

Оценка характеристик мезомасштабных вихрей в бассейне Лофотенской котловины по данным спутниковых и судовых наблюдений

А. В. Зимин^{1,2}, О. А. Атаджанова¹

¹ *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия*

² *Санкт-Петербургский государственный университет*

Санкт-Петербург, 199034, Россия

E-mail: zimin2@mail.ru

Представлены результаты комплексных наблюдений за характеристиками мезомасштабных вихревых структур, выполненных в мае – июне 2019 г. в Норвежском море. Анализировались данные спутниковой альтиметрии из архива AVISO, радиолокационные изображения со спутника Sentinel-1 и гидрологические наблюдения за течениями, температурой и солёностью, выполненные с борта научно-исследовательского судна «Академик Николай Страхов». По данным о динамической поверхности уровня океана было установлено, что в бассейне Лофотенской котловины Норвежского моря в описываемый период постоянно присутствовали группы вихревых структур различного типа вращения, что было подтверждено данными судовых наблюдений. В этот же период в радиолокационных изображениях проявлялись только маложивущие, преимущественно небольшие вихри со средним диаметром около 15 км. Среди долгоживущих (более месяца) структур, зарегистрированных с помощью спутниковой альтиметрии, доминировали антициклоны размером 40–60 км, причём отмечались вихри, постоянно существующие в районе и приходящие в него. Для изучения особенностей структуры вихрей, прибывающих в район, например, с периферии Норвежского течения, был выполнен подспутниковый эксперимент. На основании гидрологических и альтиметрических измерений был зарегистрирован антициклон диаметром около 45 км. Вихрь не проявлялся на поверхности в поле температуры, но чётко прослеживался на глубинах более 50 м в виде линзы тёплых и более солёных вод, его вертикальное развитие составляло 200–400 м. В поле скорости течений антициклон проявлялся с глубины 25 м, а скорость на его периферии достигала 30–50 см/с, что выше оценок, полученных по спутниковым данным.

Ключевые слова: Лофотенская котловина, Норвежское море, мезомасштабные вихри, динамическая поверхность уровня океана, спутниковая радиолокация, *in situ* измерения, подспутниковый эксперимент

Одобрена к печати: 01.06.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-202-210

Введение

Лофотенская котловина представляет собой достаточно обособленное понижение дна, границу которого принято проводить по изобате 3250 м (Bashmachnikov et al., 2017) в центральной части Норвежского моря, располагающееся на пути направленного к северу движения тёплых атлантических вод. Топографический эффект приводит к ветвлению потока и формированию ярко выраженного стержня Норвежского течения, прижатого к континентальному склону, у восточной периферии котловины и над самой впадиной — к образованию крупномасштабной циклонической циркуляции (Белоненко и др., 2014). В результате котловина становится естественным резервуаром, теплообмен в котором оказывает значительное влияние на климатические процессы в Арктике.

Основной вклад в изменчивость структуры и динамики вод в данном районе вносят мезомасштабные вихри различного генезиса (Volkov et al., 2013). Например, меандрирование Норвежского течения генерирует преимущественно антициклонические мезомасштабные вихри, которые после формирования в дальнейшем перемещаются к западу в район Лофотенской котловины (Zinchenko et al., 2019). Они осуществляют транспорт тёплых и солёных атлантических вод в рассматриваемую область (Сандалюк, Белоненко, 2019). В центральной же

части котловины наблюдается постоянно существующий антициклонический вихрь (Иванов, Кораблев, 1995), который из-за особенностей географического расположения часто называется Лофотенским вихрем (ЛВ). Существование ЛВ поддерживается влиянием зимней термической конвекции (Иванов, Кораблев, 1995). Характерной особенностью ЛВ является его значительная сезонная изменчивость. Она выражается в интенсификации в зимнее время в результате вертикальной конвекции и постепенной изоляции от поверхности пикноклином в летний период (Алексеев и др., 2016). Диаметр структуры составляет не более 50 км, по вертикали он прослеживается в виде термохалинной аномалии в интервале глубин от поверхности до 700–1500 м (Блошкина, Иванов, 2016; Yu et al., 2017). На поверхности океана вихрь совершает перемещения на десятки километров по циклонической траектории и чётко наблюдается по данным спутниковой альтиметрии, радиолокации и температуры (Алексеев и др., 2016). Крупномасштабные особенности топографии привлекают вихри, образовавшиеся в других местах, к центру котловины и вынуждают антициклонические структуры сливаться с ЛВ (Volkov et al., 2015). Считается (Блошкина, Иванов, 2016), что сохранение высокой антициклонической завихренности ЛВ обеспечивается эпизодическим слиянием с фронтальными вихрями, генерируемыми Норвежским течением. Однако остаются открытыми вопросы об особенностях динамических характеристик и термохалинной структуры подобных стационарных вихрей и их отличиях от ЛВ, так как для подробного изучения их характеристик нужны целенаправленные наблюдения. Стоит отметить, что циклонические структуры встречаются в Лофотенской котловине в достаточном количестве, причём самые долгоживущие из них образуются вблизи ЛВ (Zinchenko et al., 2019), и совместно с топографией дна они оказывают стабилизирующее влияние на его устойчивость (Bashmachnikov et al., 2017).

Несмотря на активное применение спутниковых данных для изучения структур в Лофотенской котловине, есть работы (Yu et al., 2017), где отмечаются расхождения в два раза в оценках средних диаметров ЛВ, полученных по данным глайдерных и спутниковых альтиметрических наблюдений. Это ставит вопрос о применимости альтиметрических данных, например, для верификации моделей (Bashmachnikov et al., 2017; Volkov et al., 2015) или оценок потока переносимого вихрями тепла (Сандалюк, Белоненко, 2019). Проверить корректность применения данных дистанционного зондирования можно прямым сопоставлением результатов спутниковых и учащённых судовых наблюдений. Подобная возможность представилась в рамках 40-го рейса научно-исследовательского судна (НИС) «Академик Николай Страхов», проходившего в июне 2019 г. (Зимин и др., 2019).

Это и определило основные задачи работы: оценить пространственно-временную изменчивость проявлений вихрей на основе различных спутниковых данных в области Лофотенской котловины, описать по данным судовых измерений характеристики мезомасштабных вихрей на полигоне и сопоставить результаты разнородных наблюдений.

Материалы и методы исследования

Для оценки пространственно-временной изменчивости проявления вихрей по данным дистанционного зондирования Земли и планирования судовых работ привлекались данные, полученные альтиметрическими и радиолокационными спутниковыми наблюдениями за период с 5 мая по 26 июня 2019 г. на акватории от 69 до 72° с. ш. и от 0 до 7° в. д. Использовались сведения об абсолютной динамической топографии (высота морской поверхности относительно геоида) из архива AVISO (Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic data) с разрешением 1/4°, представленные в свободном доступе посуточно на веб-сервере Live Access Server (<https://las.aviso.oceanobs.com>). Пример карты показан на *рис. 1* (см. 204). Подробное описание продукта приведено в электронном документе (SSALTO/DUACS..., 2015). Эти данные позволили зарегистрировать положения и размеры мезомасштабных вихревых структур на исследуемой акватории, а также отследить треки их движения аналогично методике (Zinchenko et al., 2019). Также привлекались радиолокационные изображения (РЛИ) спутника Sentinel-1 С-диапазона, полученные в режимах Interferometric Wide Swath

(широкозахватный интерферометрический режим, разрешение 20 м и ширина полоса обзора 250 км) и Extra Wide Swath (сверхширокозахватный режим, разрешение 40 м и ширина полосы обзора 400 км). Подробное описание данных дано на веб-портале Sentinel Online (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>). Данные обрабатывались по методике, изложенной в работе (Atadzhanova, Zimin, 2019).

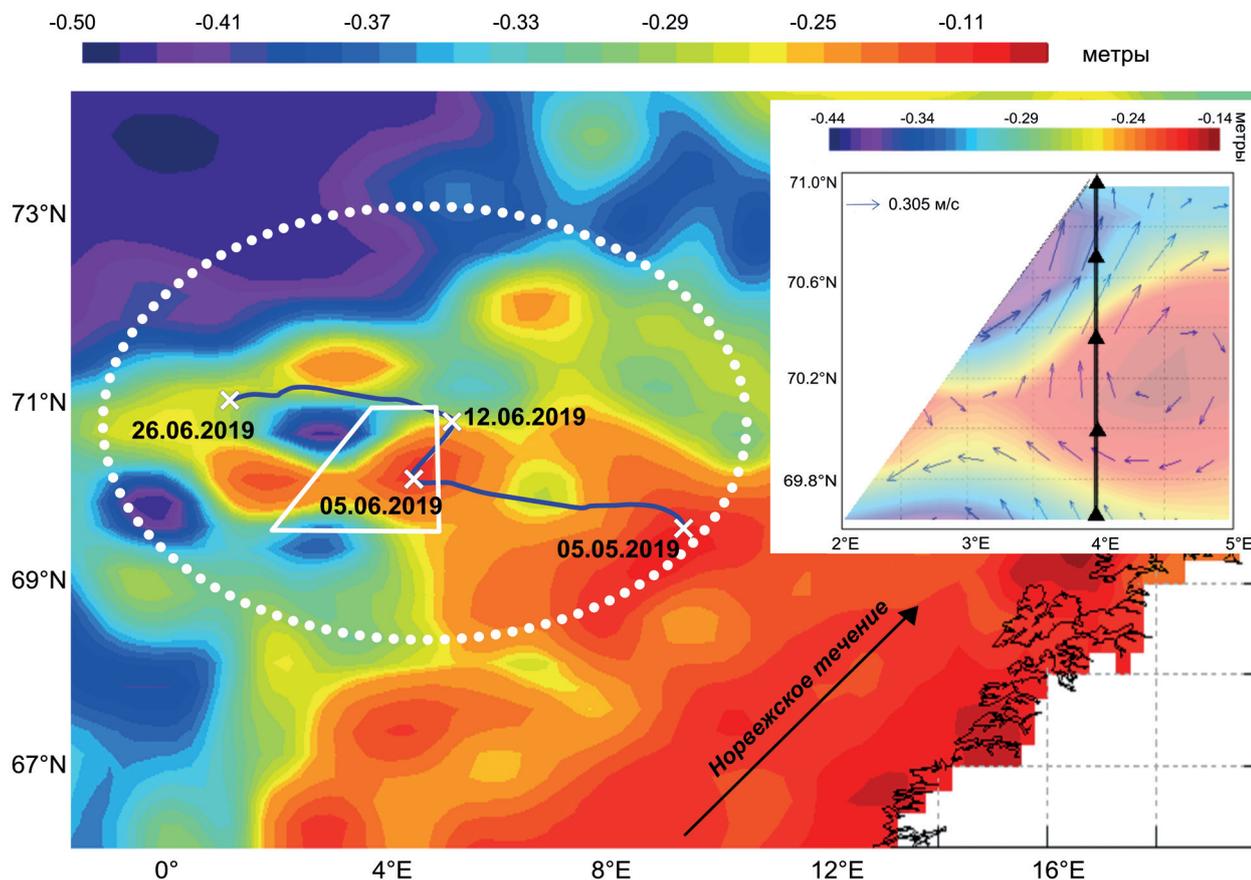


Рис. 1. Карта абсолютной динамической топографии океана (в метрах) на части акватории Норвежского моря; на врезке для района судовых измерений абсолютная динамическая топография дополнена скоростью течений на поверхности (в метрах в секунду); карты построены по данным архива AVISO за 6 июня 2019 г. Белыми точками отмечена область Норвежского моря, прилегающая к Лофотенской котловине. Синяя линия с белыми крестиками — траектория движения антициклонического вихря, образовавшегося на границе Норвежского течения с 5 мая по 26 июня 2019 г. Белой линией обозначен район судовых измерений НИС «Академик Николай Страхов». Чёрные треугольники на врезке обозначают места океанографических станций, а линия, проведённая через них, — положение в пространстве гидрологического разреза

Морские экспедиционные исследования в Норвежском море на акватории Лофотенской котловины (см. рис. 1) проводились 5–6 июня 2019 г. и планировались на основании анализа данных дистанционного зондирования Земли, описанных выше, за май 2019 г. Судовые работы включали полигонную съёмку и измерение температуры на равномерной сетке из восьми гласов и гидрологический разрез из пяти океанографических станций (на врезке рис. 1 обозначены треугольниками). Съёмка выполнялась на ходу судна при скорости 4–5 узлов доплеровским профилографом течений Ocean Surveyor/Observer 150 kHz, с помощью которого регистрировались характеристики течений по слоям до глубины 220 м и температура воды на глубине 5 м. На океанографических станциях выполнялись глубоководные измерения температуры и солёности с помощью СТД-зонда (англ. Conductivity-Temperature-Depth — STD) SBE-25 до глубины 510 м и попутные метеорологические наблюдения.

Результаты

Дистанционные наблюдения

По данным абсолютной динамической топографии на рассматриваемой акватории за период наблюдений уровень колебался от -50 до -2 см. В регионе постоянно присутствовали локальные понижения уровня (менее -30 см) и относительные повышения (более -22 см). На каждой суточной карте наблюдалось от 3 до 7 подобных аномалий уровня различной конфигурации размером от 25 до 120 км. Они интерпретировались как проявления циклонических и антициклонических вихревых образований. Средний диаметр структуры в районе составлял 51 км при стандартном отклонении 22 км. Среди долгоживущих (более двух недель) преобладали антициклонические образования. В центре области большую часть времени находилась самая значительная по амплитуде положительная аномалия уровня размером 50–70 км, идентифицируемая как центр ЛВ. Вихревые структуры взаимодействовали и смещались в направлении против часовой стрелки около центра котловины со скоростью в среднем 6 км/сут в пределах рассматриваемой зоны. Скорости движения вихрей разного знака вращения отличались незначительно.

По картам абсолютной динамической топографии удалось проследить ситуацию слияния ЛВ и антициклонического вихря. Траектория движения антициклона представлена на *рис. 1*. В первую декаду мая из фронтальной зоны Норвежского течения из точки с координатами $69,5^\circ$ с. ш. и $8,5^\circ$ в. д. начала движение к западу-северо-западу антициклоническая структура диаметром 54 км. В конце мая она приблизилась к ЛВ, а в первой декаде июня стала с ним взаимодействовать путём слияния. Слияние структур по данным альтиметрии продолжалось 7–8 дней. К 5–6 июня при наличии объединяющего гребня в обеих структурах чётко прослеживались выраженные центры (см. *рис. 1*). Диаметр антициклона на 6 июня составлял 47 км, а скорость течения на периферии достигала 20–30 см/с. При этом вокруг ЛВ прослеживалось кольцо из вихрей противоположного знака. После разрушения гребня наблюдалось резкое изменение размеров и траектории движения антициклона фронтального происхождения. Он несколько дней двигался на север-северо-восток. 12 июня антициклон продолжил движение в западном направлении, и в начале третьей декады июня сложилась ситуация, благоприятная для его слияния с ЛВ в других координатах.

За рассматриваемый период на РЛИ вихревые образования прослеживались лишь на 8 снимках, полученных с интервалом от 1 до 10 сут. Наблюдения осложняли погодные условия. Это связано с тем, что в данный период в Норвежском море наблюдались преимущественно штормовые погодные условия, а при сильном ветре (более 10 м/с) и волнении 4 балла и более визуализация вихрей на снимках крайне затруднена. Обнаруженные проявления вихрей не создавали целостной картины. На одном РЛИ в районе прослеживалось от одного до четырёх вихревых структур различного типа закрутки. Было обнаружено всего 17 проявлений вихревых структур, из них 12 обладали циклоническим типом закрутки и 5 — антициклоническим. Диаметр вихрей колебался от 2 до 48 км при среднем значении около 15 км и стандартном отклонении 13 км. Больше половины из них были субмезомасштабными вихрями с диаметром менее 9 км, наблюдавшимися на периферии мезомасштабных вихрей, проявлявшихся в абсолютной динамической топографии. Только для одного случая 11.06.2011 у антициклонического вихря с координатами центра около 70° с. ш., $1,5^\circ$ в. д. и диаметром около 45 км наблюдались схожие пространственные проявления в данных РЛИ и динамической топографии.

Контактные наблюдения

Во время выполнения работ на полигоне погодные условия определялись малоградиентным барическим полем. Средние значения скорости ветра составляли 8–10 м/с с порывами до 20 м/с. Волнение — 3–4 балла ветрового типа. Облачность — 9–10 баллов.

Температура приповерхностного слоя менялась от 6,9 до 7,5 °С (рис. 2а, см. с. 206). Область повышенной температуры (выше 7,4 °С) представляла собой вытянутую вдоль 70° с.ш. аномалию с центром около 3,25° в.д. Зоны пониженной температуры (меньше 7,1 °С) прослеживались севернее и юго-западнее обозначенного центра положительной аномалии. Скорость течения на горизонте 25 м менялась весьма значительно от 1 до 75 см/с (рис. 2в). На полигоне удалось зарегистрировать систему из нескольких вихревых структур. В центральной части района наблюдалось динамическое образование с круговым движением вод с антициклоническим типом вращения. Диаметр антициклона составлял около 45 км, скорость на его периферии достигала 30–50 см/с. Северо-западнее и северо-восточнее от неё прослеживались структуры с циклоническим типом закрутки. Их диаметры точно по данным съёмки оценить не представлялось возможным, так как они только частично прослеживались на полигоне. Стоит отметить хорошее совпадение проявления циклонических структур в течениях с холодными аномалиями приповерхностной температуры (рис. 2а). Тёплая же аномалия наблюдалась на периферии зарегистрированных динамических структур.

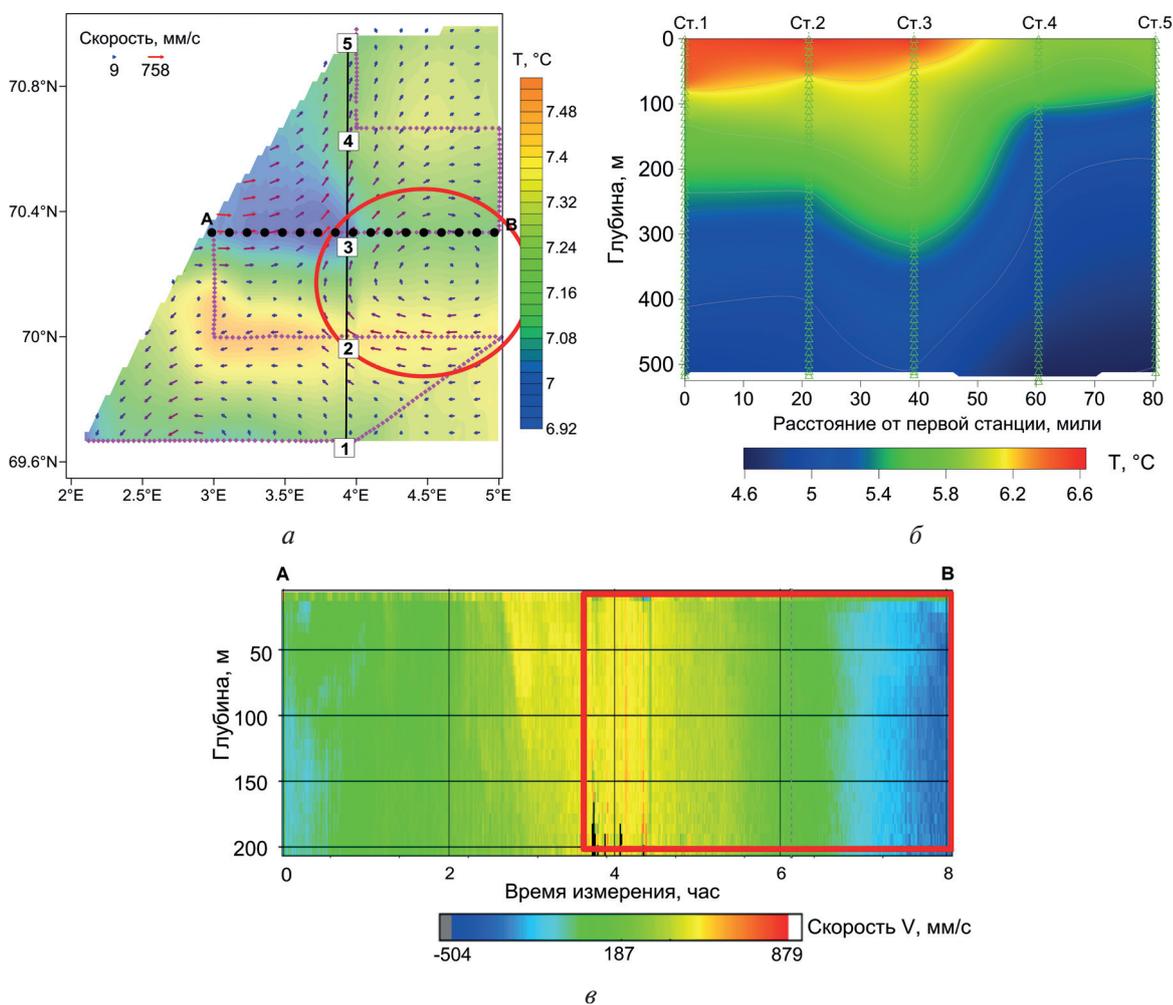


Рис. 2. Распределение температуры воды на глубине 5 м (показано цветом) и скорости течения на глубине 25 м (показано стрелками) по данным, полученным с 5 по 6 июня 2019 г. с борта НИС «Академик Николай Страхов» (а). Белые квадраты с цифрами обозначают положение станций, а связывающая их линия — положение гидрологического разреза. Розовые точки обозначают галсы, по которым двигалось судно, проводя измерения течения. Чёрные кружки между точками А и В обозначают галс, пересекающий антициклонический вихрь. Красный круг показывает положение антициклонического вихря за 6 июня 2019 г. по данным архива AVISO. Вертикальное распределение температуры по данным наблюдений на гидрологическом разрезе (б). Зелёными треугольниками обозначены горизонты измерений. Вертикальное распределение скорости течений вдоль оси север–юг на галсе АВ (в). Красным прямоугольником показана область аномалий уровня, соответствующая вихрю

Наличие вихревой структуры антициклонического происхождения также подтверждается данными гидрологического разреза (см. *рис. 2б*) и вертикальным распределением скорости на галсе (см. *рис. 2в*). На разрезе наблюдается характерное для антициклона куполообразное опускание термоклина относительно среднего положения. Максимальное заглубление фиксируется на 3-й станции, которая ближе всего находится к центру идентифицированного антициклонического вихря. На *рис. 2б* видно, что изотерма 5 °С углубляется на 100–300 м, ограничивая область максимальных градиентов температуры. Отметим, что в слое 50–250 м на станциях 2 и 3 наблюдается область повышенной солёности, что косвенно подтверждает адвективный характер происхождения данной структуры. Стоит обратить внимание, что вихревая структура не прослеживается на поверхности. В слое 0–50 м наблюдается типичное понижение температуры в направлении юг–север, которое связывается с сезонным прогревом вод. Представленные на *рис. 2в* течения имеют ярко выраженную реверсивную структуру вдоль оси север–юг, совпадающую с проявлениями в динамической топографии и подтверждающую вихревой характер движения. Вихревая структура прослеживается в поле течений от 22 до 210 м глубины (предел глубины измерений) на всей второй половине разреза. Максимальные скорости течений (около 50 см/с) соответствуют периферии антициклонического образования.

Прямое сопоставление данных, полученных на основе дистанционных наблюдений за уровнем океана и контактных измерений температуры и течений (см. *рис. 1* и *2*), показало, что на полигоне наблюдалась группа вихревых структур различного знака вращения. Их проявления совпадали как в уровенной поверхности океана, определённой на основе спутниковых данных, так и в полях течений, полученных по данным судовых наблюдений. Для антициклонической структуры, располагавшейся в центральной части разреза, показано, что при хорошем пространственном совпадении диаметра вихря скорости течений в нём по данным контактных измерений оказались примерно в 1,5 раза выше, чем по спутниковым наблюдениям. В температуре океана в виде холодных аномалий нашли чёткое отражение только циклонические структуры, тогда как проявления антициклонических структур маскировалось процессами в верхнем слое океана, что препятствует идентификации последних по спутниковым данным температуры поверхности океана. Отметим, что из-за погодных условий, неблагоприятствовавших проявлению вихрей на РЛИ, не удалось выполнить их сопоставление с данными судовых наблюдений.

Сравнение разнородных данных позволило сделать вывод о корректности применения сведений по абсолютной динамической топографии океана для определения диаметров вихревых структур, однако большие скорости течений на их периферии по контактным данным ставят новые вопросы об особенностях проноса вод в бассейне.

Заключение

В бассейне Лофотенской котловины Норвежского моря в описываемый период постоянно присутствовали группы мезомасштабных циклонических и антициклонических вихрей. Средний диаметр мезомасштабных структур был около 51 км. На периферии мезомасштабных вихрей эпизодически наблюдались субмезомасштабные структуры (меньше бароклинного радиуса деформации Россби из работы (Блошкина, Иванов, 2016)) противоположного знака вращения диаметром менее 9 км. В центре области большую часть времени находилась самая значительная по амплитуде антициклоническая структура, идентифицируемая как центр Лофотенского вихря. Мезомасштабные структуры взаимодействовали и смещались в циклоническом направлении около единого центра, причём отмечались как постоянно присутствующие в районе вихри, так и приходящие в него.

Сопоставление разнородных наблюдений показало общий характер наблюдаемой циркуляции вод в Лофотенской котловине как по данным дистанционного зондирования, так и в результате проведённой гидрологической съёмки. Был подробно описан антициклонический вихрь, пришедший в район с периферии Норвежского течения, что позволило подтвердить

корректность применения продукта AVISO, полученного по данным спутниковой альтиметрии, для оценок диаметров вихревых структур.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0149-2019-0015 «Волновые процессы, явления переноса и биогеохимические циклы в морях и океанах: исследование формирующих механизмов на основе физико-математического моделирования и натуральных экспериментальных работ».

Литература

1. Алексеев В. А., Иванов В. В., Репина И. А., Лаврова О. Ю., Станичный С. В. Конвективные структуры в Лофотенской котловине по данным спутников и буев Арго // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 1. С. 90–104.
2. Белоненко Т. В., Волков Д. Л., Норден Ю. Е., Ожигин В. К. Циркуляция вод в Лофотенской котловине Норвежского моря // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. 2014. Сер. 7. Вып. 2. С. 108–121.
3. Блошкина Е. В., Иванов В. В. Конвективные структуры в Норвежском и Гренландском морях по результатам моделирования с высоким пространственным разрешением // Тр. Гидрометеоролог. научно-исследоват. центра Российской Федерации. 2016. № 361. С. 146–168.
4. Зимин А. В., Атаджанова О. А., Романенков Д. А., Репина И. А., Белоненко Т. В., Иванов В. В. Характеристики мезомасштабных вихрей в Лофотенской котловине в начале лета 2019 года по данным судовых и спутниковых наблюдений // Материалы Семнадцатой Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 11–15 нояб. 2019. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 267.
5. Иванов В. В., Кораблев А. А. Динамика внутрикноклинной линзы в Норвежском море // Метеорология и гидрология. 1995. № 10. С. 55–59.
6. Сандалюк Н. В., Белоненко Т. В. Трехмерная структура мезомасштабных вихрей в Лофотенской котловине: композитный анализ на основе сопоставления *in situ* и спутниковых данных // Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса: материалы 7-й Научно-практ. конф. молодых учёных с международным участием. М.: Изд-во ВНИРО, 2019. С. 433–437.
7. Atadzhanova O. A., Zimin A. V. Analysis of the characteristics of the submesoscale eddy manifestations in the Barents, the Kara and the White Seas using satellite data // Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika. 2019. V. 12. No. 3. P. 36–45.
8. Bashmachnikov I. L., Sokolovskiy M. A., Belonenko T. V., Volkov D. L., Isachsen P. E., Carton X. On the vertical structure and stability of the Lofoten vortex in the Norwegian Sea // Deep-Sea Research. 2017. V. 128. P. 1–27.
9. SSALTO/DUACS User Handbook: (M)SLA and (M)ADT Near-Real-Time and Delayed Time Products. SALP-MU-P-EA-21065-CLS. 2015. Iss. 4rev 4. 72 p. URL: https://icdc.cen.uni-hamburg.de/fileadmin/user_upload/icdc_Dokumente/AVISO/hdbk_duacs.pdf.
10. Volkov D. L., Belonenko T. V., Foux V. R. Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin — a sub-Arctic hot spot of ocean variability // Geophysical Research Letters. 2013. V. 40. No. 4. P. 738–743.
11. Volkov D. L., Kubryakov A. A., Lumpkin R. Formation and variability of the Lofoten Basin vortex in a high resolution ocean model // Deep-Sea Research. 2015. V. 105. P. 142–157.
12. Yu L.-S., Bosse A., Fer I., Orvik K. A., Bruvik E. M., Hessevik I., Kvalsund K. The Lofoten Basin eddy: Three years of evolution as observed by Seagliders // J. Geophysical Research: Oceans. 2017. V. 122. P. 6814–6834.
13. Zinchenko V. A., Gordeeva S. M., Sobko Yu. V., Belonenko T. V. Analysis of Mesoscale eddies in the Lofoten Basin based on satellite altimetry // Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika. 2019. V. 12. No. 3. P. 46–54.

Estimation of the characteristics of mesoscale eddies in the basin of the Lofoten depression from satellite and ship observations

A. V. Zimin^{1,2}, O. A. Atadzhanova¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia

² Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia

E-mail: zimin2@mail.ru

The paper presents the results of complex observations of the characteristics of mesoscale eddy structures carried out in May-June 2019 in the Norwegian Sea. Satellite altimetry data from the AVISO archive, radar images from the Sentinel-1 satellite, and hydrological observations of currents, temperature, and salinity taken from the research vessel Academic Nikolai Strakhov were analyzed. From the data on the dynamic surface of the ocean level, it was found that in the Lofoten Basin of the Norwegian Sea, groups of eddy structures of various types of rotation were constantly present in the described period. This was confirmed by ship observation data. In the same period, predominantly small eddies with an average diameter of about 15 km appeared in radar images. Among the long-lived (more than a month) structures recorded by satellite altimetry, anticyclones 40–60 km in size predominated, and eddies were noted both constantly existing in the region and coming into it. To study the structural features of the eddies arriving in the region, for example, from the periphery of the Norwegian current, an experiment involving satellite survey was performed. An anticyclone with a diameter of about 45 km was recorded based on hydrological and altimetry measurements. The eddy did not appear on the surface in the temperature field, but was clearly visible at depths of more than 50 m in the form of a plume of warm and more salty water, its vertical development was 200–400 m. The anticyclone manifested itself in the current velocity field from a depth of 25 m, and velocities at its periphery reached 30–50 cm/s, which was higher than the estimates obtained from satellite data.

Keywords: Lofoten Basin, Norwegian Sea, mesoscale eddies, dynamic surface of the sea level, satellite radar, in-situ measurements, sub-satellite experiment

Accepted: 01.06.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-202-210

References

1. Alekseev V. A., Ivanov V. V., Repina I. A., Lavrova O. Yu., Stanichnyi S. V., Konvektivnye struktury v Lofotenskoj kotlovine po dannym sputnikov i buev Argo (Convective structures in Lofoten Basin from remote sensing data and argo floats), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 1, pp. 90–104.
2. Belonenko T. V., Volkov D. L., Norden Yu. E., Ozhigin V. K., Tsirkulyatsiya vod v Lofotenskoj kotlovine Norvezhskogo morya (Water circulation in the Lofoten Basin of the Norwegian Sea), *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta*, 2014, Ser. 7, Issue 2, pp. 108–121.
3. Bloshkina E. V., Ivanov V. V., Konvektivnye struktury v Norvezhskom i Grenlandskom moryakh po rezul'tatam modelirovaniya s vysokim prostranstvennym razresheniem (Convective structures in Lofoten Basin from remote sensing data and argo floats), *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossijskoj Federatsii*, 2016, No. 361, pp. 146–168.
4. Zimin A. V., Atadzhanova O. A., Romanenkov D. A., Repina I. A., Belonenko T. V., Ivanov V. V., Kharakteristiki mezomasshtabnykh vikhrei v Lofotenskoj kotlovine v nachale leta 2019 goda po dannym sudovykh i sputnikovykh nablyudenii (Characteristics of mesoscale vortices in the Lofoten Basin in the early summer of 2019 according to ship and satellite observations), *Materialy Semnadsatoi Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 17th All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 11–15 Nov. 2019, Moscow: IKI RAN, 2019, p. 267.
5. Ivanov V. V., Korablev A. A., Dinamika vnutripiknoklinnoi linzy v Norvezhskom more (The dynamics of the intraocnoclinic lens in the Norwegian Sea), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1995, No. 10, pp. 55–59.
6. Sandalyuk N. V., Belonenko T. V., Trekhmernaya struktura mezomasshtabnykh vikhrei v Lofotenskoj kotlovine: kompozitnyi analiz na osnove sopostavleniya in situ i sputnikovykh dannyykh, *Sovremennye problemy i perspektivy razvitiya rybokhozyaistvennogo kompleksa* (Modern Problems and Prospects for the Development of the Fishery Complex), Proc. 7th Scientific-Practical Conf. Young Scientists with Intern. Participation, Moscow: VNIRO, 2019, pp. 433–437.

7. Atadzhanova O. A., Zimin A. V., Analysis of the characteristics of the submesoscale eddy manifestations in the Barents, the Kara and the White Seas using satellite data, *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 36–45.
8. Bashmachnikov I. L., Sokolovskiy M. A., Belonenko T. V., Volkov D. L., Isachsen P. E., Carton X., On the vertical structure and stability of the Lofoten vortex in the Norwegian Sea, *Deep-Sea Research*, 2017, Vol. 128, pp. 1–27.
9. https://icdc.cen.uni-hamburg.de/fileadmin/user_upload/icdc_Dokumente/AVISO/hdbk_duacs.pdf.
10. Volkov D. L., Belonenko T. V., Foux V. R., Puzzling over the dynamics of the Lofoten — a sub-Arctic hot spot of ocean variability, *Geophysical Research Letters*, 2013, Vol. 40, No. 4, pp. 738–743.
11. Volkov D. L., Kubryakov A. A., Lumpkin R., Formation and variability of the Lofoten Basin vortex in a high resolution ocean model, *Deep-Sea Research*, 2015, Vol. 105, pp. 142–157.
12. Yu L.-S., Bosse A., Fer I., Orvik K. A., Bruvik E. M., Hessevik I., Kvalsund K., The Lofoten Basin eddy: Three years of evolution as observed by Seagliders, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2017, Vol. 122, pp. 6814–6834.
13. Zinchenko V. A., Gordeeva S. M., Sobko Yu. V., Belonenko T. V., Analysis of Mesoscale eddies in the Lofoten Basin based on satellite altimetry, *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 46–54.