

Малые вихри в Онежском заливе Белого моря и их влияние на распределение хлорофилла

О.А. Атаджанова^{1,2}, А.В. Зимин^{1,2}

¹Санкт-Петербургский филиал института океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Санкт-Петербург, 199053, Россия

E-mail: oksana.atadzhanova@gmail.com

²Российский государственный гидрометеорологический университет

Санкт-Петербург, 195196, Россия

На основе обобщения разнородных экспериментальных данных приводятся сведения о распространённости малых (субмезомасштабных) вихревых структур в Онежском заливе Белого моря и оценивается их влияние на распределение хлорофилла. Данные включают результаты обработки спутниковых радиолокационных изображений (2009–2012 гг.) и снимков в оптическом диапазоне (2010 г., 2015 г.), а также контактных измерений на локальных океанографических полигонах за 2006–2015 гг. Подспутниковый эксперимент 2015 года состоял в сопоставлении близких по времени данных спутниковых оптических сенсоров и контактных измерений. По всем данным чаще регистрировались вихревые структуры размерами около 2 км, что близко к климатическим оценкам внутреннего радиуса деформации для Онежского залива. Субмезомасштабные образования проявлялись в приповерхностном слое толщиной около 15 м в течение 3–4 часов. Районы повышенной встречаемости вихрей по радиолокационным изображениям характеризовались аномалиями в поле распределения хлорофилла и наличием пятен холодных или теплых вод. Установлено, что вихри крупного размера (более 8 км) почти всегда одновременно проявляются в различных спутниковых данных. Для более мелких вихрей (менее 2 км) этот вывод был несправедлив, что подтвердилось результатами подспутникового эксперимента, включающего измерения хлорофилла.

Ключевые слова: субмезомасштабные вихри, спутниковые и контактные наблюдения, концентрация хлорофилла, Белое море

Одобрена к печати: 07.07.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-110-118

Введение

Белое море обладает самой малой и сильно расчленённой акваторией по сравнению с другими морями Северного Ледовитого океана (врезка *рис. 1*), ее разделяют на семь районов: Воронка, Горло, Бассейн, Мезенский, Двинский, Кандалакшский и Онежский заливы. Они различаются по глубине, площади и особенностям гидрологической структуры вод. Самый южный из них – Онежский залив (*рис. 1*). Он располагается к югу и юго-востоку от островов Соловецкого архипелага и проливов Восточная и Западная Соловецкие салмы. Дно залива крайне неровное, берега шхерные, много небольших островов. В вершину залива впадает относительно крупная река – Онега.

Особенности гидрологических условий в Онежском заливе определяются присутствием вод разной стратификации, разделенных фронтами различного генезиса (Филатов, Тержевик, 2007). Интенсивное приливное воздействие в сочетании с переменным речным стоком приводит к значительной динамике фронтов, которая может приводить к интенсификации вихреобразования на меньших масштабах, что проявляется как в данных судовых, так и спутниковых наблюдений (Романенков и др., 2016). Другим постоянно действующим фактором образования вихрей диаметром порядка единиц километров в заливе является обтекание приливными течениями топографических неоднородностей дна (Зимин и др., 2016).

Исследования фитопланктона Белого моря показали, что к водам с разными типами термохалинных характеристик приурочены различающиеся по структуре сообщества планктонных водорослей (Ильяш и др., 2015), а динамика их численности зависит от гидродинамических условий (Кравчишина и др., 2013). Но ограниченные в пространстве и времени судовые наблюдения не всегда дают корректные представления о масштабах variability фитопланктона. Более удачным представляется подход, основанный на оценке концентрации хлорофилла (как показателя биомассы фитопланктона) по данным спутниковых сканеров цвета (Лисицын и др., 2013).

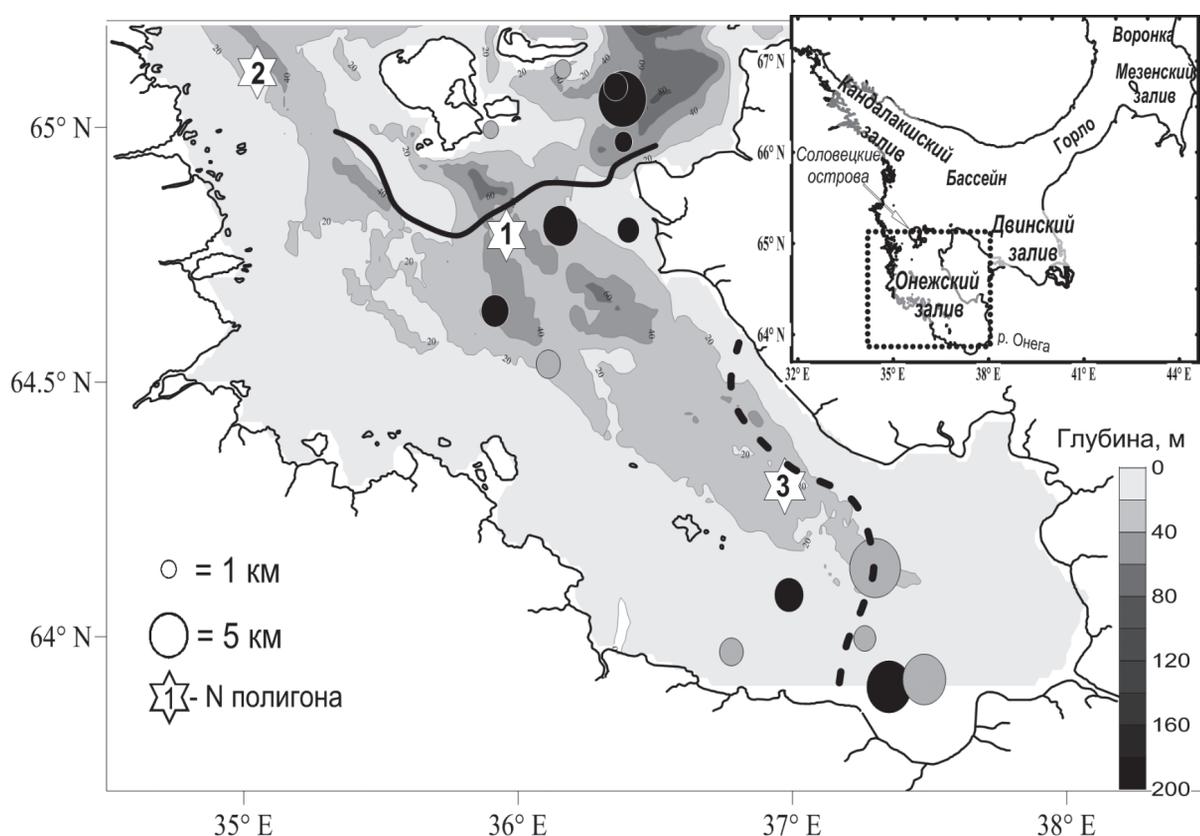


Рис. 1. Карта глубин Онежского залива с нанесенными положениями циклонических (черный круг) и антициклонических (серый круг) вихрей по данным радиолокационных снимков и местами полигонов натурных измерений (звёздочка с соответствующим номером полигона). Линиями показаны положения южной части Соловецкого фронта (пунктирная) и Онежского фронта (сплошная) по спутниковым данным температуры поверхности моря за летний период 2010 г. На врезке – карта Белого моря

По данным наблюдений в других морях (Андреев, Жабин, 2012), вихри могут приводить к быстрому обмену свойствами между водами разного происхождения и играть важную роль в горизонтальном перемешивании (Thomas et al., 2008; Зацепин и др., 2013). Это и определило основную цель проводимых нами исследований – по данным контактных и спутниковых наблюдений оценить особенности распространения малых (субмезомасштабных) вихрей в Онежском заливе Белого моря и их влияние на изменение концентраций хлорофилла.

Материалы и методы

Для изучения малых вихрей на акватории Белого моря использовалось 221 радиолокационное изображение (РЛИ) высокого разрешения за май – сентябрь 2009–2012 гг. Эти изображения были получены с ENVISAT ASAR (2009–2011 гг.) и RADARSAT-1,2 (2012 г.). Покрытие снимками Онежского залива составило в среднем 120 изображений. Вихревые структуры на РЛИ определялись в виде полос, закрученных в спирали или дуги.

Дополнительно анализировались спутниковые данные оптического диапазона за июнь 2010 и 2015 годов со сканера MODIS Aqua, по ним рассчитывались с помощью стандартного и регионального (Klavchishina et al., 2011) алгоритмов поля температуры поверхности моря (ТПМ) и концентрации хлорофилла. А также привлекались результаты субмезомасштабных океанографических CTD съемок, которые выполнялись в 2006–2009 гг. на полигоне № 1, в 2010–2013 гг. – на полигоне № 2, в 2015 г. – на полигоне № 3 (рис. 1). Работы на 1-м и 2-м полигонах выполнялись в течение 3–5 часов для привязки к той или иной фазе прилива. Площадь полигона определялась оценками радиуса Россби и составляла до 8 км². Работы на 3-м полигоне площадью 9 км на 14 км выполнялись на протяжении 5 часов на 15 станциях. Положение и диаметр вихревых структур в этих случаях определялись по замкнутым изолиниям на получаемых картах. По контактными данным также измерялись вертикальный размер и время существования (по данным повторяющихся съемок) вихрей.

Полученные результаты

Обработка радиолокационных изображений и контактных наблюдений

Всего на акватории моря по РЛИ было детектировано 162 вихря (Зимин и др., 2016). Почти половина всех наблюдаемых вихревых структур была зарегистрирована в Бассейне моря. Чаще всего в этом районе вихри отмечались у Терского берега вблизи структурного фронта и севернее Соловецких островов. Четверть вихрей пришлась на Двинский залив. По 15 вихрей зарегистрировано в Кандалакшском и Онежском заливе. При этом в каждом из перечисленных районов вихрей с циклоническим типом вращения (Zn) в 2–4 раза больше, чем вихрей с антициклоническим типом (Az). Меньше всего вихрей было в Горле – всего 6 циклонических вихрей.

Рассматривая более подробно Онежский залив (рис. 1), можно выделить две группы вихрей. Одна группа включает в себя вихри в районе устья залива, другая группа включает вихри, детектированные в проливе Восточная Соловецкая Салма и в районе юго-восточнее Соловецких островов. Из 15 вихрей 7 имели тип вращения Az, а 8 – Zn. Диаметр зарегистрированных вихрей варьировался от 0,9 км до 6,9 км, хотя внутренний радиус дефор-

мации для Онежского залива составляет около 2 км (Зимин и др., 2016). Средний диаметр вихрей составил около 3 км, в среднем Az были крупнее Zп на 0,5 км. Чаще всего наблюдались вихри с диаметром около 2 км.

По in-situ данным на полигонах № 1 и № 2 (*рис. 1*) вихревые структуры не были обнаружены в 2008 и 2011 годах. В другие года все регистрируемые вихри были циклоническими, они характеризовались пятном холодных и соленых вод и охватывали приповерхностные слои, но не всегда четко отражались на поверхностном горизонте. Все вихри регистрировались в одну фазу приливного потока и наблюдались в районе полигона не менее 3–4 часов. Их толщина варьировалась от 11 м до 19 м, а диаметр – от 1,6 км до 2,4 км.

Сопоставление спутниковых данных с разных сенсоров и натуральных наблюдений

Для сопоставления использовались данные о положениях вихревых структур с РЛИ за 24.06.2010 8:11 UTC, покрывающего акваторию Онежского, Двинского заливов и Бассейна, со спутниковыми данными по ТПМ и концентрации хлорофилла за 24.06.2010 9:35 UTC. Из 18 обнаруженных на РЛИ вихрей 4 структуры не попали в поле данных MODIS. Два Zп-вихря не нашли своего отражения в поле температуры, 6 Zп-вихрей характеризовались холодным пятном, а 3 Zп-вихря – теплым. Два Az-вихря характеризовались теплым пятном, а один – холодным. Крупные вихри (8–10 км в диаметре) с циклоническим типом вращения проявлялись в виде пятен холодных вод и пониженных концентраций хлорофилла. Антициклоническим вихрям соответствовала обратная картина. Было выявлено, что вихревые структуры с диаметрами от 1 км до 6 км не проявились в поле хлорофилла. Но в данных по ТПМ они прослеживались.

С 23.06.2015 19:30 по 24.06.2015 1:30 UTC производились измерения на полигоне № 3 (*рис. 1*) на 15 станциях (*рис. 2а*). Данные полигонных измерений сопоставлялись со спутниковыми данными по ТПМ и концентрации хлорофилла за 24.06.2015 9:20 UTC. В поле ТПМ (*рис. 2а*) детектировано пятно холодных вод в районе 9-й станции полигона. По результатам разреза (*рис. 2б*), проведенного через это пятно с северо-запада на юго-восток (серая линия, включая пунктир), видно, что в районе холодного пятна график температуры имеет форму впадины с минимальным значением 8,1 °С. По данным полигонной съемки (*рис. 2в*) на глубине 1 м в поле температуры в этом же районе также регистрируется пятно холодных вод со значением температуры в центре 8 °С. Что можно идентифицировать как проявление вихревой структуры Zп-типа.

В поле концентрации хлорофилла (*рис. 3а*) и на разрезе (*рис. 3б*) по спутниковым данным проявления вихря не наблюдалось, хотя он нечетко проявлялся в данных концентрации хлорофилла по измерениям на полигоне (*рис. 3в*), что характеризовалось замкнутой изолинией более низкой концентрации хлорофилла, чем вокруг.

По данным с того же полигона на глубине 12 метров (*рис. 4*) вихревая структура имела более четкое проявление, что демонстрируется увеличением градиента по температуре

и концентрации хлорофилла по сравнению с глубиной 1 м. В целом, вихревая структура прослеживалась до глубины 14 метров.

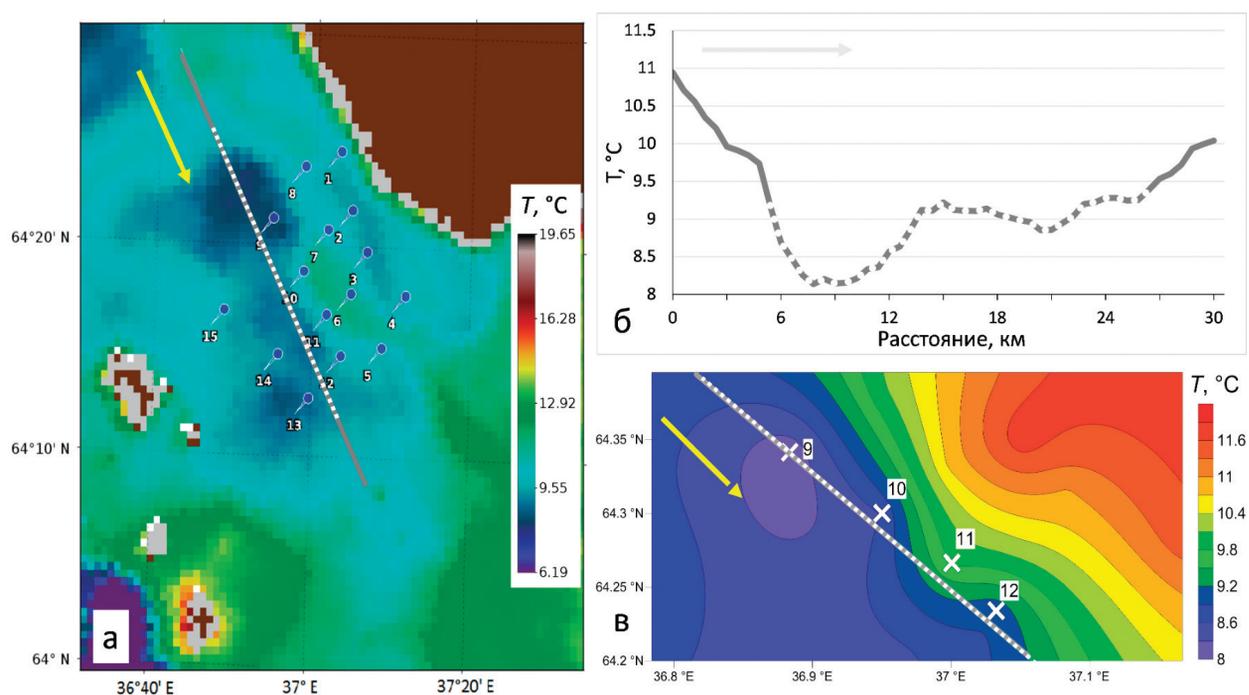


Рис. 2. Распределение температуры на поверхности (а) и на разрезе (б) по спутниковым данным, также на глубине 1 м по данным in-situ (в). Серый цвет – весь разрез; пунктир – часть разреза; проходящая по полисону стрелка – направление разреза; цифрами указаны номера станций, точками и крестиками обозначено положение станций

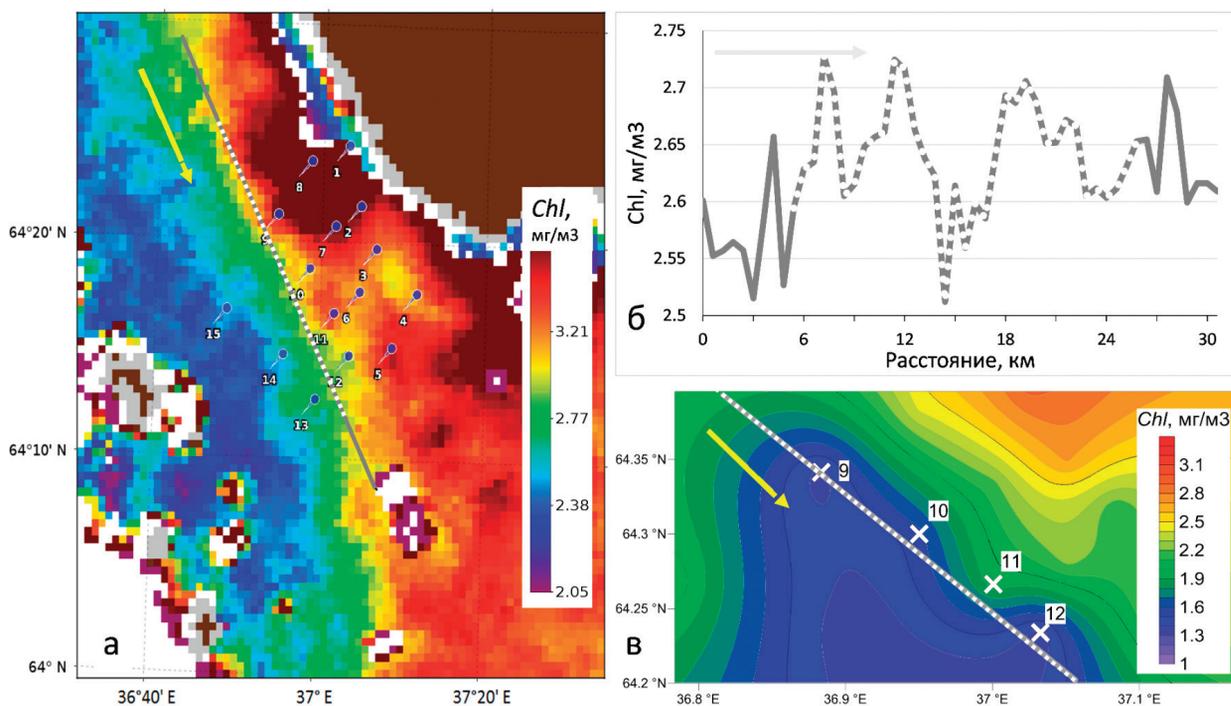


Рис. 3. Распределение хлорофилла на поверхности (а) и на разрезе (б) по спутниковым данным, а также на глубине 1 м по данным in-situ (в). Обозначения см. рис. 2

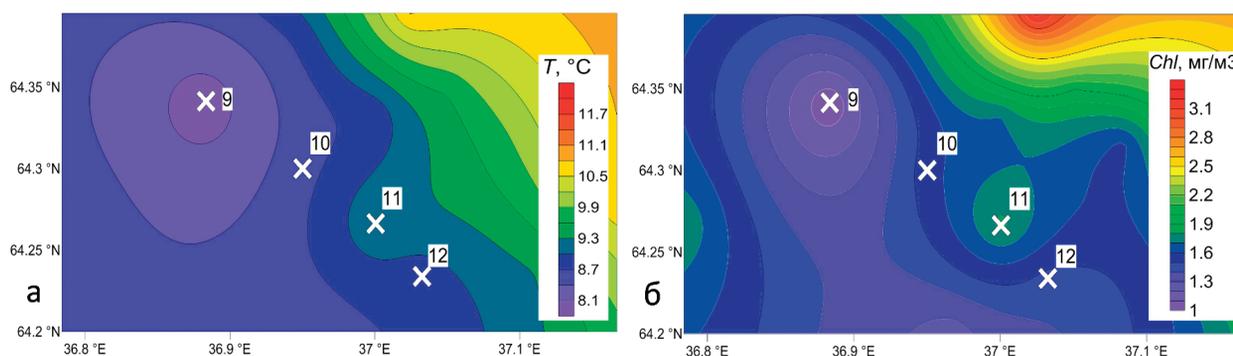


Рис. 4. Распределение температуры (а) и концентрации хлорофилла а (б) на глубине 12 метров. Крестиками указаны местоположения станций с 9 по 12 на полигоне № 3. Пунктиром выделена область вихревой структуры

Фронтальный характер образования вихрей подтверждается наличием отрывающегося меандра от фронта в районе 11-й станции, который прослеживался по глубине до 13–14 метров. Меандр лучше всего регистрируется на глубине 12 метров, в поле температуры и хлорофилла характеризуется повышенными значениями. При этом в поверхностном слое наблюдается только изгиб фронта как в поле температуры по спутниковым данным, так и по in-situ.

Обсуждение результатов

Малые вихревые структуры регистрируются как по радиолокационным, так и по in-situ данным. При этом средний диаметр по контактными данным составил в Онежском заливе 2 км, а по спутниковым – 3,4 км. Они прослеживаются в районах с выраженной стратификацией около фронтальных зон. Преимущественно фиксировались вихри с циклоническим типом вращения. Они имели диаметр около 2 км, охватывали толщу вод от поверхности до глубины 15 м при глубине места до 30–40 м. В среднем их диаметр был примерно равен или меньше радиуса Россби, что позволяет отнести их к субмезомасштабному пространственному интервалу. Время их существования в рамках полигона не превышало половины полусуточного приливного цикла.

Сопоставление почти одновременных РЛИ и данных оптического диапазона показало, что небольшие вихревые структуры (единицы километров) могут отображаться в поле ТПМ как пятна более холодных или теплых вод по сравнению с окружающими водами и могут не находить своего отражения в данных по концентрации хлорофилла на поверхности. При этом не всегда одному и тому же типу вращения может соответствовать только подъем или опускание вод в виду их неквазистационарности. Хотя принято считать, что в мезомасштабных вихрях (а субмезомасштаб является короткопериодной частью мезомасштаба) с Zn-типом вращения должен наблюдаться апвеллинг, характеризующийся пониженной температурой и повышенной концентрацией хлорофилла в центре (Nenciolia et al., 2008). Это можно объяснить тем, что субмезомасштабные вихри, в отличие от мезомасштабных, являются агеострафическими и не достигают квазистационарного состоя-

ния, поэтому в развивающихся вихрях может наблюдаться интенсивный апвеллинг, а когда начинается стадия релаксации, то происходит опускание вод (Зацепин и др., 2013).

Сопоставление судовых и спутниковых оптических данных, разница между которыми составила около 9 часов, показало, что вихрь, обнаруженный в поле температуры по in-situ данным, характеризовался пятном холодных вод и пониженными концентрациями хлорофилла. При этом вихрь в поверхностном слое по данным концентрации хлорофилла практически не прослеживался и не нашел своего отражения в спутниковых данных цвета моря. Поле температуры, наоборот, полностью отразило существование вихря в поверхностном слое как по спутниковым, так и по натурным данным. Данный вихрь прослеживался и в толще воды. Так, на глубине 12 метров и концентрация хлорофилла, и поле температуры показали четкое проявление вихревой структуры. При этом холодным значениям температуры соответствовали низкие значения концентрации хлорофилла как на поверхности, так и во всей толще. Из чего следует, что вихрь «размывает» подъемом вод имеющуюся концентрацию хлорофилла, тем самым уменьшая ее. При этом через несколько дней влияние вихрей может отмечаться в виде изменчивости общей концентрации хлорофилла в целом на акватории.

Заключение

Выполненное обобщение результатов показало, что субмезомасштабные вихревые структуры являются распространенным явлением на акватории Белого моря вообще и Онежского залива в частности. Для исследования влияния их на концентрацию хлорофилла требуются данные высокого разрешения ввиду их небольших размеров. Несмотря на то, что субмезомасштабные вихри имеют свое поверхностное проявление, не во всех данных о поверхности они могут одинаково четко находить свое отражение. В частности, не все вихри, отображаемые в радиолокации, в ТПМ либо в контактных измерениях имеют свое отражение в полях концентрации хлорофилла в Белом море, получаемых по спутниковым данным. Субмезомасштабные вихри могут не проявляться в виде отдельных структур в данных видимого диапазона, как мы можем видеть их в РЛИ, и могут устойчиво регистрироваться только в полях ТПМ. Аналогичная картина соответствует и цепочкам вихрей. Хотя данные контактных измерений указывают, что влияние субмезомасштабных вихревых структур в Онежском заливе на распределение хлорофилла проявляется преимущественно в области скачка температуры и солености. При этом вихревые структуры с одним и тем же типом закрутки по РЛИ могут характеризоваться как подъемом вод, который приводит к уменьшению концентрации хлорофилла, так и опусканием вод, которое, по-видимому, как обратный механизм может приводить к «сгущению» и увеличению концентрации хлорофилла в центре вихревой структуры. Соответственно, в Онежском заливе субмезомасштабные вихри влияют на вертикальное и горизонтальное распределение хлорофилла, но не все из них находят свое отображение в данных текущих спутниковых наблюдений.

Авторы благодарны О.В. Копелевичу за помощь в получении спутниковых и судовых данных и Е.А. Морозову за ценные практические советы. Работа выполнена при поддержке РФФИ проект № 15-05-04639 а (обработка и анализ РЛИ), РФФИ гранта № 14-17-00800 (обработка и анализ данных сканера MODIS и подспутникового эксперимента).

Литература

1. Андреев А.Г., Жабин И.А. Мезомасштабные вихри и межгодовые изменения содержания хлорофилла-а в водах Охотского моря // Вестник Дальневосточного отделения РАН. 2012. № 6. С. 65–71.
2. Зацепин А.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. О природе короткопериодных колебаний основного черноморского пикноклина, субмезомасштабных вихрях и реакции морской среды на катастрофический ливень 2012 г. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 717–732.
3. 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.
4. Ильяхи Л.В., Белевич Т.А., Ступникова А.Н., Дриц А.В., Флинт М.В. Влияние локальных гидрофизических условий на пространственную изменчивость фитопланктона Белого моря // Океанология. 2015. Т. 55. № 2. С. 241–251.
5. Кравчишина М.Д., Буренков В.И., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Вазюля С.В., Лисицын А.П. Новые данные о пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла а в Белом море // Доклады Академии Наук. 2013. Т. 448. № 3. С. 342–348.
6. Лисицын А.П., Кравчишина М.Д., Копелевич О.В., Буренков В.И., Шевченко В.П., Вазюля С.В., Кловиткин А.А., Новигатский А.Н., Политова Н.В., Филиппов А.С., Шеберстов С.В. Пространственно-временная изменчивость концентрации взвеси в деятельном слое Белого моря // Доклады Академии Наук. 2013. Т. 453. № 4. С. 440–445.
7. 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.
8. Филатов Н.Н., Тержеев А.Ю. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 335 с.
9. Kravchishina M.D., Burenkov V.I., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Vazyulya S.V., Politova N.V., Novigatsky A.N., Filippov A.S., Shevchenko V.P. Spatial and temporal variability of chlorophyll “a” in the White Sea in 2002–2010 from satellite and ship data // Proceedings of the VI International Conference “Current problems in Optics of Natural Waters (ONW’2011)”. St.-Peterburg, September 6–9, 2011. P. 82–85.
10. Nenciolia F., Kuwahara V.S., Dickey T.D., Riic Y.M., Bidigare R.R. Physical dynamics and biological implications of a mesoscale eddy in the lee of Hawaii: Cyclone Opal observations during E-Flux III // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2008. V. 55. Issues 10–13. P. 1252–1274.
11. Thomas L.N., Tandon A., Mahadevan A. Submesoscale processes and dynamics // Ocean Modeling in an Eddying Regime. Geophys. Monogr. Ser. 2008. V. 177. P. 17–38.

The small eddies in the White Sea and their influence on chlorophyll distribution in the Onega Bay

O.A. Atadzhanova^{1,2}, A.V. Zimin^{1,2}

¹St. Petersburg Department of P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS
St. Petersburg 199053, Russia
E-mail: oksana.atadzhanova@gmail.com

²Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg 195196, Russia

Based on the diverse data, this study illustrates the occurrence of small (submesoscale) eddy structures in the Onega Bay of the White Sea and assesses their impact on the distribution of chlorophyll. The data included the results of processing of synthetic aperture radar (SAR) images from 2009 to 2012, satellite optic images in 2010 and 2015, and contact measurements on the local oceanographic polygons from 2006 to 2015. Quasi-operational remote sensing

experiment in 2015 was based on comparing with close time data of satellite optical sensors and contact measurements. By all data, eddy structures about 2 km in size were most often detected, and this size is close to the climatic estimate of the internal deformation radius in the Onega Bay. Some of these submesoscale structures were manifested in the surface layer about 15 m thickness during 3–4 hours. Areas of increased occurrence of eddies on SAR images were characterized by anomalies of chlorophyll distribution and by presence of spots of cold or warm water. It is found that eddies of large size (> 8 km) almost always occurred simultaneously in different satellite data. This finding was not correct for smaller vortices (< 2 km), and the contact experiment including measurements of chlorophyll confirmed this result.

Keywords: submesoscale eddies, satellite and in-situ observations, chlorophyll concentration, White Sea

Accepted: 07.07.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-110-118

References

1. Andreev A.G., Zhabin I.A., Mezomasshtabnye vikhri i mezhgodovye izmeneniya sodержaniya khlorofilla-a v vodakh Okhotskogo moray (Mesoscale eddies and year-to-year changes of the chlorophyll-a concentration in the Okhotsk Sea waters), *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya RAN*, 2012, No. 6, pp. 65–71.
2. Zatsepin A.G., Ostrovskii A.G., Kremenetskii V.V., Piotukh V.B., Kuklev S.B., Moskalenko L.V., Podymov O.I., Baranov V.I., Korzh A.O., Stanichnyi S.V., O prirode korotkoperiodnykh kolebaniy osnovnogo chernomorskogo piknoklina, submezomasshtabnykh vikhryakh i reaktzii morskoi sredy na katastroficheskii liven' 2012 g. (On the nature of short-period oscillations of the main Black Sea pycnocline, submesoscale eddies, and response of the marine environment to the catastrophic shower of 2012), *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2013, Vol. 49, No. 6, pp. 717–732.
3. Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Romanenkov D.A., Kozlov I.E., Shapron B., Submezomasshtabnye vikhri v Belom more po dannym sputnikovykh radiolokatsionnykh izmerenii (Submesoscale Eddies in the White Sea Based on Satellite SAR Data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 1–2, pp. 129–135.
4. Il'yash L.V., Belevich T.A., Stupnikova A.N., Drits A.V., Flint M.V., Vliyanie lokal'nykh gidrofizicheskikh uslovii na prostranstvennyuyu izmenchivost' fitoplanktona Belogo moray (Effects of local hydrophysical conditions on the spatial variability of phytoplankton in the White Sea), *Okeanologiya*, 2015, Vol. 55, No. 2, pp. 241–251.
5. Kravchishina M.D., Burenkov V.I., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Vazyulya S.V., Lisitsyn A.P. Novye dannye o prostranstvenno-vremennoi izmenchivosti kontsentratsii khlorofilla a v Belom more (New data on the spatial and temporal variability of the chlorophyll a concentration in the White Sea), *Doklady Akademii Nauk*, 2013, Vol. 448, No. 3, pp. 342–348.
6. Lisitsyn A.P., Kravchishina M.D., Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Shevchenko V.P., Vazyulya S.V., Klyuvitkin A.A., Novigatskii A.N., Politova N.V., Filippov A.S., Sheberstov S.V., Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' kontsentratsii vzvesi v deyatel'nom sloe Belogo morya (Spatiotemporal variability of concentration of suspended matter in the active layer of the White Sea), *Doklady Akademii Nauk*, 2013, Vol. 453, No. 4, pp. 440–445.
7. Romanenkov D.A., Zimin A.V., Rodionov A.A., Atadzhanova O.A., Kozlov I.E. Izmenchivost' frontal'nykh razdelov i osobennosti mezomasshtabnoi dinamiki vod Belogo morya (Variability of fronts and features of mesoscale water dynamics in the White Sea), *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2016, Vol. 9, No. 1, pp. 59–72.
8. Filatov N.N., Terzhevik A.Yu., *Beloe more i ego vodosbor pod vliyaniem klimaticheskikh i antropogennykh faktorov* (The White Sea and their watershed under influence of climate and antropogenic impact), Petrozavodsk: Karel'skii nauchnyi tsentr RAN, 2007, 335 p.
9. Kravchishina M.D., Burenkov V.I., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Vazyulya S.V., Politova N.V., Novigatsky A.N., Filippov A.S., Shevchenko V.P., Spatial and temporal variability of chlorophyll "a" in the White Sea in 2002–2010 from satellite and ship data, *Proceedings of the VI International Conference "Current problems in Optics of Natural Waters (ONW'2011)"*, St.-Peterburg, September 6–9, 2011, pp. 82–85.
10. Nenciolia F., Kuwahara V.S., Dickey T.D., Riic Y.M., Bidigare R.R., Physical dynamics and biological implications of a mesoscale eddy in the lee of Hawai'i: Cyclone Opal observations during E-Flux III, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2008, V. 55, Issues 10–13, pp. 1252–1274.
11. Thomas L.N., Tandon A., Mahadevan A., Submesoscale processes and dynamics, *Ocean Modeling in an Eddying Regime*, *Geophys. Monogr. Ser.*, 2008, V. 177, pp. 17–38.