# Характеристики вихрей в Чукотском море и море Бофорта по данным спутниковых радиолокационных наблюдений

А. В. Артамонова<sup>1</sup>, И. Е. Козлов<sup>1</sup>, А. В. Зимин<sup>2</sup>

В работе представлены результаты анализа основных характеристик океанских вихрей в морях Чукотском и Бофорта, полученные на основе выделения их поверхностных проявлений (ПП) в спутниковых радиолокационных изображениях Envisat ASAR за летне-осенний период 2007 и 2011 гг. В ходе анализа определялись районы наблюдения вихрей, их диаметр, знак вращения, тип проявления и глубина места, соответствующая положению центра вихря. Полученные результаты обобщены для вихрей, наблюдаемых на участках открытой воды (ОВ), а также для вихрей в прикромочной зоне льда (ПЗЛ). Всего в ходе анализа выделено 2724 ПП вихревых структур, из которых 52 % — для вихрей открытой воды, 48 % — для вихрей ПЗЛ. Показано, что 64 % от общего числа вихрей являются циклоническими, причём это соотношение примерно одинаково как для вихрей ОВ, так и для вихрей ПЗЛ. Диапазон наблюдаемых диаметров вихрей составил от 1 до 50 км, но около 80 % всех вихрей имели диаметры менее 10 км. Поскольку радиус деформации Россби для района исследований в летнее время составляет 1—15 км, значительная часть наблюдаемых вихрей может относиться к субмезомасштабу.

**Ключевые слова:** океанские вихри, субмезомасштабные вихри, синоптические вихри, спутниковые радиолокационные изображения, круговорот Бофорта, море Бофорта, Чукотское море, Арктика

Одобрена к печати: 03.12.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-203-210

#### Введение

В условиях меняющегося климата Арктики особое внимание уделяется исследованию механизмов перемешивания и переноса тепла в верхнем слое Северного Ледовитого океана (СЛО). Результаты экспериментальных исследований показывают важную роль мезо- и субмезомасштабных вихрей в этих процессах (Fine et al., 2018; Mensa et al., 2018; Von Appen et al., 2018). Особый интерес представляет район антициклонического круговорота Бофорта (англ. Веаufort Gyre), расположенный в амеразийском секторе Арктики, в котором наблюдается максимальная для акватории СЛО толщина слоя пресной воды — до 22—25 м (Proshutinsky et al., 2009). В ряде работ отмечалось, что большой запас доступной потенциальной энергии, обусловленный характерным наклоном изопикн в этом районе, является одной из причин высокой встречаемости вихрей в контактных измерениях (Timmermans et al., 2008; Zhao et al., 2014). До настоящего времени анализ вихревой активности в этом районе был основан пре-имущественно на результатах немногочисленных контактных измерений (например, работы (Меnsa et al., 2018; Timmermans et al., 2008; Zhao et al., 2014, 2016)) и модельных расчётов (например, исследование (Spall et al., 2008)).

Обширное очищение арктического региона ото льда в летне-осенний и зимний периоды за последнюю декаду позволяет в настоящее время активно использовать методы спутниковой океанографии для изучения динамики поверхностного слоя СЛО. Здесь особую роль играют измерения спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), обладающие высоким пространственным разрешением и независящие от условий облачности и освещённости. На основе таких измерений были широко исследованы динамические процессы различных масштабов во внутренних морях России (Karimova, 2012; Kozlov et al., 2012; Lavrova, Mityagina, 2017; Mityagina et al., 2010), а также в отдельных морях евразийского сектора

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия E-mails: artamonowa.anastasya2011@yandex.ru, igor.eko@gmail.com
<sup>2</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия

Арктики (Atadzhanova et al., 2017; Kozlov et al., 2015, 2017; Morozov et al., 2017; Zimin et al., 2016). Для амеразийского сектора Арктики подобных работ до настоящего времени не выполнялось, за исключением исследования (Mensa et al., 2018), где были представлены отдельные примеры наблюдения вихревых структур на изображениях спутниковых РСА в контексте анализа измерений комплексного дрифтерного эксперимента.

Целью настоящей работы является заполнение пробела в области исследования вихревой динамики в морях амеразийского сектора Арктики на основе анализа спутниковых радиоло-кационных измерений за летне-осенние периоды 2007 и 2011 гг.

#### Данные и методы

Для анализа вихревой динамики на акватории морей Чукотского и Бофорта в данной работе использовались изображения спутникового радиолокатора Envisat Advanced SAR (ASAR) за июнь—октябрь 2007 и 2011 гг. За оба года измерений было проанализировано 372 радиолокационных изображения (РЛИ), из которых 147 РЛИ приходятся на 2007 г., а 225 — на 2011 г. (mаблица). Анализируемые данные Envisat ASAR были получены в режиме съёмки Wide Swath mode с шириной полосы обзора  $400 \times 400$  км и пространственным разрешением  $150 \times 150$  м.

На основе анализа поверхностных проявлений вихревых структур (ППВ) в РСА-изображениях определялись районы генерации вихрей, их диаметр, знак вращения, тип проявления и глубина места, соответствующая центру вихря. Определение характеристик вихревых структур проводилось на основе методики, описанной в работе (Kozlov et al., 2019). В ходе анализа выделялись вихри, наблюдаемые как на участках открытой воды, так и в прикромочной зоне льда (ПЗЛ).

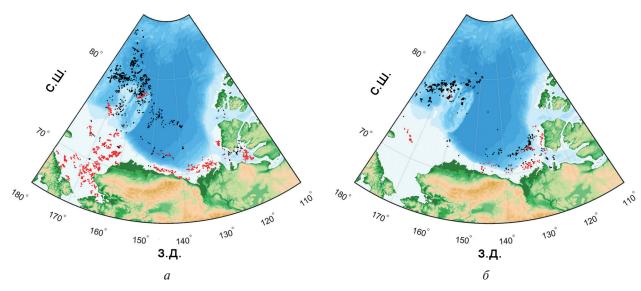
### Результаты наблюдений

В *таблице* приведены результаты анализа РСА-данных за летние периоды 2007 и 2011 гг. В общей сложности выявлено 2724 ППВ, из которых 1945 — в 2007 г., 779 — в 2011 г. Из общего числа 1429 ППВ были зарегистрированы в районах открытой воды, 1295 — в прикромочной зоне льда. Как видно из *таблицы*, наибольшее количество зарегистрированных вихрей приходится на август и сентябрь (74%). При этом в 2007 г. максимум наблюдений ППВ наблюдается в августе, а в 2011 г. — в сентябре. Среди всех выделенных ППВ доминировали вихри циклонического типа вращения (64%). Похожие результаты были получены для акваторий Белого, Баренцева и Карского морей (Зимин и др., 2016; Atadzhanova et al., 2017).

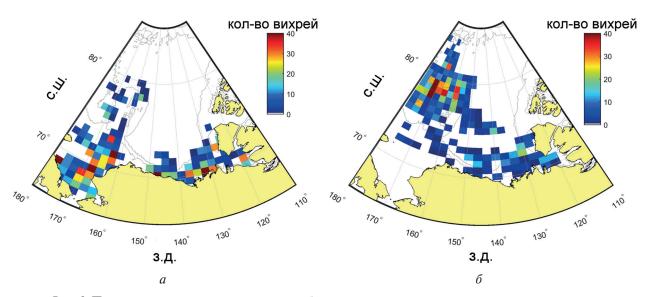
Результаты выделения поверхностных проявлений вихрей в спутниковых РЛИ амеразийского сектора Арктики в июне — октябре 2007 и 2011 гг.

	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Всего
	2007 г.					
Количество РЛИ (включающих вихри)	11(1)	23(17)	57(23)	38(20)	18(6)	
Количество идентифицированных вихрей	18	405	1052	304	166	1945
	2011 г.					
Количество РЛИ (включающих вихри)	83(1)	59(13)	32(7)	34(17)	17(4)	
Количество идентифицированных вихрей	4	49	63	567	96	779
	Общее количество для двух лет					
Количество РЛИ (включающих вихри)	94(2)	82(30)	89(30)	72(37)	35(10)	372(109)
Количество идентифицированных вихрей	27	431	1132	888	237	2724

На рис. 1 представлено пространственное распределение вихрей за 2007 и 2011 гг. (см. рис. 1а и б соответственно). Как видно, вихри открытой воды (обозначены красным цветом) в основном расположены на шельфе и вблизи континентального склона обоих морей. Значительное число вихрей также наблюдается в шельфовой области залива Маккензи, западнее о. Бэнкс, а также в восточной части залива Амундсена. Вихри ПЗЛ (обозначены чёрным цветом) встречаются преимущественно в глубоководных районах, что объясняется местоположением кромки льда в исследуемый период. Большинство вихрей ПЗЛ зарегистрированы над Чукотским плато и севернее него, а также в юго-восточной части моря Бофорта.



*Рис. 1.* Местоположение в районе исследований вихревых структур, выделенных на основе анализа спутниковых данных Envisat ASAR за июнь—октябрь 2007 г. (а) и 2011 г. (б). Красными точками отмечены вихри открытой воды, чёрными — вихри ПЗЛ



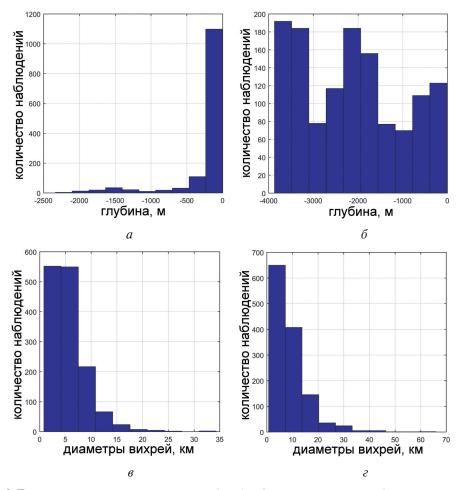
*Рис. 2.* Пространственное распределение общего количества вихрей в районе исследований на сетке размером  $20\times25$  для вихрей открытой воды (*a*) и вихрей ПЗЛ (*б*)

На *puc.* 2 представлено пространственное распределение общего числа вихрей, определённых в узлах сетки размером  $20 \times 25$  для вихрей открытой воды (см. *puc.* 2a) и вихрей ПЗЛ (см. *puc.* 26) за два года наблюдений. Как видно, наибольшее количество вихрей открытой воды (до 30-40 штук на квадрат сетки) зарегистрировано в восточной части Чукотского

шельфа по пути следования тихоокеанских вод в арктический бассейн (Spall et al., 2018). Большое число ППВ также наблюдается вдоль мелководного шельфа южной части моря Бофорта, особенно вблизи дельты р. Маккензи (см. *puc. 2a*).

Иная картина наблюдается для распределения числа вихрей ПЗЛ (см. puc. 26). Здесь большинство вихрей зарегистрировано над Чукотским плато, в особенности в его западной части: до 40-50 вихрей на квадрат сетки. В южной и центральной частях моря Бофорта количество вихрей не превышает 10-15 штук на квадрат сетки.

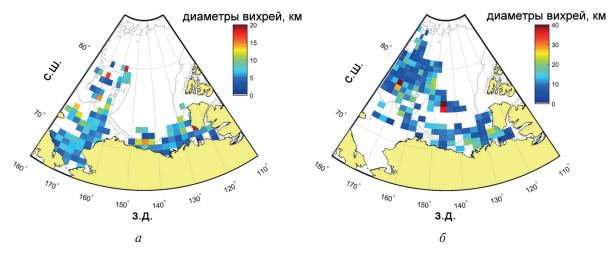
На puc. 3a и  $\delta$  представлены гистограммы распределения глубин, над которыми регистрировались вихревые структуры. Диапазон глубин для вихрей открытой воды составляет от 20 до 2500 м, однако около 80 % вихрей регистрировались над глубинами менее 200 м (см. puc. 3a). Вихри ПЗЛ наблюдались в более широком диапазоне глубин: от 20 до 3780 м (см.  $puc. 3\delta$ ). Гистограмма распределения имеет три выраженных пика над глубинами 100-500 м, 1800-2200 и 3100-3800 м. Основная часть вихрей ПЗЛ (около 80 %) была зарегистрирована над глубинами свыше 1000 м.



*Рис. 3.* Гистограммы распределения глубин  $(a, \delta)$ , над которыми наблюдались вихри, и их диаметров  $(\beta, \epsilon)$  для вихрей открытой воды  $(a, \beta)$  и ПЗЛ  $(\delta, \epsilon)$ 

На *рис.* Зв и г даны гистограммы распределения диаметров вихрей. Диапазон диаметров вихрей открытой воды составил от 1 до 34 км. При этом значения диаметров около 90 % вихрей (1294 вихря) не превышают 10 км со средним (медианным) значением 5,8 км (4,9 км). Диапазон диаметров вихрей ПЗЛ несколько шире и составил от 1 до 78 км со средним (медианным) значением 9,2 км (7,2 км).

Пространственное распределение диаметров вихрей, определённых в виде средних значений диаметра на квадрат сетки, представлено на *рис.* 4 (см. с. 207).



*Puc. 4.* Пространственное распределение средних диаметров вихрей на квадрат сетки размером  $20 \times 25$  для вихрей открытой воды (*a*) и ПЗЛ (*б*)

Как видно на *рис.* 4а, вихри открытой воды с максимальным средним значением диаметра до 18–20 км наблюдаются в северной части Чукотского плато и севернее него, а также вблизи южной оконечности о. Бэнкс. Крупные вихри с диаметром 10–15 км также отмечаются в северо-западной части Чукотского моря и над континентальным склоном центральной части моря Бофорта. В шельфовых областях Чукотского моря среднее значение диаметра составляет 3–12 км.

Как уже отмечалось выше, диапазон значений диаметров вихрей ПЗЛ почти в два раза шире вихрей открытой воды. Максимальные средние значения диаметра вихрей ПЗЛ (35—40 км) регистрируются в центральной глубоководной части моря Бофорта, а также на западном склоне Чукотского плато. В целом в районе исследований преобладают вихри ПЗЛ со средним значением диаметра 5—15 км. При этом стоит отметить, что более крупные вихри наблюдаются на мелководном шельфе моря Бофорта по сравнению с глубоководной областью Северного Ледовитого океана к северу от Чукотского плато.

#### Дискуссия и заключение

На сегодняшний день наиболее исчерпывающая статистика о характеристиках вихрей в Арктике по данным контактных измерений собрана для акватории моря Бофорта (Timmermans et al., 2008; Zhao et al., 2014, 2016). Она насчитывает 243 вихря, выделенных за период с 2005 по 2015 г. на основе анализа измерений вмонтированных в лёд профилографов и заякоренных буйковых станций. Анализ прямых измерений показал, что большинство обнаруженных вихрей имеют холодное ядро, антициклонический знак вращения, различную глубину залегания, орбитальные скорости вращения в диапазоне 0,05–0,4 м/с, а их размеры сравнимы с радиусом деформации Россби в этом районе.

Анализ спутниковых данных за летние сезоны 2007 и 2011 гг. — периоды относительно невысокой вихревой активности, согласно (Zhao et al., 2016), — позволил выделить более 2000 поверхностных проявлений вихрей аналогичных размеров, т.е. примерно на два порядка большее количество вихрей по сравнению с результатами контактных измерений. Кроме того, данные спутниковых наблюдений показали преобладание циклонов над антициклонами, что также отличается от результатов натурных наблюдений. С другой стороны, результаты спутниковых РСА-наблюдений, приведённые выше, дают описание лишь пространственных параметров вихрей, но не содержат важной информации об их вертикальной структуре и динамических характеристиках.

Вихри открытой воды наблюдаются преимущественно на шельфе, где их происхождение обычно вызвано неоднородным ветровым воздействием на приповерхностный слой моря,

сдвиговой неустойчивостью поверхностных вдольбереговых течений, формируемых за счёт притока тихоокеанских вод через Берингов пролив, динамикой локальных фронтальных зон над неоднородной топографией и т.д. (Manucharyan, Spall, 2016; Spall et al., 2008; Zatsepin et al., 2019).

Вихри прикромочной зоны имеют весьма обширное распределение по широте от 70 до 84° с. ш. и, как правило, наблюдаются над глубокой водой. Ключевым механизмом их генерации является неустойчивость течений, формируемых вдоль кромки льда из-за высоких горизонтальных градиентов плотности при таянии льда, а также ветровой апвеллинг/даунвеллинг (Manucharyan, Thompson, 2017).

Диапазон наблюдаемых диаметров вихрей составил от 1 до 50 км, однако около 80 % всех вихрей имели диаметры менее 8–10 км. Климатические значения радиуса деформации Россби за летний период меняются от 1 км для мелководного шельфа Чукотского моря до 15 км в глубоководной части моря Бофорта (Nurser, Bacon, 2014). Таким образом, можно предположить, что значительная часть наблюдаемых нами вихрей открытой воды и ПЗЛ относится к субмезомасштабу. Данный вывод хорошо согласуется с результатами недавнего комплексного океанографического эксперимента в море Бофорта, выявившего интенсивную субмезомасштабную вихревую динамику в этом районе (Mensa et al., 2018).

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-35-20078, а также в рамках государственного задания Министерства науки и образования России по теме № 0555-2019-0001.

#### Литература

- 1. *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.
- 2. *Atadzhanova O. A.*, *Zimin A. V.*, *Romanenkov D. A.*, *Kozlov I. E.* Satellite radar observations of small eddies in the White, Barents and Kara Seas // Physical Oceanography. 2017. V. 2. P. 75–83.
- 3. Fine E. C., MacKinnon J. A., Alford M. H., Mickett J. B. Microstructure observations of turbulent heat fluxes in a warm-core Canada Basin eddy // J. Physical Oceanography. 2018. V. 48. P. 2397–2418.
- 4. *Karimova S. S.* Spiral eddies in the Baltic, Black and Caspian seas as seen by satellite radar data // Advances in Space Research. 2012. V. 50(8). P. 1107–1124.
- 5. *Kozlov I. E., Kudryavtsev V. N., Johannessen J. A., Chapron B., Dailidiene I., Myasoedov A. G.* ASAR imaging for coastal upwelling in the Baltic Sea // Advances Space Research. 2012. V. 50. P. 1125–1137.
- 6. Kozlov I., Kudryavtsev V., Zubkova E., Atadzhanova O., Zimin A., Romanenkov D., Myasoedov A., Chapron B. SAR observations of internal waves in the Russian Arctic seas // IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). Milan, 2015. P. 947–949.
- 7. *Kozlov I. E.*, *Zubkova E. V.*, *Kudryavtsev V. N.* Internal solitary waves in the Laptev Sea: first results of spaceborne SAR observations // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2017. V. 14(11). P. 2047–2051.
- 8. *Kozlov I. E.*, *Artamonova A. V.*, *Manucharyan G. E.*, *Kubryakov A. A.* Eddies in the Western Arctic Ocean from spaceborne SAR observations over open ocean and marginal ice zones // J. Geophysical Research: Oceans. 2019. V. 124(9). P. 660–6616.
- 9. *Lavrova O.*, *Mityagina M.* Satellite Survey of Internal Waves in the Black and Caspian Seas // Remote Sensing. 2017. V. 9. P. 892.
- 10. *Manucharyan G. E.*, *Spall M. A.* Wind-driven freshwater buildup and release in the Beaufort Gyre constrained by mesoscale eddies // Geophysical Research Letters. 2016. V. 43. P. 273–282.
- 11. *Manucharyan G. E.*, *Thompson A. F.* Submesoscale sea ice-ocean interactions in marginal ice zones // J. Geophysical Research: Oceans. 2017. V. 122. P. 9455–9475.
- 12. *Mensa J. A.*, *Timmermans M.-L.*, *Kozlov I. E.*, *Williams W. J.*, *Özgökmen T.* Surface drifter observations from the Arctic Ocean's Beaufort Sea: Evidence for submesoscale dynamics // J. Geophysical Research: Oceans. 2018. V. 122(12). P. 9455–9475.
- 13. *Mityagina M. I.*, *Lavrova O. Y.*, *Karimova S. S.* Multi-sensor survey of seasonal variability in coastal eddy and internal wave signatures in the north-eastern Black Sea // Intern. J. Remote Sensing. 2010. V. 31(17–18). P. 4779–4790.
- 14. *Morozov E. G.*, *Kozlov I. E.*, *Shchuka S. A.*, *Frey D. I.* Internal tide in the Kara Gates Strait // Oceanology. 2017. V. 57. No. 1. P. 8–18.

- 15. Nurser A. J. G., Bacon S. The Rossby radius in the Arctic Ocean // Ocean Science. 2014. V. 10. P. 967–975.
- 16. Proshutinsky A., Krishfield R., Timmermans M.-L., Toole J., Carmack E., McLaughlin F., Williams W.J., Zimmermann S., Itoh M., Shimada K. Beaufort Gyre freshwater reservoir: State and variability from observations // J. Geophysical Research. 2009. V. 114 (C00A10).
- 17. *Spall M.*, *Pickart R.*, *Fratantoni P.*, *Plueddemann A.* Western Arctic shelfbreak eddies: Formation and transport // J. Physical Oceanography. 2008. V. 38(8). P. 1644–1668.
- 18. *Timmermans M.-L.*, *Toole J.*, *Proshutinsky A.*, *Krishfield R.*, *Plueddemann A.* Eddies in the Canada basin observed from ice-tethered profilers // J. Physical Oceanography. 2008. V. 38(1). P. 133–145.
- 19. Von Appen W.-J., Wekerle C., Hehemann L., Schourup-Kristensen V., Konrad C., Iversen M. H. Observations of a submesoscale cyclonic filament in the marginal ice zone // Geophysical Research Letters. 2018. V. 45(12). P. 6141–6149.
- 20. Zatsepin A., Kubryakov A., Aleskerova A., Elkin D., Kukleva O. Physical mechanisms of submesoscale eddies generation: evidences from laboratory modeling and satellite data in the Black Sea // Ocean Dynamics. 2019. V. 69. No. 2. P. 253–266.
- 21. *Zhao M.*, *Timmermans M.-L.*, *Cole S.*, *Krishfield R.*, *Proshutinsky A.*, *Toole J.* Characterizing the eddy field in the Arctic Ocean halocline // J. Geophysical Research Oceans. 2014. V. 119(12). P. 8800–8817.
- 22. *Zhao M.*, *Timmermans M.-L.*, *Cole S.*, *Krishfield R.*, *Toole J.* Evolution of the eddy field in the Arctic Ocean's Canada Basin, 2005–2015 // Geophysical Research Letters. 2016. V 43(15). P. 8106–8114.
- 23. Zimin A. V., Kozlov I. E., Atadzhanova O. A., Chapron B. Monitoring short-period internal waves in the White Sea // Izvestiva, Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. V. 52(9). P. 951–960.

## Characteristics of ocean eddies in the Beaufort and Chukchi Seas from spaceborne radar observations

A. V. Artamonova<sup>1</sup>, I. E. Kozlov<sup>1</sup>, A. V. Zimin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia E-mails: artamonowa.anastasya2011@yandex.ru, igor.eko@gmail.com <sup>2</sup> Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia

In this work we present the results of ocean eddies observations in the Chukchi and Beaufort Sea based on identification of eddy signatures in spaceborne synthetic aperture radar (SAR) images acquired in summer-autumn period of 2007 and 2011. Locations of eddy centers, their diameters, vorticity signs, manifestation types and water depths corresponding to eddy centers were determined. The results were obtained separately for eddies observed over ice-free regions and in the marginal ice zone (MIZ). In total, 2724 eddy signatures were identified in satellite SAR images with 52 % of those found in the ice-free regions and 48 % in the MIZ. It is shown that about 64 % of all eddies are cyclonic, which is true both for the open water and MIZ eddies. Eddies range in diameter from 1 to 50 km, while 80 % of them have diameter less than 10 km. Since the values of the Rossby radius range within 1–15 km over the study site in summer, most of the observed eddies can be classified as submesoscale.

**Keywords:** ocean eddies, submesoscale eddies, synoptic eddies, satellite radar images, Beaufort gyre, Beaufort Sea, Chukchi Sea, Arctic Ocean

Accepted: 03.12.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-203-210

#### References

- 1. Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Romanenkov D.A., Kozlov I.E., Chapron B., Submezomasshtabnye vikhri v Belom more po dannym sputnikovykh radiolokatsionnykh izmerenii (Submesoscale eddies in the White Sea according to satellite radar measurements), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 1–2, pp. 129–135.
- 2. Atadzhanova O. A., Zimin A. V., Romanenkov D. A., Kozlov I. E., Satellite radar observations of small eddies in the White, Barents and Kara Sea, *Physical Oceanography*, 2017, Vol. 2, pp. 75–83.

- 3. Fine E. C., MacKinnon J. A., Alford M. H., Mickett J. B., Microstructure observations of turbulent heat fluxes in a warm-core Canada Basin eddy, *J. Physical Oceanography*, 2018, Vol. 48, pp. 2397–2418.
- 4. Karimova S. S., Spiral eddies in the Baltic, Black and Caspian seas as seen by satellite radar data, *Advances in Space Research*, 2012, Vol. 50(8), pp. 1107–1124.
- 5. Kozlov I. E., Kudryavtsev V. N., Johannessen J. A., Chapron B., Dailidiene I., Myasoedov A. G., ASAR imaging for coastal upwelling in the Baltic Sea, *Advances in Space Research*, 2012, Vol. 50, pp. 1125–1137.
- 6. Kozlov I., Kudryavtsev V., Zubkova E., Atadzhanova O., Zimin A., Romanenkov D., Myasoedov A., Chapron B., SAR observations of internal waves in the Russian Arctic seas, *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.* (*IGARSS'15*), Milan, 2015, pp. 947–949.
- 7. Kozlov I. E., Zubkova E. V., Kudryavtsev V. N., Internal solitary waves in the Laptev Sea: first results of spaceborne SAR observations, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, Vol. 14(11), pp. 2047–2051.
- 8. Kozlov I. E., Artamonova A. V., Manucharyan G. E., Kubryakov A. A., Eddies in the Western Arctic Ocean from spaceborne SAR observations over open ocean and marginal ice zones, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2019, Vol. 124(9), pp. 6601–6616.
- 9. Lavrova O., Mityagina M., Satellite Survey of Internal Waves in the Black and Caspian Seas, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, p. 892.
- 10. Manucharyan G. E., Spall M.A., Wind-driven freshwater buildup and release in the Beaufort Gyre constrained by mesoscale eddies, *Geophysical Research Letters*, 2016, Vol. 43, pp. 273–282.
- 11. Manucharyan G. E., Thompson A. F., Submesoscale sea ice-ocean interactions in marginal ice zones, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2017, Vol. 122, pp. 9455–9475.
- 12. Mensa J.A., Timmermans M.-L., Kozlov I.E., Williams W.J., Özgökmen T., Surface drifter observations from the Arctic Ocean's Beaufort Sea: Evidence for submesoscale dynamics, *J. Geophysical Research*: Oceans, 2018, Vol. 122(12), pp. 9455–9475.
- 13. Mityagina M. I., Lavrova O. Y., Karimova S. S., Multi-sensor survey of seasonal variability in coastal eddy and internal wave signatures in the north-eastern Black Sea, *Intern. J. Remote Sensing*, 2010, Vol. 31(17–18), pp. 4779–4790.
- 14. Morozov E.G., Kozlov I.E., Shchuka S.A., Frey D.I., Internal tide in the Kara Gates Strait, *Oceanology*, 2017, Vol. 57, No. 1, pp. 8–18.
- 15. Nurser A.J.G., Bacon S., The Rossby radius in the Arctic Ocean, *Ocean Science*, 2014, Vol. 10, pp. 967–975.
- 16. Proshutinsky A., Krishfield R., Timmermans M.-L., Toole J., Carmack E., McLaughlin F., Williams W.J., Zimmermann S., Itoh M., Shimada K., Beaufort Gyre freshwater reservoir: State and variability from observations, *J. Geophysical Research*, 2009, Vol. 114 (C00A10).
- 17. Spall M., Pickart R., Fratantoni P., Plueddemann A., Western Arctic shelfbreak eddies: Formation and transport, *J. Physical Oceanography*, 2008, Vol. 38(8), pp. 1644–1668.
- 18. Timmermans M.-L., Toole J., Proshutinsky A., Krishfield R., Plueddemann A., Eddies in the Canada basin observed from ice-tethered profilers, *J. Physical Oceanography*, 2008, Vol. 38(1), pp. 133–145.
- 19. Von Appen W.-J., Wekerle C., Hehemann L., Schourup-Kristensen V., Konrad C., Iversen M. H., Observations of a submesoscale cyclonic filament in the marginal ice zone, *Geophysical Research Letters*, 2018, Vol. 45(12), pp. 6141–6149.
- 20. Zatsepin A., Kubryakov A., Aleskerova A., Elkin D., Kukleva O., Physical mechanisms of submesoscale eddies generation: evidences from laboratory modeling and satellite data in the Black Sea, *Ocean Dynamics*, 2019, Vol. 69, No. 2, pp. 253–266.
- 21. Zhao M., Timmermans M.-L., Cole S., Krishfield R., Proshutinsky A., Toole J., Characterizing the eddy field in the Arctic Ocean halocline, *J. Geophysical Research Oceans*, 2014, Vol. 119(12), pp. 8800–8817.
- 22. Zhao M., Timmermans M.-L., Cole S., Krishfield R., Toole J., Evolution of the eddy field in the Arctic Ocean's Canada Basin, 2005–2015, *Geophysical Research Letters*, 2016, Vol. 43(15), pp. 8106–8114.
- 23. Zimin A. V., Kozlov I. E., Atadzhanova O. A., Chapron B., Monitoring short-period internal waves in the White Sea, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52(9), pp. 951–960.