных наблюдений выявлены особенности пространственно-временной изменчивости характеристик субмезомасштабных вихрей на фоне процессов большего масштаба в Баренцевом, Карском и Белом морях.

Features of the spatial-temporal variability of the characteristics of submesoscale eddies on the background of larger-scale processes in the Barents, Kara and White seas are identified on basis of different type observations.

Субмезомасштабные вихри характеризуются малыми пространственным (порядка единиц километров) и временным (от нескольких часов до суток) масштабами. Данные структуры не принадлежат в полной мере к трехмерным явлениям, и в тоже время не относятся к гидростатически сбалансированным, для которых важны эффекты вращения Земли [1]. При этом субмезомасштабные вихревые структуры, как и вихри более крупных масштабов, играют важную роль в интенсификации перемешивания, горизонтальном и вертикальном переносе тепла и вещества. Поэтому их исследование важно для понимания механизмов перераспределения тепла и биогеохимических параметров на локальных акваториях.

Из-за недостаточной изученности вихреобразования в Арктике в субмезомасштабном интервале, влияние малых вихрей не учитывается в прикладных расчетах и прогнозах изменчивости характеристик вод акваторий, важных для решения прикладных задач, имеющих значительное оборонное и хозяйственное значение. Понимание вихревой активности на отдельных акваториях является значимым при прогнозировании распространения загрязнений различной природы как по горизонтали, так и по вертикали [2]. Кроме того, за счет значительных вертикальных скоростей вихри играют роль небольших локальных апвеллингов, которые могут поднимать питательные вещества из нижележащих слоев к поверхности [3]. Также существование вихревых структур создает дополнительные помехи при распространении звука, что важно при усовершенствовании методов подводной акустики [4].

Материалы и методы.

Для исследования особенностей поверхностных проявлений субмезомасштабных вихрей использовался массив РЛ-изображений с июня по октябрь 2007 и 2011 гг. для Баренцева (1203 шт. за 2007 г., 838 за 2011 г.) и Карского морей (900 шт. за 2007 г., 275 за 2011 г.), полученных с ENVISAT ASAR в С-диапазоне и режимах съемки WSM (ширина полосы обзора 400×400 км, пространственное разрешение 150×150 м) и IMP (100×100 км и 25×25 м соответственно) для безледного периода 2007 и 2011 годов. Среднее покрытие акватории РЛИ составило около 250 шт. для Баренцева моря и около 200 для Карского моря. Для Белого моря было проанализировано 221 радиолокационное изображение за май-сентябрь 2009-2012 гг. при среднем покрытии акватории 110 РЛИ. За 2009-2011 использовались РЛИ, полученные с радиолокатора ENVISAT ASAR, за 2012 год со спутников RADARSAT-1 с пространственным разрешением 25 м в режиме съемки SGF (PathImage) и RADARSAT-2 в режиме FineQuad-Pol с

пространственным разрешением 6 м. На РЛИ регистрировались координаты центра, тип вращения (циклонический/антициклонический) и диаметр.

Для исследования фронтальной динамики в Баренцевом и Карском морях использовались среднесуточные данные по ТПМ продукта OSTIA GHRSSST. Производилось осреднение суточных данных ТПМ по декадам и месяцам, рассчитывались поля градиентов с теми же периодами осреднения. По картам градиентов ТПМ выделялись фронтальные зоны (ФЗ) и положения основных фронтов в них. Смещение среднедекадных положений фронтов за месяц плюс средняя полуширина ФЗ вокруг принимается в качестве области изменчивости фронтальных зон, при этом ширина ФЗ оценивалась по трем меридиональным разрезам градиента ТПМ: 20°, 35° и 50° в.д. для Баренцева моря и 65°, 75° и 80° в.д. для Карского моря. Для Белого моря использовались среднедекадные и среднemesячные положения фронтов [6].

Для исследования роли фронтальной динамики в распределении субмезомасштабных вихрей производился анализ композитных карт, объединяющих области изменчивости ФЗ и положения вихрей за месяц. На основе карт считалось количество проявлений вихрей внутри областей изменчивости, а результаты сводились в обобщающую таблицу.

Для выявления связи между положениями вихрей над неровностями дна вне фронтальной изменчивости и приливной динамикой производился анализ вихревых структур за 2007 г. в отдельных районах со значительными неровностями дна в Баренцевом и Карском морях (юго-западнее Земли Франца-Иосифа и северо-восточнее острова Уединения).

В результате анализа РЛИ за теплый период 2007 и 2011 гг. в Баренцевом море было зарегистрировано 2934 субмезомасштабных вихревых структуры с диаметром от 0.2 км до 25 км. Пик вихревой активности как в целом за сезон, так и за каждый год отмечался в июле, среднемесячный диаметр в течение сезона варьировался от 2.3 до 4.2 км. На акватории Карского моря за тот же период было детектировано 1444 субмезомасштабных вихрей, их диаметр варьировался от 0.4 км до 14.4 км. Интенсивная вихревая активность отмечалась в июле (2011 г.) и августе (2007 г.), а среднемесячный диаметр в течение сезона менялся от 1.2 до почти 3 км. В Белом море анализ 221 РЛИ за период с мая по сентябрь 2009-2012 гг. позволил зарегистрировать 162 вихря с диаметром от 0.9 км до 13.2 км. Вихревая активность в течение сезона была максимальна в июле при изменчивости среднемесячного диаметра от 2.2 км до 5.1 км. Как минимум 75% зарегистрированных вихрей имели масштаб порядка бароклинного радиуса Россби.

Чаще всего в Баренцевом море проявления вихрей отмечались в районах северо-западнее ЗФИ, возле восточного берега острова Западный Шпицберген, в юго-западной части моря (в районе поступления атлантических вод), в центральной части пролива между ЗФИ и Новой Землей, в районе полуострова Канин (рис. 1а).

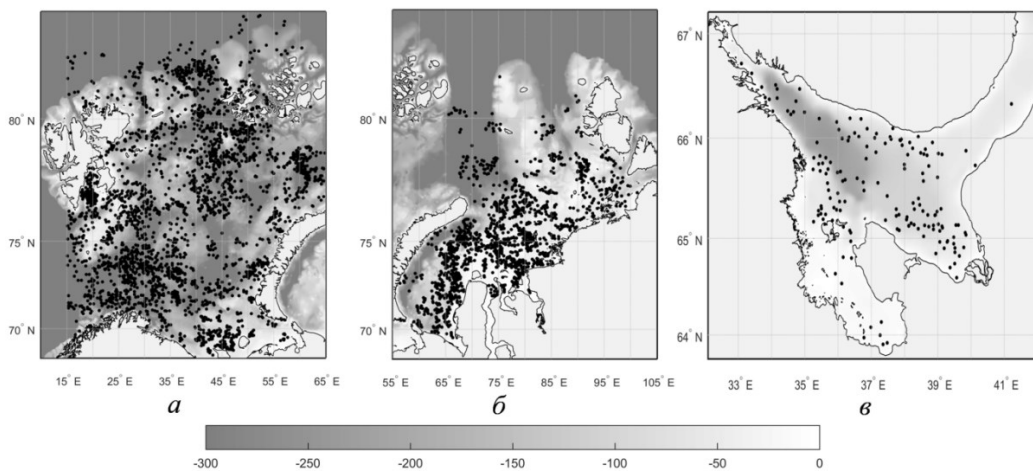


Рис. 1. Пространственное распределение положений центров вихревых структур за исследуемый период в Баренцевом (а), Карском (б) и Белом (в) морях за сезон, шкала глубин в м

В Карском море – между северной оконечностью Новой Земли и западным берегом полуострова Ямал, в центральной части шельфа Карского моря. Кроме этого вихри отмечались вблизи неровностей дна: южная оконечность желоба Святой Анны, юго-западнее Северной Земли (рис.1б). В Белом море наибольшая встречаемость отмечалась севернее Соловецких островов, вблизи Терского берега, на границе Бассейна и Двинского залива (рис.1в).

В большинстве приведенных районов возможными причинами генерации вихревых структур с размерами масштаба бароклинного радиуса Россби могут быть бароклинная неустойчивость (в районах фронтальных зон) и топографические эффекты (в районах неровностей дна), развивающиеся под влиянием приливов.

Исследование фронтальной динамики в Баренцевом, Карском и Белом морях показало следующие результаты. В Баренцевом море по данным за июнь-сентябрь 2007 и 2011 гг. проанализированы значительная внутрисезонная и впервые полученная внутримесячная изменчивость положений основных фронтов Прикромочной и Полярной фронтальных зон, а также выявлена средняя и максимальная ширина для каждой фронтальной зоны и максимальные среднедекадные градиенты внутри зон. Ширина Прикромочной фронтальной зоны в разные декады варьировалась от 56 до 111 км, а Полярной от 86 до 172 км. Максимальный среднедекадный градиент ТПМ Прикромочной и Полярной ФЗ по разрезам в оба года составлял $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Основной фронт Прикромочной ФЗ в течение теплого периода перемещался по всей северной части Баренцева моря, наиболее динамичен в июле, а самого северного положения достигал в августе в оба года. Основной фронт Полярной ФЗ был квазистационарен в западной части моря, с июня по август продвигался на восток к архипелагу Новая Земля, при этом наибольшая динамика фронта отмечалась в 2007 году.

Для Карского моря по данным за июль-сентябрь 2007 и 2011 гг. были исследованы значительная внутрисезонная и впервые выявленная внутримесячная изменчивость положений основных фронтов Прикромочной и Стоковой фронтальных зон. Ширина Прикромочной ФЗ в разные декады варьировалась от 69 до 110 км, а Стоковой от 72 до 127 км. Максимальный среднедекадный градиент для Прикромочной и Полярной ФЗ по разрезам в оба года достигал $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$. В оба года самое северное положение основного фронта Прикромочной ФЗ наблюдалось в августе в оба года, при этом наиболее динамичен он был в 2007 году. Основной фронт Стоковой ФЗ перемещался преимущественно в северном и западном направлениях к Новой Земле, в 2007 году в июле фронт приближался к Новой Земле и распадался на две части, при этом северная часть в сентябре не идентифицировалась. В 2011 году основной фронт Стоковой ФЗ полностью регистрировался только в июле, при этом он был ближе к Новой Земле, чем в 2007. Однако в августе и сентябре удалось зарегистрировать только северную часть, вблизи северной оконечности Новой Земли.

В Белом море по данным 2010 г., несмотря на несущественную динамику среднемесячных положений фронтов, среднедекадные положения фронтов показали значительное смещение в течение практически каждого исследуемого месяца.

Оценка количества проявлений вихревых структур внутри областей изменчивости среднедекадных фронтов за каждый месяц показала, что вихри внутри областей отмечались каждый месяц (таблица 1), когда были детектированы положения фронтов. Максимальное количество зарегистрированных поверхностных проявлений внутри областей изменчивости ФЗ отмечалось в июле во всех морях за каждый исследуемый год (в Белом море до 77% вихрей за месяц, в Баренцевом море до 49 %, в Карском море до 64 %), тогда же, когда отмечалась максимальная фронтальная динамика, которая способствует развитию процессов, связанных с бароклиной неустойчивостью.

Таблица 1. Количество вихрей внутри областей изменчивости фронтальных зон в процентах от количества зарегистрированных вихрей за каждый месяц

Месяц	Баренцево море		Карское море		Белое море
	2007 год	2011 год	2007 год	2011 год	2010 год
Июнь	24,0	22,6	-	-	62
Июль	38,1	49,3	27,2	64,2	77
Август	13,4	29,9	23,1	17,1	57
Сентябрь	9,9	9,6	12,7	28,8	13
Итого	23,2	30,0	22,7	39,3	57

Анализ поверхностных проявлений вихревых структур в отдельных районах неровностей дна в Баренцевом и Карском морях (юго-западнее Земли Франца-Иосифа и северо-восточнее острова Уединения) показал, что вихри там регистрируются, когда эти районы свободны ото льда и преимущественно в период сизигийного прилива (свыше 50 % вихрей), когда скорости приливных течений максимальны. Учитывая ранее установленную связь образования вихрей над неровностями дна с приливной динамикой в Белом море [6], следует, что образование субмезомасштабных вихрей над неровностями дна в этих морях связано с интенсивностью приливных течений.

На основе выявленных особенностей, характерных для трех морей, были сформулированы некоторые закономерности субмезомасштабной вихревой динамики для приливных арктических морей (Баренцева, Карского и Белого морей):

- субмезомасштабные вихри в теплый сезон постоянно присутствуют на акватории;
- вихри имеют диаметр преимущественно от 2 до 4 км (~45% вихрей в Баренцевом море, ~55% в Карском, ~40% в Белом) и циклонический тип вращения (от 75 % зарегистрированных вихрей), при этом средние оценки диаметра антициклонических вихрей больше (в среднем на 20%);
- наибольшая субмезомасштабная вихревая активность отмечается в период формирования приповерхностного пикноклина (в начале теплого сезона);
- чаще всего субмезомасштабные вихри встречаются в районах фронтальных зон в период наиболее интенсивной фронтальной динамики и неровностей дна в период наиболее интенсивных приливных течений.

Литература

1. Thomas L.N., Tandon A., Mahadevan A. Submesoscale processes and dynamics // Ocean Modeling in an Eddy Regime, Geophys. Monogr. Ser. 2008. Vol. 177. P.17–38.
2. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. Исследование влияния динамических и циркуляционных процессов на распространение антропогенных и биогенных загрязнений морской поверхности на основе комплексного использования спутниковой информации // Проблемы постсоветского пространства. 2015. №4. С. 29-52.
3. Зацепин, А.Г. О природе короткопериодных колебаний основного черноморского пикноклина, субмезомасштабных вихрях и реакции морской среды на катастрофический ливень 2012 г. Островский А.Г., Кременецкий В.В., Пиотух В.Б., Куклев С.Б., Москаленко Л.В., Подымов О.И., Баранов В.И., Корж А.О., Станичный С.В. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т.49, № 6. С.717–732.
4. Родионов А.А., Никитин Д.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А., Филин К.Б. Оценка влияния субмезомасштабных вихревых структур на распространение акустических сигналов в Белом море // Тр. XIII Всероссийской конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Нестор-История, 2016. С. 220–223.
5. Романенков Д.А., Зимин А.В., Родионов А.А., Атаджанова О.А., Козлов И.Е. Изменчивость фронтальных разделов и особенности мезомасштабной динамики вод Белого моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9, № 1. С. 59–72.
6. Зимин А.В., Атаджанова О.А., Романенков Д.А., Козлов И.Е., Шапрон Б. Субмезомасштабные вихри в Белом море по данным спутниковых радиолокационных измерений // Исследование Земли из космоса. 2016. № 1-2. С.129–135.

Исследование выполнено в рамках государственного задания по теме № №0149-2018-0014 «Волновые процессы, явления переноса и биогеохимические циклы в морях и океанах: исследование формирующих механизмов на основе физико-математического моделирования и натурных экспериментальных работ». Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории спутниковой океанографии РГГМУ и Козлову И.Е. за предоставление радиолокационных изображений.

The study was carried out within the framework of the state assignment on the subject number №0149-2018-0014 "Wave processes, transport phenomena and biogeochemical cycles in the seas and oceans: a study of formative mechanisms based on physical and mathematical modeling and full-scale experimental work." The authors are grateful to the staff of the Laboratory of Satellite Oceanography of the RSHU and I.Ye. Kozlov. for providing radar images.