

Наблюдение малых вихрей в Белом, Баренцевом и Карском морях по данным спутниковых радиолокационных измерений

© 2017 О.А. Атаджанова^{1,2}, А.В. Зимин^{1,2}, Д.А. Романенков², И.Е. Козлов^{2,3}

¹ Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П. Ширинова РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: oksana.atadzhanova@gmail.com

² Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

Поступила в редакцию 15.12.2016 г.

Впервые на основе обобщения большого количества спутниковых радиолокационных изображений получены карты поверхностных проявлений субмезомасштабных вихревых структур в теплый сезон года на акватории Баренцева и Карского морей и оценены статистические характеристики наблюдаемых вихрей. Выполнен сравнительный анализ этих характеристик для Белого, Баренцева и Карского морей. Анализ месячных карт распределения вихрей позволил выявить районы их регулярного наблюдения и особенности сезонной изменчивости вихревой динамики. В Белом, Баренцевом и Карском морях значительная часть обнаруженных вихревых образований наблюдается вблизи гидрологических фронтов различного происхождения. Вихри чаще всего регистрировались в первую половину теплого (безледного) гидрологического сезона, когда фронты более динамичны, а сезонный прогрев верхнего слоя еще не достиг своего максимума.

Ключевые слова: субмезомасштабные вихри, спутниковые радиолокационные изображения, статистические характеристики вихревых образований, Белое море, Баренцево море, Карское море.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-2-80-90

Введение. Применительно к исследованию закономерностей формирования и взаимодействия разномасштабных гидрофизических полей и процессов в океане большое число работ последних лет было направлено на изучение субмезомасштабных структур, среди которых малые вихри и локальные фронты представляют особый интерес [1 – 4]. Эти структуры связаны с важнейшим масштабом в океане – первым бароклинным радиусом деформации (или внутренним радиусом Россби), на котором происходит нарушение геострофического и гидростатического балансов. Вследствие этого переходные субмезомасштабные процессы характеризуются резкими градиентами гидрологических параметров и коротким временем существования соответствующих неоднородностей, что затрудняет их наблюдения контактными методами. В настоящей работе под субмезомасштабными процессами подразумеваются вихри с диаметрами 1 – 10 км. Высокоразрешающие численные модели способны воспроизводить такие процессы в ограниченных областях, но в то

же время нуждаются в новой экспериментальной информации о субмезомасштабных структурах для разработки в крупномасштабных океанских моделях адекватных параметризаций потоков тепла и вещества, переносимых мезомасштабными и субмезомасштабными движениями [5].

Спутниковые данные высокого разрешения позволяют существенно расширить наши представления о мелкомасштабных и субмезомасштабных структурах и их динамике [6 – 13]. Систематический анализ таких данных для арктических морей до настоящего времени не выполнялся, за исключением акватории Белого моря [13]. Кроме того, представляет интерес сравнение особенностей распространения поверхностных проявлений вихревых структур в разных по своим морфометрическим и гидрологическим особенностям морях Северного Ледовитого океана.

Целью данной работы является анализ пространственно-временной изменчивости характеристик субмезомасштабных вихрей на акватории Белого, Баренцева и Карского морей по их поверхностным проявлениям на спутниковых радиолокационных изображениях (РЛИ) в теплый (безледный) период года.

Район исследований. Среди шельфовых арктических морей Баренцево, Белое и Карское моря характеризуются сильными приливными течениями, значительными неровностями дна, а также ярко выраженными фронтальными зонами. Воды этих морей неоднородны и формируются под совокупным влиянием циркуляции и энергообмена с атмосферой. Поступление вод из других бассейнов и неоднородная топография создают весьма сложную систему поверхностных (рис. 1), промежуточных и глубинных течений, в которой ведущую роль играют: многочисленные ветви Нордкапского течения и холодные воды Арктического бассейна и Карского моря – для Баренцева моря; поступление вод из Баренцева моря и речной сток – для Белого моря; поступление речных вод, относительно теплых вод из Баренцева моря и холодных арктических вод с севера – для Карского моря [14].

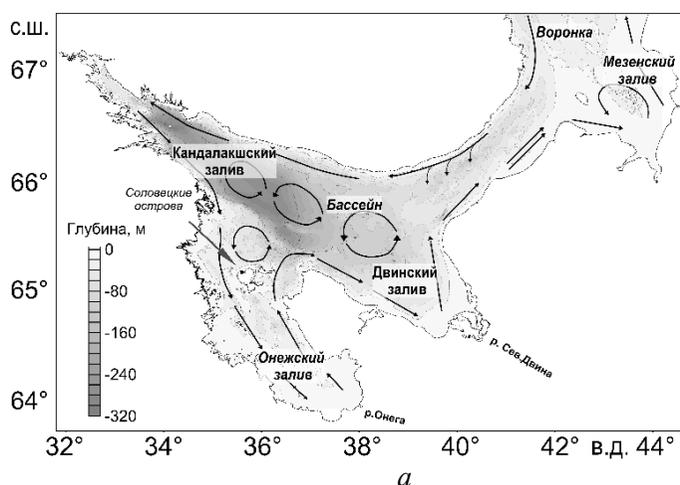
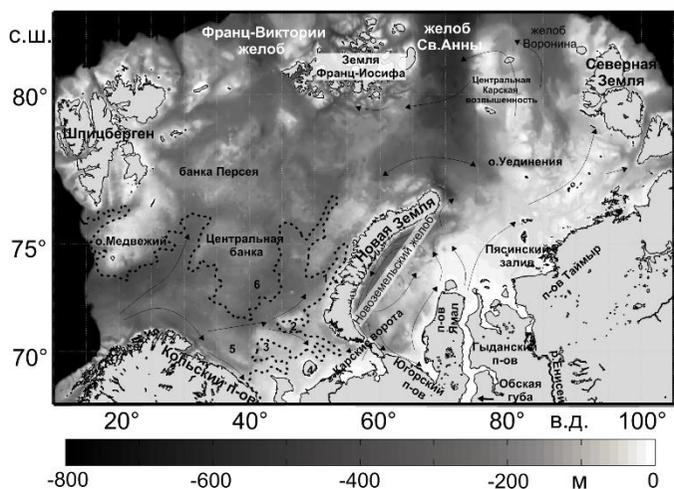


Рис. 1. Карты глубин Белого (а), Баренцева и Карского (б) морей. Стрелками показаны климатические поверхностные течения, пунктирной линией – среднеклиматическое положение полярного фронта; 1 – пролив Маточкин Шар; 2 – Гусиная банка; 3 – Северная Канинская банка; 4 – о. Колгуев; 5 – Мурманское поднятие; 6 – Центральная котловина [14] (см. также с. 82)



б

Рис. 1. Окончание

Материалы и методы исследования. В работе используются 2312 радиолокационных изображений, полученных со спутника *Envisat ASAR* в *C*-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) в безледный период 2007 – 2011 гг. Из них к Белому морю относятся 209 изображений, к Баренцеву – 1203, к Карскому – 900. Кроме того, для акватории Белого моря использовались 12 РЛИ за 2012 г. со спутников *Radarsat-1* с пространственным разрешением 25 м в режиме съемки *SGF (Path Image)* и *Radarsat-2* с пространственным разрешением 6 м в режиме съемки *Fine Quad-Pol*. Методика идентификации вихрей на РЛИ и определения их параметров (в число которых входят диаметр вихря и знак его вращения) изложена в работе [13]. Далее на основе полученной по РЛИ информации рассчитывались основные статистические характеристики вихрей и строились карты пространственного распределения их параметров.

Результаты и их обсуждение. По результатам анализа спутниковых данных зарегистрировано свыше 3500 вихревых структур, из которых 2970 имели циклонический (*Cn*) тип вращения, 621 – антициклонический (*Ac*). Доминирование числа циклонических вихрей над антициклоническими характерно для всех рассматриваемых морей. Статистические параметры вихрей представлены в таблице.

В небольшом по площади Белом море обнаружено наименьшее количество вихревых структур, несмотря на более продолжительный период наблюдений. Около 70% от общего числа вихрей было зарегистрировано в июне и июле. Как правило, наблюдаемые вихри имели циклонический тип вращения, при этом антициклонические вихри всегда были крупнее циклонических по размеру.

**Параметры вихрей в Белом, Баренцевом и Карском морях
по данным спутниковых радиолокационных измерений**

Месяц	Количество вихрей			Средний (min – max) диаметр, км		Средний диаметр, км
	<i>Ac</i>	<i>Cn</i>	<i>Ac + Cn</i>	<i>Ac</i>	<i>Cn</i>	<i>Ac + Cn</i>
Белое море, 2009 – 2012 гг.						
Май	–	1	1	–	2,2	2,2
Июнь	9	41	50	8 (2,9 – 13,2)	4,5 (1,4 – 9,3)	5,1
Июль	18	38	56	5,1 (0,9 – 12,1)	5,6 (2,1 – 10,6)	5,4
Август	7	24	31	3,5 (1,2 – 5,5)	3,3 (1,1 – 7)	3,4
Сентябрь	4	20	24	5,8 (1,2 – 12,5)	3,6 (1,5 – 9,6)	4,0
Всего	38	124	162	5,6 (0,9 – 13,2)	4,4 (1,1 – 10,6)	4,7
Баренцево море, 2007 г.						
Июнь	103	390	493	4,7 (0,3 – 17,1)	4 (0,3 – 15,6)	4,2
Июль	139	498	637	6 (0,2 – 21)	3,8 (0,2 – 25)	4,3
Август	156	366	522	3,5 (1 – 18,3)	3,7 (0,7 – 20,4)	3,6
Сентябрь	83	279	362	2,4 (0,5 – 12,1)	2,2 (0,2 – 15,9)	2,2
Октябрь	25	148	173	2,9 (0,5 – 10,6)	2,2 (0,4 – 9,8)	2,3
Всего	506	1681	2187	4,2 (0,2 – 21)	3,4 (0,2 – 25)	3,6
Карское море, 2007 г.						
Июль	17	359	376	2,9 (1,1 – 6,8)	2,4 (0,9 – 6,2)	2,5
Август	46	434	480	2,9 (1,6 – 8,3)	2,6 (0,8 – 13,6)	2,7
Сентябрь	12	176	188	3,6 (1,7 – 5,9)	3 (1,1 – 14,4)	3
Октябрь	2	196	198	1,6 (1,2 – 2)	1,2 (0,4 – 7,2)	1,2
Всего	77	1165	1242	2,8 (1,1 – 8,3)	2,3 (0,8 – 14,4)	2,4

В наибольшем по площади Баренцевом море было обнаружено максимальное количество вихревых структур (таблица). При этом следует учитывать, что это море имеет лучшее покрытие спутниковой съемкой и меньшую в течение теплого периода площадь ледяного покрова по сравнению с Карским морем. Наибольшее число вихрей отмечается в июле, наименьшее (10% от общего числа) – в октябре. В июне и августе их количество примерно одинаково. Средний размер всех вихрей изменялся в пределах 2,3 – 4,3 км, при этом, как и в Белом море, антициклонические вихри были больше в диаметре, а наиболее крупные вихри встречались преимущественно в июле и августе.

В Карском море обнаружено почти в 2 раза меньше вихревых структур, чем в Баренцевом (таблица), но с более существенным преобладанием циклонических вихрей. Почти 40% всех вихрей регистрировалось в августе, меньше всего (15%) – в сентябре. Вихри в Карском море меньше по размеру, чем в остальных морях, со средним за весь период диаметром 2,4 км. При этом средняя величина диаметра антициклонических вихрей также больше, чем циклонических.

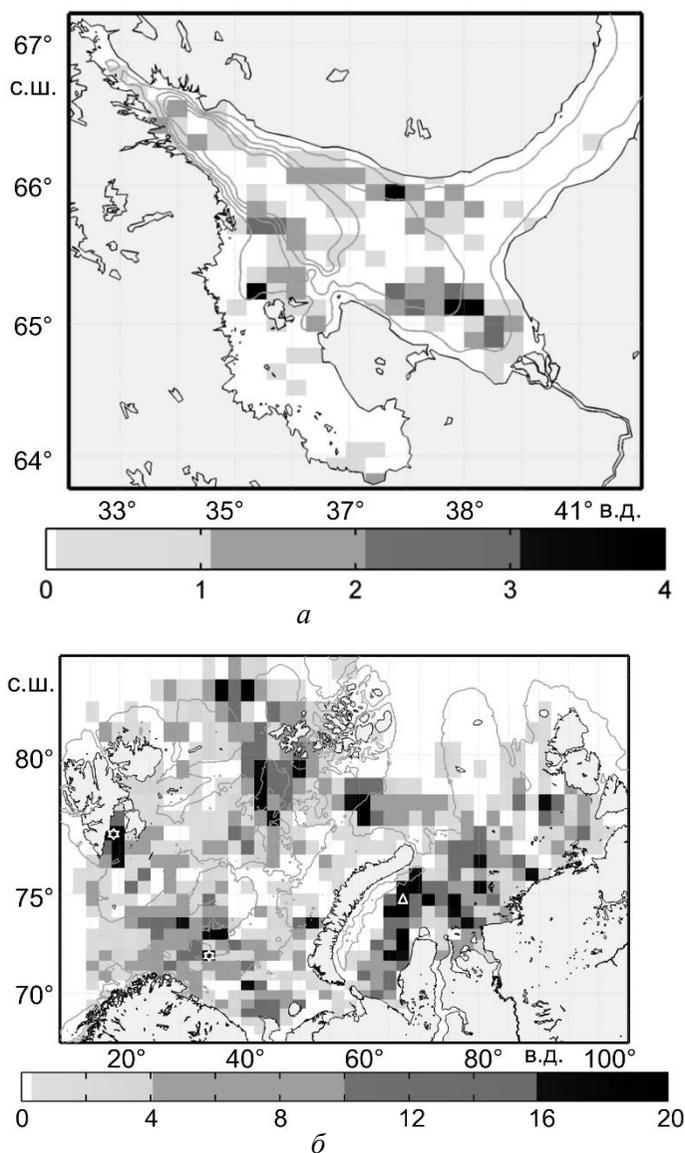


Рис. 2. Пространственное распределение количества вихревых структур на квадрат сетки для Белого (а), Баренцева и Карского (б) морей. Изолинии глубин проведены через 50 м (а) и через 250 м (б). Площадь квадрата сетки в Белом море 144 км², в Баренцевом и Карском – 2,5 тыс. км²

На рис. 2 видно, что вихревые структуры являются достаточно распространенным явлением и встречаются практически на всей акватории каждого из морей. В Баренцевом море реже всего они регистрировались в центральной части, чаще всего – юго-восточнее о. Медвежий, у восточного берега о. Западный Шпицберген, западнее арх. Земля Франца-Иосифа, между арх. Земля Франца-Иосифа и арх. Новая Земля, а также вблизи пролива Маточкин Шар. Количество вихрей в этих районах составило более 18 на квадрат сетки (квадрат сетки на карте имеет площадь в среднем 2,5 тыс. км²), воз-

ле арх. Шпицберген и севернее Кольского п-ова (звездочки на рис. 2, б) – 37 на квадрат сетки.

В Карском море вихри практически не встречались в глубоководной части желоба Святой Анны и Новоземельской впадины, а также в северной части центральной котловины. Наиболее часто они регистрировались в районе о-вов Уединения и Свердруп (Пясинский залив), а также недалеко от западного берега п-ова Ямал и южнее м. Желания. Количество вихрей в этих районах составило более 18 на квадрат сетки, максимальное количество (27 вихрей на квадрат сетки) наблюдалось южнее северной оконечности арх. Новая Земля (треугольник на рис. 2, б).

В Белом море (рис. 2, а) вихревые структуры чаще всего встречались вблизи Терского берега, севернее Соловецких о-вов и в Двинском заливе, редко – в центральных частях Горла и Бассейна, реже всего – в Горле. В зонах наибольшей вихревой активности наблюдалось 4 – 6 вихрей на квадрат сетки (равный $\sim 144 \text{ км}^2$).

Сравнивая распределение размеров вихрей (рис. 3), отметим, что наибольшие диаметры (свыше 8 км) зарегистрированы преимущественно в западной и центральной частях Баренцева моря, где, согласно климатическим данным, наблюдается заток теплых атлантических вод. В восточной части Баренцева и в Карском море вихри имели диаметр до 5 км. В Белом море под влиянием значительной приливной динамики крупные вихри образуются практически на всей акватории [13].

Размеры наблюдаемых вихревых образований сопоставлялись с оценками бароклинного радиуса Россби в изучаемых морях, полученными на основе данных климатического атласа ЕСИМО (<http://www.esimo.ru/atlas/>). Результаты расчета для июля – августа показали, что минимальное и максимальное значения радиуса для Белого моря составили 1,3 и 8 км, для Баренцева моря 0,2 и 9,5 км, для Карского моря 0,2 и 6 км. Его средние значения равны 4,3; 4,9 и 3 км для Белого, Баренцева и Карского морей соответственно, что не противоречит оценкам радиуса Россби, полученным для теплого времени года на основе другой базы данных [15]. Кроме того, согласно данным многолетних натурных измерений в отдельных районах Белого моря, сезонная и межгодовая изменчивость радиуса Россби также находилась в пределах 1 – 8 км со средними значениями, близкими к климатическим оценкам [13].

В соответствии с таблицей и рис. 3 размер вихрей в Белом море изменялся от 1 до 13 км со средним значением 4,7 км, в Баренцевом море – от 0,2 до 25 км со средним значением 3,6 км, в Карском море – от 0,4 до 14,4 км со средним значением 2,4 км. Несмотря на значительную сезонную изменчивость размеров вихрей, максимальная повторяемость наблюдается у вихрей с диаметром, близким к приведенным выше оценкам средних значений радиуса Россби (рис. 4). Часть вихрей имеет диаметры менее 6 км, что соответствует максимальному значению радиуса Россби в Карском море. Это значение можно считать характерным верхним пределом для субмезомасштабных вихрей в изучаемых арктических морях.

Представленная выше информация о пространственно-временной изменчивости количества и размеров вихрей на акватории трех арктических морей

позволяет сделать несколько замечаний о возможных механизмах генерации вихревых образований.

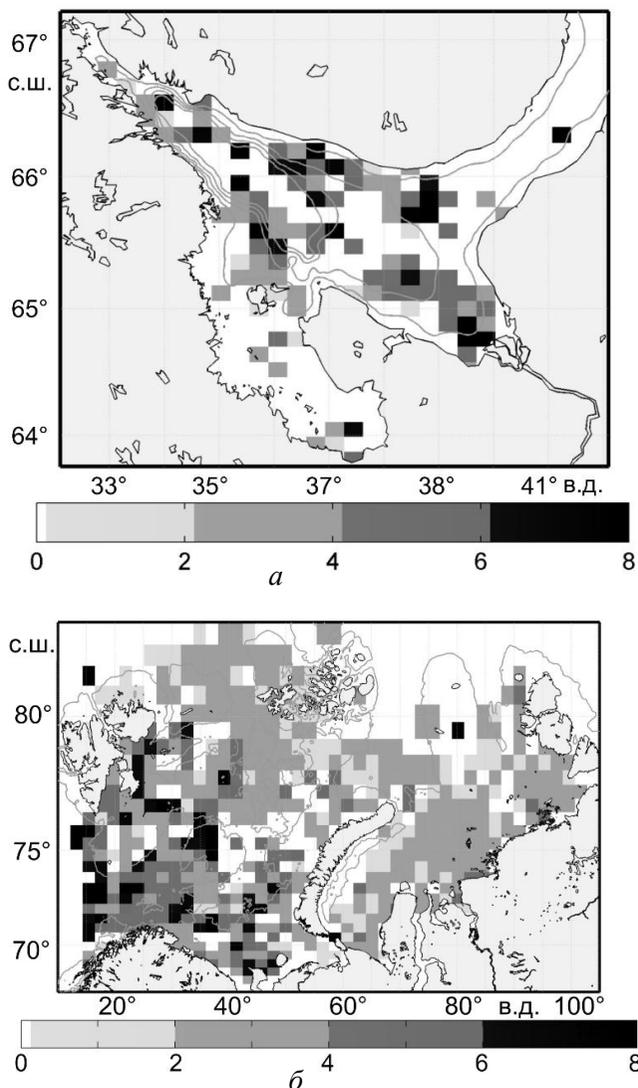


Рис. 3. Пространственное распределение диаметров вихревых структур на акватории Белого (а), Баренцева и Карского (б) морей. Обозначения см. на рис. 2

В работе [16] показано, что в Белом море вихревые структуры образуются под влиянием динамики и/или неустойчивости гидрологических фронтов. В Двинском и Онежском заливах моря активная динамика стоковых фронтов, обусловленная максимумом речного стока в июне и июле, определяет более частую регистрацию вихрей из космоса в эти месяцы. В районах существования приливных фронтов, например в Горле и в окрестности Соловецких о-вов, вихри наблюдаются реже и не имеют выраженного сезонного хода. Основной причиной вихреобразования в этих районах была фронтальная неустойчи-

вость (меандрирование). Другой механизм, связанный с топографическими эффектами при взаимодействии приливного потока с неровностями дна, был благоприятен для генерации вихрей в районе к северу от Соловецких о-вов и в Бассейне вдоль Терского берега (рис. 2, *a*).

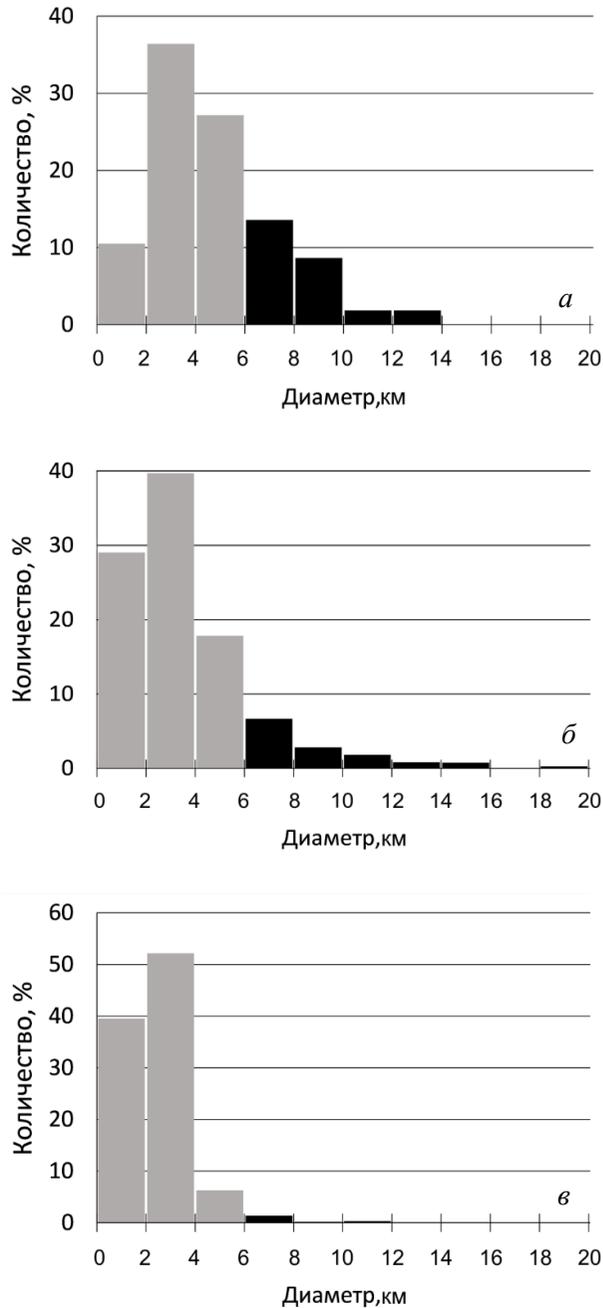


Рис. 4. Гистограммы распределения диаметров вихревых структур на акваториях Белого (*a*), Баренцева (*б*) и Карского (*в*) морей

В Баренцевом море большую роль в структурировании мест повышенной вихревой активности играет, как можно предположить, Полярная фронтальная зона, в которой модифицированные воды Баренцева моря разделяют арктические и атлантические воды (рис. 1). Усиление поступления атлантических вод и таяние сезонного льда весной и в начале лета вызывает обострение и активность южного (между баренцевоморскими и атлантическими водами) и северного (между арктическими и баренцевоморскими водами) фронтов. Это, по-видимому, объясняет наличие выявленных зон регулярного наблюдения вихрей севернее Кольского п-ова, юго-западнее и юго-восточнее арх. Земля Франца-Иосифа (рис. 2). Топографический механизм вихреобразования, в том числе в районах сильных приливных течений, также необходимо иметь в виду. В частности, данный механизм должен проявляться на кромке шельфа к северо-западу от арх. Земля Франца-Иосифа, на входе в Белое море, в районе банок и котловин в центральной части Баренцева моря.

В Карском море ведущую роль в повышении вихревой активности определяют тонкий галоклин и соленостный фронт, образованные стоком рек Обь и Енисей. В июле и августе наблюдается усиление речного стока, оказывающего влияние на южную и восточную части Карского моря, образование модифицированных вод Карского моря и усиление фронтальной зоны с летними баренцевоморскими и арктическими водами. Именно в этих районах в летние месяцы зарегистрировано наибольшее число вихрей (рис. 2 и таблица).

Заключение. Выполнен сравнительный анализ пространственно-временной изменчивости малых вихрей в Белом, Баренцевом и Карском морях, зарегистрированных на основе анализа спутниковых радиолокационных изображений в безледный период года. Определялись координаты положения центров вихрей, их диаметры и тип вращения, что позволило в дальнейшем выявить районы квазирегулярного наблюдения вихревых структур, оценить их сезонную изменчивость и обсудить возможные механизмы (источники) генерации вихрей в этих районах.

В результате анализа спутниковых измерений для трех арктических морей выявлен 3591 случай регистрации поверхностных проявлений малых вихрей. Вихри встречались практически на всей акватории указанных морей, при этом среднее количество (число всех зарегистрированных вихрей по отношению к площади моря) составило 1,4 и 1,8 вихря на 1 тыс. км² в Карском и Белом море соответственно. Максимальное число вихрей зарегистрировано в Баренцевом море, однако среднее количество составило всего 1,5 вихря на 1 тыс. км². Это объясняется компактным расположением вихрей в нескольких отдельных районах моря.

Отметим еще раз районы регулярного наблюдения вихревых структур. В Белом море – Двинский залив, районы севернее Соловецких о-вов и вблизи Терского берега (до 40 вихрей на 1 тыс. км²). В Баренцевом море – южная часть моря, районы к западу от арх. Земля Франца-Иосифа, возле восточного берега о. Западный Шпицберген, между арх. Новая Земля и арх. Земля Франца-Иосифа, где количество вихрей достигало 14 на 1 тыс. км². В Карском море – между о. Северный арх. Новая Земля и п-овом Ямал, в рай-

оне о-вов Уединения и Свердрупа (Пясинский залив), где количество вихрей достигало 11 на 1 тыс. км².

Максимальная повторяемость наблюдается у вихрей с размерами, близкими к оценкам первого бароклинного радиуса деформации (внутренний радиус Россби). Вихри с диаметрами менее 6 км, которые мы относим к субмезомасштабным, встречались чаще всего в Карском море – в 95% случаев. В Белом море они регистрировались примерно в 80% случаев, в Баренцевом – примерно в 85% случаев. Также есть случаи, когда вихри имели диаметры до 25 км (в частности в Баренцевом море). Средний диаметр вихрей изменялся от 2,4 км в Карском море до 4,7 км – в Белом.

В исследуемых морях механизмами формирования вихревых структур, по-видимому, являются динамика и неустойчивость фронтов различного происхождения, а также топографические эффекты. Пик наибольшей вихревой активности наблюдался в июле в Баренцевом и Белом морях, в августе – в Карском море. Отметим, что в Карском и Белом морях значительное количество вихрей располагается вблизи фронтальных зон, обусловленных речным стоком, причем в Карском море речной сток по климатическим нормам приходится на август, в Белом море – на июль. Тот факт, что максимальное количество вихрей во всех морях наблюдалось вблизи фронтальных зон и соответствовало месяцам наибольшей активности гидрологических фронтов, должен мотивировать дальнейшие исследования закономерностей изменчивости фронтов и ее связи с вихревой динамикой в Арктике.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-35-60072 мол_а_дк (заказ и обработка данных) и № 15-05-04639 (анализ данных и выделение вихревых структур), а также в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0011 (разработка программного обеспечения для анализа данных). Спутниковые данные *Envisat ASAR* были получены из Европейского космического агентства в рамках проекта *ESA C1F-29721*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Thomas L.N., Tandon A., Mahadevan A.* Submesoscale Processes and Dynamics // *Ocean Modeling in an Eddy Regime* / Eds. M.W. Hecht, H. Hasumi. – American Geophysical Union, Washington, D.C., 2008. – P. 17 – 38. – doi:10.1029/177GM04.
2. *Capet X., McWilliams J.C., Molemaker M.J. et al.* Mesoscale to submesoscale transition in the California Current system. Part I: Flow structure, eddy flux, and observational tests // *J. Phys. Oceanogr.* – 2008. – 38, No. 1. – P. 29 – 43. – doi:10.1175/2007JPO3671.1.
3. *Зацетин А.Г.* Субмезомасштабные вихри на Кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // *Океанология.* – 2011. – 51, № 4. – С. 592 – 605.
4. *Лукьянов П.В.* Динамика компактного вихря в зоне прибрежного шельфа // *Морской гидрофизический журнал.* – 2013. – № 1. – С. 21 – 33.
5. *Özgökmen T.M., Poje A.C., Fischer P. et al.* Large eddy simulations of mixed layer instabilities and sampling strategies // *Ocean Model.* – 2011. – 39. – P. 311 – 331.
6. *Gurova E., Chubarenko B.* Remote-sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the south-eastern Baltic // *Oceanologia.* – 2012. – 54, No. 4. – P. 631 – 654.

7. *Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. и др.* Мелкомасштабные вихри Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – 7, № 1. – С. 248 – 259.
8. *Каримова С.С.* Статистический анализ субмезомасштабных вихрей Балтийского, Черного и Каспийского морей по данным спутниковой радиолокации // Исследование Земли из космоса. – 2012. – № 3. – С. 31 – 47.
9. *Рогачев К.А.* Субмезомасштабные струи на континентальном шельфе залива Петра Великого (Японское море) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – 7, № 3. – С. 186 – 190.
10. *Дубина В.А., Файман П.А., Пономарев В.И.* Вихревая структура течений в заливе Петра Великого // Изв. ТИНРО. – 2013. – 173. – С. 247 – 258.
11. *Кубряков А.А., Станичный С.В.* Динамика Батумского антициклона по спутниковым данным // Морской гидрофизический журнал. – 2015. – № 2. – С. 67 – 78.
12. *Дулов В.А., Юровская М.В., Козлов И.Е.* Прибрежная зона Севастополя на спутниковых снимках высокого разрешения // Там же. – 2015. – № 6. – С. 43 – 60.
13. *Зимин А.В., Атаджанова О.А., Романенков Д.А., Козлов И.Е. и др.* Субмезомасштабные вихри в Белом море по данным спутниковых радиолокационных измерений // Исследование Земли из космоса. – 2016. – № 1 – 2. – С. 129 – 135.
14. *Добровольский А.Д., Залогин Б.С.* Моря СССР. – М.: Изд МГУ, 1982. – 192 с.
15. *Nurser A.J.G., Vacon S.* The Rossby radius in the Arctic Ocean // Ocean Sci. – 2014. – No. 10. – P. 967 – 975.
16. *Романенков Д.А., Зимин А.В., Родионов А.А. и др.* Изменчивость фронтальных разделов и особенности мезомасштабной динамики вод Белого моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2016. – 9, № 1. – С. 59 – 72.

Satellite radar observations of small eddies in the White, Barents, and Kara seas

O. A. Atadzhanova^{1,2}, A.V. Zimin^{1,2}, D.A. Romanenkov², I.E. Kozlov^{2,3}

¹*Saint-Petersburg Branch of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia*

e-mail: oksana.atadzhanova@gmail.com

²*Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia*

³*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

The maps of surface manifestations of sub-mesoscale vortex structures in the Barents and Kara seas in a warm season are obtained based on generalizing a large amount of satellite radar images. The statistical characteristics of the observed vortices are assessed. Comparative analysis of the same characteristics inherent to the White, Barents and Kara seas is done. Being analyzed, the monthly maps of the vortices' distribution permit to reveal the regions where they are constantly observed and the features of the vortex dynamics seasonal variability. In the White, Barents and Kara seas, the majority of the revealed vortex formations are observed close to the hydrological fronts of various origins and most often – during the first half of a warm ice-free hydrological season when the fronts are more dynamic and seasonal heating of the upper layer has not achieved its maximum.

Keywords: sub-mesoscale eddies, satellite radar images, statistics of vortex formation, White Sea, Barents Sea, Kara Sea.