

Субмезомасштабные вихревые структуры и фронтальная динамика в Баренцевом море

О. А. Атаджанова^{1,2,*}, А. В. Зимин¹, Е. И. Свергун^{1,2}, А. А. Коник^{1,2}

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

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

* E-mail: oksana.atadzhanova@gmail.com

Поступила: 04.12.2017 г., после доработки – 12.01.2018 г.

На основании обобщения большого количества спутниковых радиолокационных снимков *ENVISAT ASAR* за теплый период 2007 и 2011 гг. производился комплексный анализ пространственно-временной изменчивости поверхностных проявлений субмезомасштабных вихрей на акватории Баренцева моря, а также количественно оценивалась связь между вихревыми структурами и фронтальной динамикой. Установлено, что субмезомасштабные вихри – распространенное явление на акватории моря, однако чаще всего они встречались северо-западнее Земли Франца-Иосифа, возле восточного берега о. Западный Шпицберген, на акватории между Землей Франца-Иосифа и Новой Землей, в юго-западной части моря, в районе п-ва Канин Нос, а абсолютный максимум их встречаемости наблюдался северо-восточнее п-ва Рыбачьего. Пик вихревой активности в оба года отмечался в июле. При диапазоне изменчивости диаметров от 0,2 до 25 км, наиболее часто регистрировались вихри размером от 2 до 4 км (~ 45%) и циклоническим типом завихренности (~ 80%). Анализ данных о температуре поверхности моря позволил обнаружить значительную для всего моря мезомасштабную и синоптическую динамику фронтальных зон и связанных с ними фронтальных разделов в течение всего теплого сезона. Сопоставление положений вихрей с областями изменчивости положений фронтов за каждый месяц по данным 2007 г. показало, что субмезомасштабные структуры часто регистрируются внутри этих областей (до 50%), при этом период наибольшей вихревой активности в июле совпал с периодом наибольшей синоптической и мезомасштабной динамики фронтов.

Ключевые слова: субмезомасштабные вихри, спутниковые радиолокационные изображения, температура поверхности моря, термические фронтальные зоны, Полярный фронт, Прикромочный фронт, Баренцево море.

Благодарности. 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 натуральных экспериментальных работ».

Для цитирования: Субмезомасштабные вихревые структуры и фронтальная динамика в Баренцевом море / О. А. Атаджанова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. № 3. С. 237–246. doi: 10.22449/0233-7584-2018-3-237-246

Sub-Mesoscale Eddy Structures and Frontal Dynamics in the Barents Sea

О. А. Atadzhanova^{1,2,*}, А. В. Zimin¹, Е. И. Svergun^{1,2}, А. А. Konik^{1,2}

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

²Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia

*e-mail: oksana.atadzhanova@gmail.com

Complex analysis of spatial and temporal variability of surface manifestations of the sub-mesoscale eddies in the Barents Sea is carried out based on generalization of a large amount of satellite SAR-images of *ENVISAT ASAR* obtained in course of the warm periods in 2007 and 2011. The relationship between the eddy structures and the frontal dynamics is also quantitatively evaluated. It is found that the sub-mesoscale eddies represent a widespread phenomenon in the sea. They are most often observed to the northwest off the Franz Josef Land, near the eastern

© О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, Е. И. Свергун, А. А. Коник, 2018

coast of the Western Spitsbergen, between the Franz Josef Land and the Novaya Zemlya, in the southwestern part of the sea and near the Kanin Nos peninsula. But their absolute maximum is recorded to the northeast off the Rybachy Peninsula. In both years the eddy activity peak falls on July. Though the diameters of the eddies under study vary from 0.2 to 25 km, those with the diameters 2–4 km (~ 45%) and of a cyclonic rotation type (~ 80%) are the most numerous. Being analyzed, the sea surface temperature data permit to reveal significant mesoscale and synoptic dynamics of the frontal zones and the associated frontal boundaries throughout the entire sea in course of the whole warm season. Comparison of the eddy locations with variability of the fronts' positions for each month (based on the data of 2007) shows that the sub-mesoscale structures are often recorded within these regions (up to 50%). The period of the highest eddy activity in July coincides with that of the strongest synoptic and mesoscale dynamics of the fronts.

Keywords: sub-mesoscale eddy, satellite radar image, sea surface temperature, thermal frontal zone, Polar front, Marginal ice or Arctic front, Barents Sea.

For citation: Atadzhanova, O.A., Zimin, A.V., Svergun, E.I. and Konik, A.A., 2018. Sub-mesoscale eddy structures and frontal dynamics in the Barents Sea. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-jour-nal] 34(3), pp. 237-246. doi:10.22449/0233-7584-2018-3-237-246 (in Russian).

Введение. Баренцево море расположено в полярных районах, отличающихся суровыми климатическими условиями. Большая часть моря (за исключением юго-западной части) покрывается льдом в зимний период. Это связано с тем, что океанографические условия формируются течениями под влиянием адвекции тепла [1]. На акватории Баренцева моря происходит взаимодействие сравнительно теплых атлантических вод и холодных вод Северного Ледовитого океана, что определяет формирование Полярной фронтальной зоны в центральной части моря, а Прикромочной – в северной его части [2–4]. Структуры и характеристики фронтальных зон и фронтов в них различаются по данным разных авторов [2, 5–8]. При этом подробное описание мезомасштабной и синоптической динамики данных фронтальных зон и фронтов в литературе отсутствует. Описания фронтальных зон на акватории всего Баренцева моря, как правило, основываются на обобщении данных многолетних гидрологических наблюдений и дают представление об их среднем положении, но не о мезомасштабной динамике в течение безледного периода [2, 7, 9].

Из-за неустойчивости вдоль фронтов могут образовываться меандры и вихри. В работах [10, 11] отмечалось наличие мезомасштабных вихревых структур в Полярной фронтальной зоне на границе с Норвежским морем. В работах [2, 12] упоминаются вихри диаметром от единиц до десятков километров, выявленные во время полигонных съемок в северо-западной части Баренцева моря и в районе возвышенности Персея. Спутниковые данные также позволили зарегистрировать антициклонические и циклонические меандры около Полярной фронтальной зоны [13] и субмезомасштабные вихри на акватории всего моря [14]. Однако до настоящего времени не было специализированного исследования об особенностях пространственной изменчивости характеристик малых (субмезомасштабных) вихрей на акватории моря за несколько лет. Кроме того, отсутствуют оценки связи фронтальной динамики и особенностей формирования малых вихрей, которые могут существенным образом влиять на процессы вертикального и горизонтального обмена на акватории моря. Цель настоящего исследования – описать внутри-сезонные и межгодовые особенности проявлений субмезомасштабных вихрей

и сопоставить их с изменчивостью положения фронтов в течение теплого сезона на акватории Баренцева моря.

Материалы и методы. Для детектирования малых (субмезомасштабных) вихревых структур в Баренцевом море использовалось 1203 и 838 радиолокационных изображений соответственно за июнь – октябрь 2007 и 2011 гг. высокого разрешения *ENVISAT ASAR* в *C*-диапазоне и режимах съемки *WSM* (ширина полосы обзора 400 км, пространственное разрешение 150 м) и *IMP* (100 км и 25 м соответственно). Выбор 2007 и 2011 гг. обусловлен тем, что в эти годы наблюдалась минимальная площадь льда на акватории моря [15]. В среднем покрытие снимками Баренцева моря составило 120 радиолокационных изображений (РЛИ), при этом в 2011 г. его юго-восточная часть почти не охвачена РЛИ, и в оба года максимум покрытия (более 200 снимков) пришелся на северную часть моря. По этим данным оценивалась изменчивость положения, диаметров, типа закрутки вихревых структур.

Чтобы получить представление о положении фронтов, использовались поля температуры поверхности моря и ее градиента, рассчитанные по суточным данным температуры поверхности моря – продукта *GHRSSST (Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis) Level 4 OSTIA (Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis)* с разрешением $0,05^\circ$ по широте и долготе с июня по октябрь 2007 и 2011 гг. На основе этих данных рассчитывались осредненные (месячные и декадные) поля температуры и ее градиента, по которым определялись положения фронтальных зон и фронтов. По трем меридиональным разрезам вдоль 20° , 35° и 50° в. д для фронтальных зон оценивались их средняя ширина, максимальный и средний градиенты. Для сопоставления полученных данных о фронтах и вихревых структурах строились ежемесячно композитные карты. На них совмещалось положение вихрей и декадное положение фронтов и фронтальных разделов. Карты строились за июнь – сентябрь 2007 г.

Субмезомасштабные вихревые структуры. В Баренцевом море вихревые структуры были зарегистрированы практически на всей акватории моря (рис. 1). Детектировались одиночные вихри и вихревые структуры разнообразных форм: спиральные, грибовидные, в виде цепочек. Всего было обнаружено 2934 малых вихревых структуры, среди которых преобладали структуры с циклоническим типом закрутки (*Cn*) – 2383 шт. (81%). Наибольшей частотой встречаемости вихрей характеризовались следующие районы: северо-западнее Земли Франца-Иосифа (ЗФИ), возле восточного берега о. Западный Шпицберген, в юго-западной части моря (в районе поступления атлантических вод), в центральной части пролива между ЗФИ и Новой Землей, в районе Канина Носа, – в них вихри встречались чаще чем на каждом десятом снимке. Наибольшая встречаемость (чаще чем на каждом третьем снимке, то есть на 33% изображений на рассматриваемую единицу сетки) отмечалась в районе северо-северо-восточнее п-ва Рыбачьего, где на 1 тыс. км² пришлось 14 вихрей. Пространственное распределение размеров вихревых структур показало, что в среднем крупные вихри (свыше 7–8 км) детектировались

в зоне распространения атлантических вод (юго-западная часть моря). Вихри с размерами меньше 2 км были зарегистрированы преимущественно северовосточнее Шпицбергена, а также между ЗФИ и Новой Землей. Чаще всего встречались вихри с диаметром $\sim 2\text{--}4$ км, при этом как среди циклонических, так и антициклонических (Ac) вихрей, со средним значением 3,6 км при моде и медиане 2,8 и 2 км соответственно.

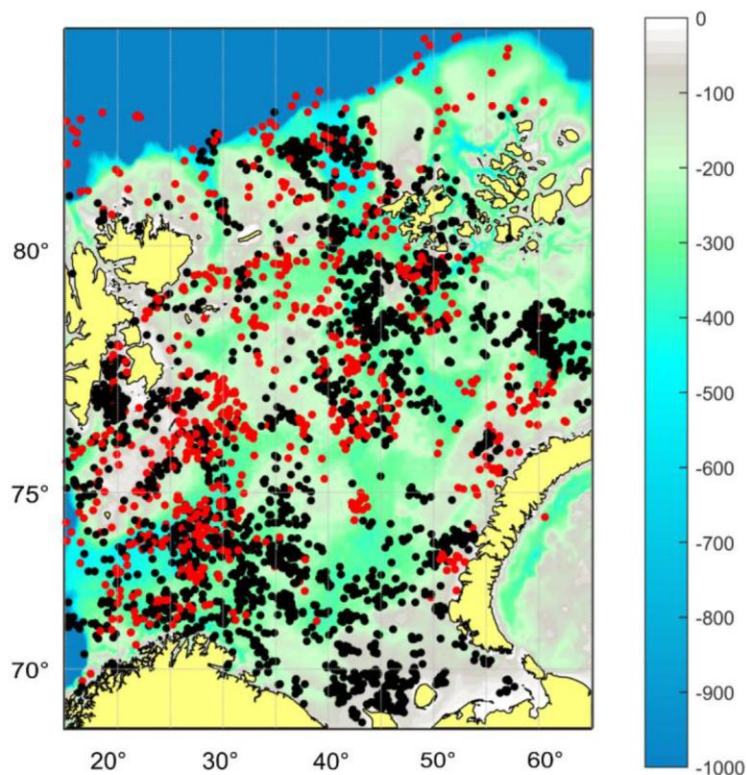


Рис. 1. Пространственное распределение положения центров малых вихрей за 2007 (черные круги) и 2011 гг. (красные круги). Шкала глубин в метрах

Fig. 1. Spatial distribution of the locations of the small eddies' centers in 2007 (black circles) and 2011 (red circles). Depth scale is in meters

Анализ внутрисезонного распределения вихревых структур в Баренцевом море показал (табл. 1), что с июня по июль их число увеличивалось, а с июля по октябрь уменьшилось в 4,5 раза. Пик вихревой активности пришелся на июль и составил 854 вихря за месяц. Но максимум антициклонических вихрей наблюдался в августе, хотя и отличался от показателя июля незначительно (на 9 вихрей).

Среднемесячный диаметр вихрей варьирует от 2,3 до 4,2 км. При этом с июня по октябрь наблюдается тенденция к его уменьшению. Почти во все месяцы среднемесячные диаметры антициклонических вихрей были больше аналогичных параметров циклонических вихрей, при этом последних регистрировалось в несколько раз больше каждый месяц.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

**Параметры вихрей в Баренцевом море внутри теплого сезона,
Ac – антициклонические вихри, Cn – циклонические, (Ac + Cn) – все вихри**
**Parameters of the eddies in the Barents Sea during the warm season,
Ac denotes the anticyclonic eddies, Cn – the cyclonic ones and (Ac + Cn) –
all the eddies**

Месяц / Month	Количество вихрей, шт / Number of eddies, pcs			Средний диаметр, км / Mean diameter, km		
	Ac	Cn	Ac + Cn	Ac	Cn	Ac + Cn
Июнь / June	116	563	679	4,7	4,2	4,2
Июль / July	156	698	854	5,9	3,7	4,1
Август / August	167	549	716	3,4	3,3	3,3
Сентябрь / September	87	411	498	2,4	2,4	2,4
Октябрь / October	25	162	187	2,9	2,2	2,3
Итог за сезон / Sum total for the season	551	2383	2934	4,2	3,4	3,5

За 2007 и 2011 гг. зарегистрировано 2187 и 747 вихревых структур соответственно (табл. 2). По сравнению с 2007 г., за 2011 г. имеется меньше радиолокационных изображений, покрытие снимками более неравномерное: в основном охвачена северная часть моря и почти не покрыта юго-восточная его часть, которая при сопоставлении районов встречаемости вихрей по этой причине не рассматривается. В 2011 г. вихри регистрируются севернее, чем в 2007 г., ввиду большей площади воды, свободной ото льда [15]. Но в целом положение скоплений вихревых структур сходно в оба года (как и районы наибольшей встречаемости, кроме юго-восточной части моря), а общие закономерности внутри сезона по всему массиву данных (табл. 1) сохраняются и для каждого года в отдельности (табл. 2). Около 90% малых вихревых структур имели размеры до 6 км, что позволяет отнести их к субмезомасштабу, при этом в оба года преобладали диаметры от 2 до 4 км, от 20 до 30% вихрей имели размеры до 2 км, от 10 до 20% – 4...6 км.

Выполненное обобщение показывает, что субмезомасштабные вихри являются распространенным явлением на всей акватории Баренцева моря. Интересно, что некоторые их характеристики и закономерности, установленные по вихревым проявлениям на поверхности Баренцева моря, наблюдались и в других районах Мирового океана. В частности, это касается преобладания вихрей циклонического вращения над количеством вихрей с антициклоническим вращением [16–19], хотя в море Бофорта большинство детектированных мелкомасштабных вихрей были антициклонического вращения [20], которые

развивались внутри существующего в летний период антициклонического круговорота поверхностных вод. Вероятно, благоприятным условием доминирования циклонических субмезомасштабных вихрей (в Северном полушарии) является фоновая циклоническая завихренность.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

**Параметры вихрей в Баренцевом море за 2007 и 2011 гг.,
Ac – антициклонические вихри, *Cn* – циклонические, (*Ac + Cn*) – все вихри**

Parameters of the eddies in the Barents Sea in 2007 and 2011, *Ac* denotes the anticyclonic eddies, *Cn* – the cyclonic ones and (*Ac + Cn*) is all the eddies

Месяц / Month	Количество вихрей, шт / Number of eddies, pcs			Средний (min – max) диаметр, км / Mean (min – max) diameter, km		Средний диа- метр, км / Mean diame- ter, km
	<i>Ac</i>	<i>Cn</i>	<i>Ac + Cn</i>	<i>Ac</i>	<i>Cn</i>	<i>Ac + Cn</i>
2007 г.						
Июнь / June	103	390	493	4,7 (0,3–17,1)	4 (0,3–15,6)	4,2
Июль / July	139	498	637	6 (0,2–21)	3,8 (0,2–25)	4,3
Август / August	156	366	522	3,5 (1–18,3)	3,7(0,7–20,4)	3,6
Сентябрь / September	83	279	362	2,4 (0,5–12,1)	2,2 (0,2–15,9)	2,2
Октябрь / October	25	148	173	2,9 (0,5–10,6)	2,2 (0,4–9,8)	2,3
Итог / Sum total	506	1681	2187	4,2 (0,2–21)	3,4 (0,2–25)	3,6
2011 г.						
Июнь / June	13	173	186	4,6 (1,6–10,3)	4,4 (1,6–12,9)	4,4
Июль / July	17	200	217	5,2 (1,9–14,5)	3,5 (0,9–15,6)	3,6
Август / August	11	183	194	3,1 (1,7–6,4)	2,3 (1,2–5,4)	2,4
Сентябрь / September	4	132	136	2,0 (1,5–2,6)	2,7 (1,0–9,9)	2,7
Октябрь / October		14	14		2,5(1,0–4,9)	2,5
Итог / Sum total	45	702	747	4,2 (1,6–14,5)	3,3 (0,9–15,6)	3,3

Фронтальные зоны. Прикромочная фронтальная зона в оба года прослеживалась в северной части моря западнее арх. Шпицберген и южнее ЗФИ, меняя свое положение вслед за смещением кромки льда. При этом в начале

и конце теплого периода в западной части моря Прикромочная и Полярная фронтальные зоны располагались близко друг к другу. За период с июня по октябрь самое южное положение Прикромочной фронтальной зоны отмечалось в начале июня, самое северное – в середине августа. Ее смещение за сезон превышало 450 км. Ширина Прикромочной фронтальной зоны на основании данных трех меридиональных разрезов колебалась в 2007 г. от 44 до 122 км (в среднем около 80 км) и в 2011 г. от 44 до 139 км (среднее значение 90 км). В оба года во фронтальной зоне преобладал ступенчатый тип термической структуры. Максимальный градиент температуры поверхности моря составил в 2007 г. – 0,07 С/км, в 2011 г. – 0,05 С/км.

Полярная фронтальная зона располагалась преимущественно в центральной части моря и была ориентирована с запада на восток. Ее ширина, по данным упомянутых выше разрезов, в 2007 г. изменялась от 44 до 206 км (среднее значение 130 км), а в 2011 г. – от 53 до 167 км (в среднем 120 км). Положение Полярной фронтальной зоны в западной части моря было квазипостоянно, здесь же наблюдались и максимальные градиенты 0,05° С/км. Наибольшая динамика фронтальной зоны и ее фронта регистрировалась в восточной части моря, где градиенты были значительно слабее, чем в западной части. Так и в Прикромочной, и в Полярной фронтальной зоне в оба года чаще всего регистрировался ступенчатый тип термической структуры.

Оба фронта проявляли значительную временную динамику, которая находила свое отражение как на декадном интервале осреднения, так и на месячном. Сразу стоит отметить, что интенсивная динамика фронтов происходила внутри месячных интервалов. Причем из сравнения среднемесячных и среднедекадных положений фронтальных линий (рис. 2) следует, что при изучении внутрисезонной фронтальной динамики желательно ориентироваться на декадные данные, которые характеризуют значительную мезомасштабную изменчивость положения фронтов.

Анализ композитных карт показал, что целом за весь период внутри и на периферии области фронтальной изменчивости зарегистрирована четверть всех вихрей, при этом в области Полярного фронта детектировано всего на 1% меньше вихревых структур, чем в области Прикромочного. В областях декадной изменчивости фронтов преобладали вихри малого размера (до 4 км) с циклоническим типом закрутки. Однако изредка на периферии фронтальных зон наблюдались и крупные образования (свыше 8 км в диаметре) с антициклоническим типом закрутки.

Максимальное число вихрей в области изменчивости Прикромочного и Полярного фронтов было зарегистрировано в июле 2007 г. (20 и 24% соответственно от общего числа за месяц). В этот же месяц наблюдался пик вихревой активности, и смещение положения декадных фронтов было максимальным (рис. 2, *b*). Отмеченный выше факт частого проявления малых вихрей во фронтальных зонах, а в нашем случае – в области изменчивости поверхностных фронтов, позволяет предположить связь этих вихрей с фронтальной активностью. В июне и августе регистрировалось от 10 до 13% вихрей за месяц внутри и на периферии каждой из областей, в то время как в сентябре на обе области пришлось всего 14% от числа всех вихрей за сентябрь. Однако образование субмезомасштабных вихрей с непродолжитель-

ным временем жизни не всегда можно отождествить с каким-либо механизмом по доступной спутниковой информации, тем более что эти механизмы могут работать в сочетании. Тем не менее проведенное сопоставление позволяет утверждать, что субмезомасштабные вихри чаще проявляются в первую половину лета, когда фронты более динамичны и сезонный прогрев верхнего слоя еще не достиг своего максимума.

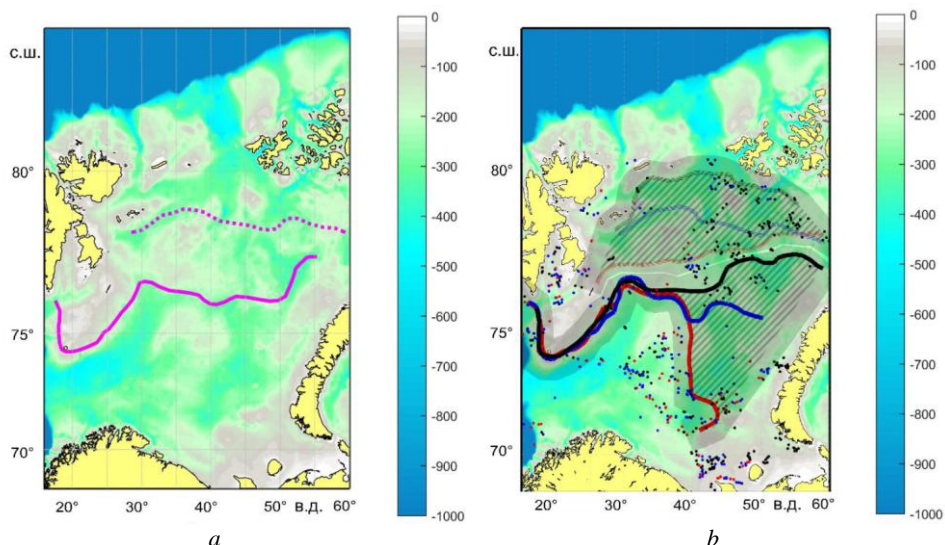


Рис. 2. Среднемесячные (*a*) и декадные (*b*) положения Прикромочного (штриховая линия) и Полярного (сплошная линия) фронтов за июль 2007 г. Розовым цветом показаны среднемесячные положения, красным – за первую декаду, синим – за вторую декаду, черным – за третью декаду. Косыми линиями обозначены области изменчивости декадных положений фронтов в течение июля 2007 г., серым цветом – 50-километровая зона вблизи области изменчивости. Шкала глубин в метрах

Fig. 2. Monthly average (*a*) and decadal (*b*) locations of the Marginal ice front (dashed line) and the Polar front (solid line) in July, 2007. Pink color denotes their monthly average positions, red – in the 1st decade, blue – in the 2nd decade and black – in the 3rd one. Slanting lines show the areas of variability of the fronts' decadal locations in July, 2007 and grey color – the 50 km zone close to the area of variability. Depth scale is in meters

Заключение. В рамках работы по радиолокационным изображениям за июнь – октябрь 2007 и 2011 гг. были детектированы характеристики малых вихрей: положение центра, тип закрутки и диаметр. Анализ данных характеристик позволил выявить внутрисезонные и межгодовые особенности пространственно-временной изменчивости параметров малых вихрей, а сопоставление их с фронтальной динамикой позволило оценить их связь.

Всего в Баренцевом море было зарегистрировано около трех тысяч малых вихревых структур, которые чаще всего встречались северо-западнее ЗФИ, возле восточного берега о. Западный Шпицберген, в юго-западной части моря (в районе поступления атлантических вод), в центральной части пролива между ЗФИ и Новой Землей, в районе п-ва Канин Нос с максимальной концентрацией северо-восточнее п-ва Рыбачьего. Пик вихревой активности как за сезон, так и за каждый год отмечался в июле, когда в целом регистрирова-

лось более четверти вихревых структур, при этом преобладали вихри размером от 2 до 4 км с циклоническим типом закрутки. Средние параметры вихрей от года к году и в течение теплого сезона в целом сохранялись.

В оба года на акватории Баренцева моря по результатам обработки декадных и среднемесячных значений температуры поверхности моря и ее градиентов было выделено положение Прикромочного и Полярного фронтов, а также оценены средние значения ширины для каждой фронтальной зоны выделенных фронтов. При средней ширине обоих фронтальных зон около 100 км максимальная ширина Прикромочной фронтальной зоны достигала почти 140 км, а Полярной – почти 200 км. Также выявлено, что Прикромочный фронт за теплый период может смещаться на расстояние свыше 450 км с июня по конец августа – начало сентября, а Полярный фронт квазистационарен в западной части моря и динамичен в его восточной части. При этом синоптическую изменчивость лучше всего отражали декадные данные.

Сопоставление положения вихрей с областями изменчивости декадных положений фронтов на примере 2007 г. показало, что вихри часто регистрируются вблизи и внутри этих областей (четверть вихрей за весь сезон), при этом период наибольшей вихревой активности совпал с периодом наибольшей динамики декадных фронтов (июль).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 1: Баренцево море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Ф. С. Терзиева. Л. : Гидрометеоиздат, 1990. 280 с.
2. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость / В. К. Ожигин [и др.]. Мурманск : ПИНРО, 2016. 259 с.
3. *Oziel L., Sirven J., Gascard J.-C.* The Barents Sea frontal zones and water masses variability (1980–2011) // *Ocean Sci.* 2016. Vol. 12, iss. 1. P. 169–184. <https://doi.org/10.5194/os-12-169-2016>
4. *Fer I., Drinkwater K.* Mixing in the Barents Sea Polar Front near Hopen in spring // *J. Mar. Syst.* 2014. Vol. 130. P. 206–218. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2012.01.005>
5. Опыт автоматизированного картографирования гидрологических фронтов : (на примере Баренцева моря) / В. П. Быстров [и др.]. // М. : ИКИ, 1988. (Препринт/ИКИ РАН; 1432).
6. *Лебедев И. А.* О влиянии глубинных атлантических вод на ледово-гидрологические процессы в северной части Баренцева моря // Исследования климатической изменчивости в Северной полярной области и Норвежской энергоактивной зоне океана : сб. науч. тр. / под ред. Г. В. Алексеева, А. П. Макштаса. СПб. : Гидрометеоиздат, 1992. С. 145–156 (Труды ААНИИ; т. 430).
7. *Родионов В. Б., Костяной А. Г.* Океанические фронты морей Северо-Европейского бассейна. М. : ГЕОС, 1998. 290 с.
8. Bivalve growth rate and isotopic variability across the Barents Sea Polar Front / M. L. Carroll [et al.] // *J. Mar. Syst.* 2014. V. 130. P. 167–180. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.10.006>
9. Полярная фронтальная зона Западного желоба Баренцева моря по данным контактных наблюдений 2007 года / А. Н. Морозов [и др.] // *Морской гидрофизический журнал.* 2017. № 2. С. 39–53. doi:10.22449/0233-7584-2017-2-39-53
10. *Johannessen O. M., Foster L. A.* A note on the topographically controlled Oceanic Polar Front in the Barents Sea // *J. Geophys. Res.* 1978. Vol. 83, iss. C9. P. 4567–4571. <https://doi.org/10.1029/JC083iC09p04567>

11. “Flashes” of Chlorophyll-a Concentration Derived from in Situ and Remote Sensing Data at the Polar Front in the Barents Sea / V. Kushnir [et al.] // *The Open Oceanogr. J.* 2011. Vol. 5. P. 14–21. doi:10.2174/1874252101105010014
12. *Лебедев И. А.* Некоторые результаты статистического анализа синоптической и мезомасштабной изменчивости температуры воды в Баренцевом море // Исследования климатической изменчивости в Северной полярной области и Норвежской энергоактивной зоне океана : сб. науч. тр. / под ред. Г. В. Алексеева, А. П. Макштаса. СПб. : Гидрометеоиздат, 1992. С. 169–181 (Труды ААНИИ; т. 430).
13. О вихреобразовании в полярной фронтальной зоне Баренцева моря / А. Г. Костяной [и др.] // Гидрометеорологические исследования морей Северо-Европейского бассейна / под ред. С. Л. Дженюка, Г. Г. Зыковой. СПб. : Гидрометеоиздат, 1992. С. 19–32. (Труды ААНИИ; т. 426).
14. Наблюдение малых вихрей в Белом, Баренцевом и Карском морях по данным спутниковых радиолокационных измерений / О. А. Атаджанова [и др.] // *Морской гидрофизический журнал.* 2017. № 2. С. 80–90. doi:10.22449/0233-7584-2017-2-80-90
15. *Михайлова Н. В., Юровский А. В.* Анализ главных компонент полей концентрации морского льда в Баренцевом море // *Морской гидрофизический журнал.* 2017. № 2. С. 12–20. doi:10.22449/0233-7584-2017-2-12-20
16. *Митягина М. И., Лаврова О. Ю.* Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // *Исследование Земли из космоса.* 2009. № 5. С. 72–79.
17. Субмезомасштабные вихри в Белом море по данным спутниковых радиолокационных измерений / А. В. Зимин [и др.] // *Исследование Земли из космоса.* 2016. № 1–2. С. 129–135. <https://doi.org/10.7868/S020596141506010X>
18. *Karimova S. S.* Spiral eddies in the Baltic, Black and Caspian seas as seen by satellite radar data // *Adv. Space Res.* 2012. Vol. 50, iss. 8. P. 1107–1124. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.10.027>
19. *Timmermans M. L., Winsor P.* Scales of horizontal density structure in the Chukchi Sea surface layer // *Cont. Shelf Res.* 2013. Vol. 52. P. 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.10.015>
20. *D'Asaro E. A.* Generation of submesoscale vortices: A new mechanism // *J. Geophys. Res.* 1988. Vol. 93, iss. C 6. P. 6685–6693. <https://doi.org/10.1029/JC093iC06p06685>

Об авторах:

Атаджанова Оксана Алишеровна, младший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Россия, 117997, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36); Российский государственный гидрометеорологический университет (Россия, 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98), Scopus Author ID: 57188718743, oksana.atazhanova@gmail.com

Зимин Алексей Вадимович, главный научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Россия, 117997, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), доктор географических наук, доцент, Scopus Author ID: 55032301400, ResearcherID: C-5885-2014, ORCID ID: 0000-0003-1662-6385, zimin2@mail.ru

Свергун Егор Игоревич, инженер, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Россия, 117997, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36); Российский государственный гидрометеорологический университет (Россия, 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98), e-mail: svergun@ocean.rshu.ru

Коник Александр Александрович, инженер, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Россия, 117997, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36); Российский государственный гидрометеорологический университет (Россия, 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98), e-mail: konikrshu@gmail.com