

Термохалинная структура Лофотенского вихря Норвежского моря на основе экспедиционных исследований и по данным гидродинамического моделирования*

Т. В. Белоненко¹, А. В. Колдунов¹, Е. В. Сентябов², А. Л. Карсаков²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² Полярный НИИ морского рыбного хозяйства и океанографии (ПИНРО), Российская Федерация, 183038, Мурманск, ул. Книповича, 6

Для цитирования: Белоненко Т. В., Колдунов А. В., Сентябов Е. В., Карсаков А. Л. Термохалинная структура Лофотенского вихря Норвежского моря на основе экспедиционных исследований и по данным гидродинамического моделирования // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018. Т. 63. Вып. 4. С. 502–519. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.406>

Впервые рассматриваются материалы океанографических съемок в Лофотенской котловине, выполненных в ходе исследований в Норвежско-Гренландском бассейне на научно-исследовательском судне ПИНРО «Фритъоф Нансен» в июле 1998 г., в 2000–2002 и 2005 гг. Наблюдения на океанографических станциях велись в режиме непрерывного зондирования от поверхности моря до глубины 1000 м с последующим осреднением результатов через 1 м. В разные годы станции гидрологических разрезов располагались на различных расстояниях друг от друга — в диапазоне 20–30 миль. В работе анализируются данные ПИНРО по температуре и солёности на двух гидрологических разрезах, выполненных по координатам 69°20' и 70°00' с. ш. за июль 1998, 2000–2002 и 2005 гг. Эти разрезы сравниваются с подобными гидрологическими разрезами, построенными по данным реализации гидродинамической модели высокого разрешения MITgcm. Установлено, что наибольшие горизонтальные контрасты температуры и солёности характерны для Лофотенского вихря — области с размерами 180–200 миль по горизонтали и более 1000 м по вертикали, ее ядро расположено в слое 200–800 м глубины и имеет радиус 20–60 км. Установлено, что наряду с квазипостоянным Лофотенским вихрем в котловине наблюдаются мезомасштабные вихри, расположенные на глубине 50–500 м, пространственные масштабы и градиенты характеристик которых сравнимы с характеристиками Лофотенского. Распределения значений термохалинных характеристик, полученные по данным гидрологических разрезов ПИНРО и по модели MITgcm, в целом согласуются, но в большинстве случаев модельные данные имеют несколько большие зональные градиенты температуры и солёности. На основе прямого сравнения модельных данных и натурных измерений показано, что в указанные периоды данные MITgcm адекватно отражают гидрологические параметры акватории и могут использоваться для ретроспективного анализа вихревой активности Лофотенской котловины.

Ключевые слова: Норвежское море, Лофотенская котловина, Лофотенский вихрь, синоптические, мезомасштабные вихри, гидрологические разрезы, температура, солёность, MITgcm.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 18-17-00027. Авторы выражают благодарность Д. Л. Волкову и NASA Advanced Supercomputing (NAS) Division за данные, полученные в ходе реализации MITgcm.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2018

Введение

Лофотенская котловина Норвежского моря — один из самых динамически активных районов Мирового океана, который характеризуется локальными максимумами кинетической энергии синоптических (мезомасштабных) вихрей (рис. 1 и 2). В работе (Volkov et al., 2013) Лофотенская котловина названа «горячей точкой» северных морей, так как спутниковые альтиметрические наблюдения показывают нахождение здесь локального максимума дисперсии уровня моря. Будучи транзитной зоной для теплых и соленых атлантических водных масс на их пути к Северному Ледовитому океану, Лофотенская котловина играет важную роль в поддержании глобальной меридиональной циркуляции в области, где атлантические водные массы отдают тепло в атмосферу, перемешиваются с окружающими водами и претерпевают трансформацию, необходимую для образования глубинных вод, которая происходит в соседнем Гренландском море (Блошкина и Иванов, 2016; Köhl, 2007; Rossby et al., 2009a; Rossby et al., 2009b; Søyland et al., 2016; Volkov et al., 2013; Volkov et al., 2015). Динамическая активность по большей части обусловлена синоптическими вихрями, образующимися в Норвежском течении, переносящем атлантические воды к северу. Из-за баротропной и бароклинной неустойчивости Норвежского течения в его струе генерируется множество вихрей (в основном антициклонических), которые после формирования отрываются от течения и в дальнейшем перемещаются вдоль спиралевидной циклонической траектории, постепенно приближаясь к центру Лофотенской котловины (Volkov et al., 2015).

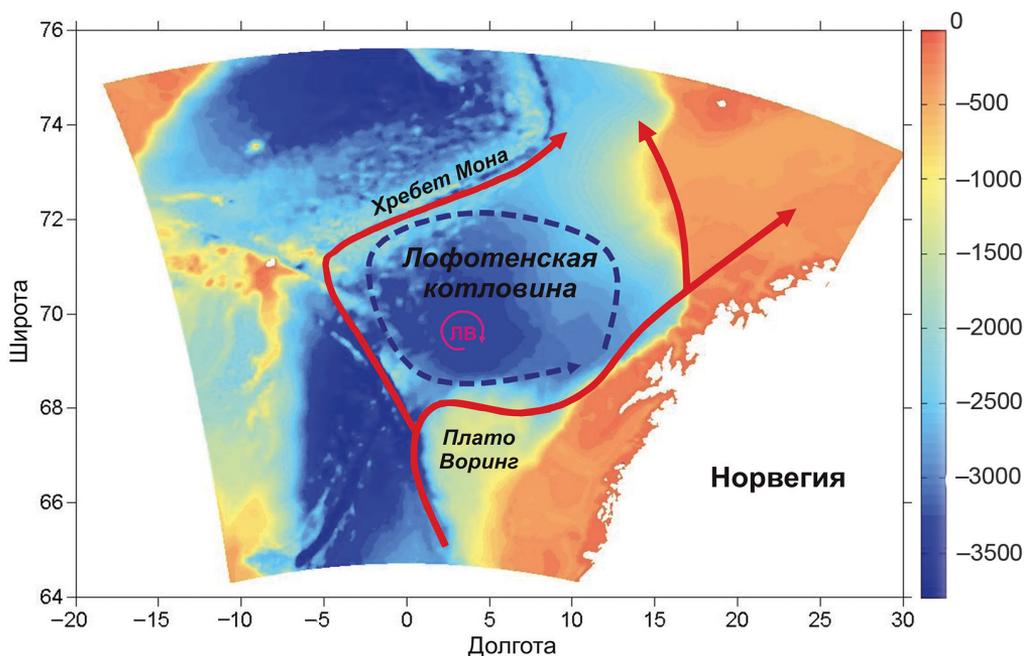


Рис. 1. Топографическая карта Лофотенской котловины

Справа дана шкала глубин, м; сплошные линии со стрелками — ветви Норвежского течения; пунктир — границы Лофотенской котловины; ЛВ — Лофотенский вихрь

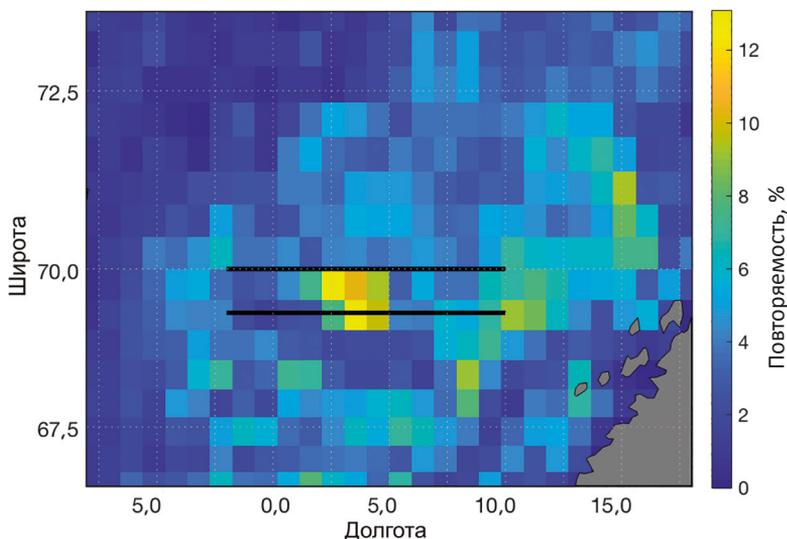


Рис. 2. Повторяемость антициклонических вихрей (Faghmous et al., 2015)
 Параллельные отрезки — расположение гидрологических разрезов вдоль 69°20' и 70°00' с. ш.

Лофотенская котловина, расположенная между 68–72° с. ш. и 2° з. д.–10° в. д., представляет собой понижение в рельефе дна Норвежского моря с максимальной глубиной 3250 м и является обособленным топографическим образованием, ограниченным хребтом Мона на северо-западе, Скандинавским п-вом на востоке и плато Воринг с юга. Основной элемент циркуляции вод Норвежского моря — теплое Норвежское течение, огибающее с запада и востока Лофотенскую котловину и переносящее атлантические воды в Северный Ледовитый океан (см. рис. 1). Важнейшие особенности циркуляции Лофотенской котловины — циклонический круговорот, распространяющийся вдоль изобат во всей толще вод, а также квазипостоянный антициклонический Лофотенский вихрь (ЛВ), расположенный в центре Лофотенской котловины. Он был открыт советскими океанологами в 1970–1980-х гг. в ходе гидрографических исследований, проводимых ААНИИ (см. библиографию в работе (Белоненко и др., 2014)), хотя косвенные свидетельства о существовании глубинной аномалии в этом районе встречаются уже в публикациях 1940-х гг. и даже в отчетах экспедиционных исследований начала XX века (см. (Алексеев и др., 2016)). Наиболее вероятное положение центра вихря — 70° с. ш. 3,5° з. д. (Søiland et al., 2016). В работе (Белоненко и др., 2014) указано определенное по данным гидродинамического моделирования точное положение Лофотенского квазипостоянного вихря в районе, ограниченном 69–70° с. ш. и 3–5° в. д. На рис. 2 показана повторяемость антициклонических вихрей на основе их автоматической идентификации по данным (Faghmous et al., 2015), где район ЛВ характеризуется максимальными значениями повторяемости.

ЛВ в настоящее время — один из самых изученных океанских вихрей и является природной лабораторией для исследования их динамики. Он представлен линзой теплой соленой воды на интервале глубин 300–1000 м с горизонтальным разме-

ром около 100 км (Башмачников и др., 2017; Белоненко и др., 2017; Bashmachnikov et al., 2017). Наличие ЛВ отмечается на всех горизонтах от поверхности до дна, но наиболее всего он проявляется в слое 300–800 м, где расположено его ядро. По результатам шести последовательных гидрологических съемок, выполненных в 1987–1988 гг., выявлено (Иванов и Кораблев, 1995) перемещение ядра антициклонического вихря по траектории, похожей на циклоническую. Расстояние между наиболее удаленными точками этой траектории составляло около 130 км, что, отметим, существенно меньше размера котловины (достигающей приблизительно 500 км в пределах изобаты 2000 м).

ЛВ — уникальный природный феномен, для которого зимняя конвекция создает благоприятные условия его ежегодной регенерации (Köhl, 2007; Блошкина и Иванов, 2016; Bashmachnikov и др., 2017). Другой механизм, позволяющий поддерживать в центре котловины высокую антициклоническую завихренность, — захват Лофотенским вихрем энергии мезомасштабных вихрей, отрывающихся от Норвежского течения (Kohl, 2007; Volkov et al., 2015).

1. Используемые данные

В работе впервые анализируются материалы океанографических съемок, полученных с борта научно-исследовательского судна «Фритьоф Нансен», принадлежащего ПИНРО (Полярный НИИ морского рыбного хозяйства и океанографии), в июне-июле 1998–2005 гг. При натурных исследованиях океанологами ПИНРО были использованы следующие STD-профилографы:

- в 1998 и 2000 гг. — MARK-III фирмы Neil Brown Instruments Systems, Inc. (диапазон измерения температуры: от -1 до 32°C , погрешность измерения: $\pm 0,005^{\circ}\text{C}$, диапазон измерения электрической проводимости: от 1 до 65 мСм/см, погрешность измерения: $\pm 0,005$ мСм/см);
- в 2001–2005 гг. — FSI 3rd фирмы Falmouth Scientific, Inc. (диапазон измерения температуры: от -2 до 32°C , погрешность измерения: $\pm 0,003^{\circ}\text{C}$, диапазон измерения электрической проводимости: от 0 до 65 мСм/см, погрешность измерения: $\pm 0,002$ мСм/см).

Океанографические станции выполнялись в режиме непрерывного зондирования от поверхности до глубины 1000 м с последующим осреднением через 1 м. Станции на разрезах в разные годы располагались на различных расстояниях от 20 до 30 миль. При построении вертикальных разрезов применялось программное обеспечение Surfer (метод сглаживания — Kriging), были заданы шаг по вертикали — 10 м, по горизонтали — $0,5^{\circ}$ по долготе (около 10 миль). В настоящей статье анализируются данные двух гидрологических разрезов в районе Лофотенской котловины: по $69^{\circ}20'$ и $70^{\circ}00'$ с. ш. за июль 1998, 2000–2002 и 2005 гг. (см. рис. 2).

Используются данные гидродинамической модели MITgcm (Massachusetts Institute of Technology general circulation model) в конфигурации ECCO2 (Estimating the Circulation and Climate of the Ocean, Phase II; <http://ecco2.jpl.nasa.gov>). Основная цель проекта ECCO2 (Nguyen et al., 2011) — комбинирование модели глобальной циркуляции с различными наблюдениями для того, чтобы количественно оценить изменяющееся во времени состояние океана. Глобальная конфигурация модели рассчитывается на сетке, представляющей собой так называемую кубическую сфе-

ру, когда поверхность Земли разделяется на шесть областей, составляющих грани куба. Такой подход позволяет получить сравнительно равномерное пространственное разрешение во всех модельных областях, а также избежать проблем, связанных со сгущением сетки на полюсах.

По вертикали модель MITgcm имеет 50 уровней (система z -координат) с толщиной, изменяющейся от 10 м у поверхности до 450 м в районе максимальной модельной глубины (около 6000 м). Батиметрия получена путем интерполяции на модельную сетку совмещенных данных батиметрических карт GEBCO (General Bathymetric Charts of the Oceans) и Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings (Smith and Sandwell, 1997) с пространственным разрешением в $1'$. В качестве уравнения состояния используется его нелинейная версия, предложенная в работе (Jackett and McDougal, 1995). Вертикальное перемешивание в модели рассчитывается согласно рекомендациям работы (Large et al., 1994). В качестве адвективной схемы используется вариант без явной горизонтальной диффузии (Daru and Tenaud, 2004). Горизонтальная вязкость представлена согласно работе (Leith, 1996) с модификацией согласно работе (Fox-Kemper and Menemenlis, 2008).

Для разгона модели использовались данные реанализа JRA25 (Japanese 25-year Reanalysis Project)¹ с 1992 по 2001 г. Начальные условия брались из базы данных World Ocean Atlas 2009 (Locarnini et al., 2010; Antonov et al., 2010). В качестве атмосферных граничных условий в модели также использовались данные реанализа JRA25. Каждые 6 ч пробега модели значения приповерхностного ветра, температуры, влажности, нисходящей коротко- и длинноволновой радиации, а также осадки переводились в потоки тепла, пресной воды и ветрового напряжения в соответствии с работой (Large and Yeager, 2004). Ежемесячные климатологические значения речного стока взяты из базы данных ARDB (Arctic Runoff Database²). Расчет модели начинается с 1992 г., поскольку только начиная с этого времени доступны океанические граничные условия проекта ECCO2.

Согласно (Marshall et al., 1997), MITgcm — одна из лучших современных моделей для исследования вихревой динамики, так как ее начали разрабатывать сравнительно недавно, с середины 1990-х гг., что позволило заложить в нее некоторые новые технологические возможности и идеи специалистов Массачусетского технологического института (США) в области вычислительной гидродинамики. Описание этой модели можно также найти в работе (Колдунов и др., 2015). Для дальнейшего анализа мы использовали данные численного моделирования (прогон) с пространственным разрешением 4 км и временной дискретностью 7 сут за июль 1998, 2000–2002 и 2005 гг.

2. Методы и результаты

Гидрологические разрезы ПИНРО по $69^{\circ}20'$ и $70^{\circ}00'$ с. ш. в районе ЛВ сравниваются с аналогичными разрезами, построенными по данным модели MITgcm. Так как недельная дискретность модели не позволяет получить полностью син-

¹ См. http://jra.kishou.go.jp/JRA-25/index_en.html (дата обращения: 03.12.2018).

² См. https://www.bafg.de/GRDC/EN/04_spcldtbss/41_ARDB/ardb.html (дата обращения: 03.12.2018).

хронные данные, мы выбрали даты, наиболее близкие к датам съемок *in situ*. В таблице приведены даты выполнения гидрологических разрезов ПИНРО, а также даты, для которых выбраны данные численного моделирования для тех же разрезов.

Таблица. Сроки выполнения гидрологических разрезов ПИНРО и данных моделирования

Год	Гидрологический разрез		Модельные данные разрезов по 70°00' и 69°20' с. ш.
	по 70°00' с. ш.	по 69°20' с. ш.	
1998	19–21 июля	21–23 июля	22 июля
2000	23–25 июля	25–26 июля	26 июля
2001	13–15 июля	15–18 июля	11 июля
2002	11–13 июля	5–8 июля	10 июля
2005	3–5 июля	5–8 июля	6 июля

Установлено, что на гидрологических разрезах, пересекающих Лофотенскую котловину по 70°00' и 69° 20' с. ш., в распределении температуры и солёности в районе ЛВ обнаружены линзообразные структуры, проявляющиеся в заглуплениях изотерм и изохалин до 800–1000 м. Указанные особенности проявляются по результатам наблюдений на гидрологических разрезах ПИНРО, а также на разрезах, построенных по модельным данным.

Проанализируем более подробно эти разрезы (рис. 3–6).

В **1998 г.** ЛВ отчетливо выражен на графиках температуры и солёности с ядром в районе примерно 70°00' с. ш., 3°30' в. д. Это ядро выделяется изотермой 4°C, и начиная с 250 м заглупляется до 800 м (рис. 3). На графиках солёности (рис. 4) изотерме 4°C в ядре вихря соответствует изохалина 35,1, заглупляющаяся также на 800 м. Очевидно, его ось находилась в непосредственной близости от 70° с. ш., так как южнее, на разрезе 69°20' с. ш., наблюдались заглупления соответствующих изолиний до 400 м, очевидно, характеризующие периферию ЛВ.

К сожалению, разрез по 69°20' с. ш. был выполнен не целиком, а до 4°30' в. д., поэтому на нем отсутствует вихревое образование в районе 7–8° в. д., характеризующееся заглуплением изолиний до 1000 м, которое есть на модельных данных (рис. 5 и 6).

В **2000 г.** линза ЛВ с ядром в районе 3° в. д. хорошо просматривается на гидрологическом разрезе по 70° с. ш. (рис. 3 и 4). Изотерма 4°C углубляется более чем на 800 м, ограничивая область максимальных градиентов температуры. Положение изохалины 35,1 почти совпадает с положением этой изотермы. Можно предполагать, что в 2000 г. главная ось ЛВ располагалась в районе 70° с. ш., 3° в. д. Отметим, что в модельных данных линза с ядром в районе 70° с. ш., 3° в. д. гораздо менее выражена (рис. 4 и 5). Заглупление изолиний на 3° в. д. также присутствует, но не так выражено, как это характерно для вихря.

На разрезе 69°20' с. ш. к востоку от ЛВ на гидрологическом разрезе (рис. 3 и 4) в районе 9° в. д. хорошо виден еще один вихрь с ядром, расположенным близко

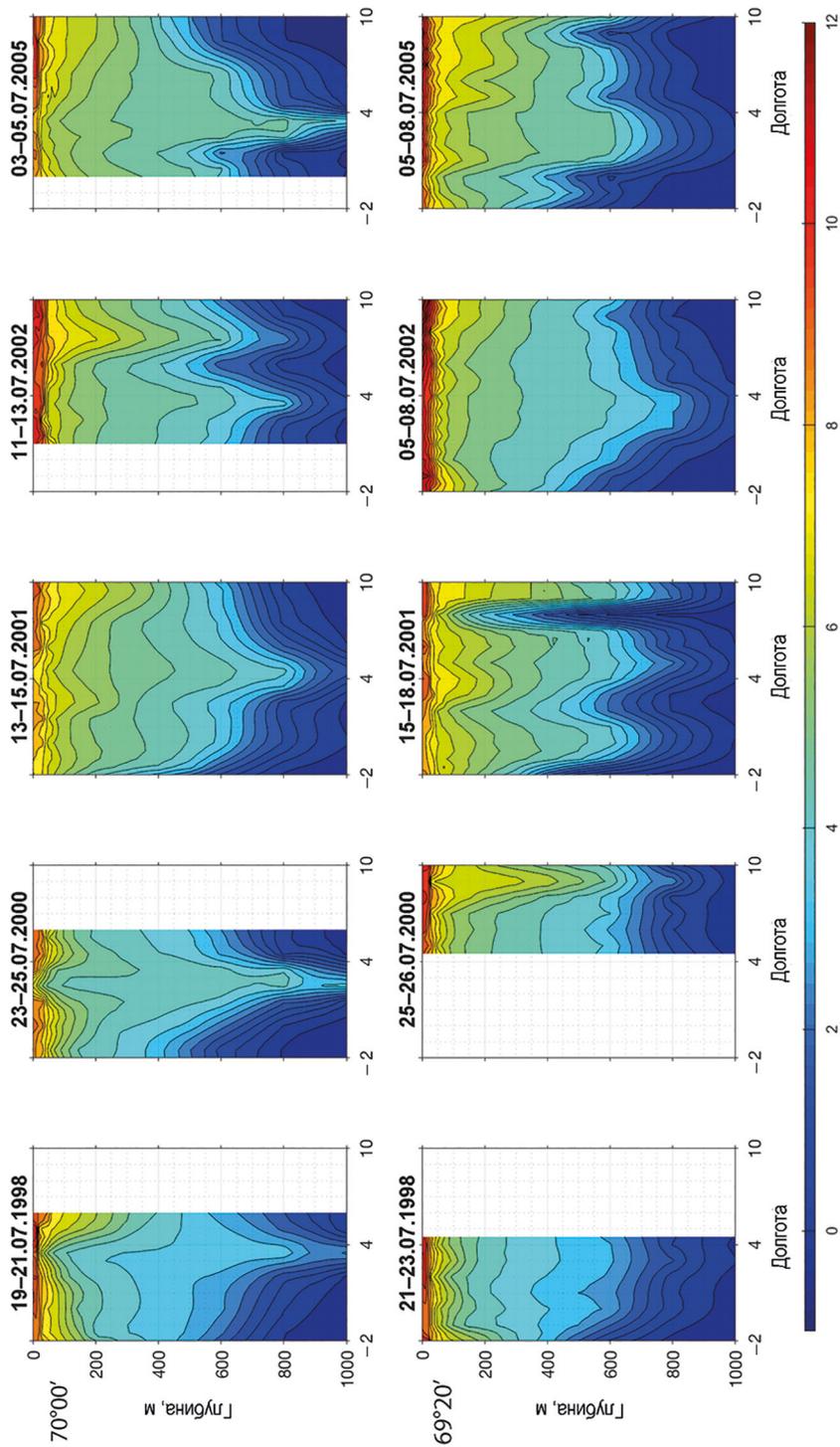


Рис. 3. Температура воды (°C), измеренная на разрезах по 70°00' и 69°20' с. ш. в июле 1998, 2000, 2001, 2002 и 2005 гг.

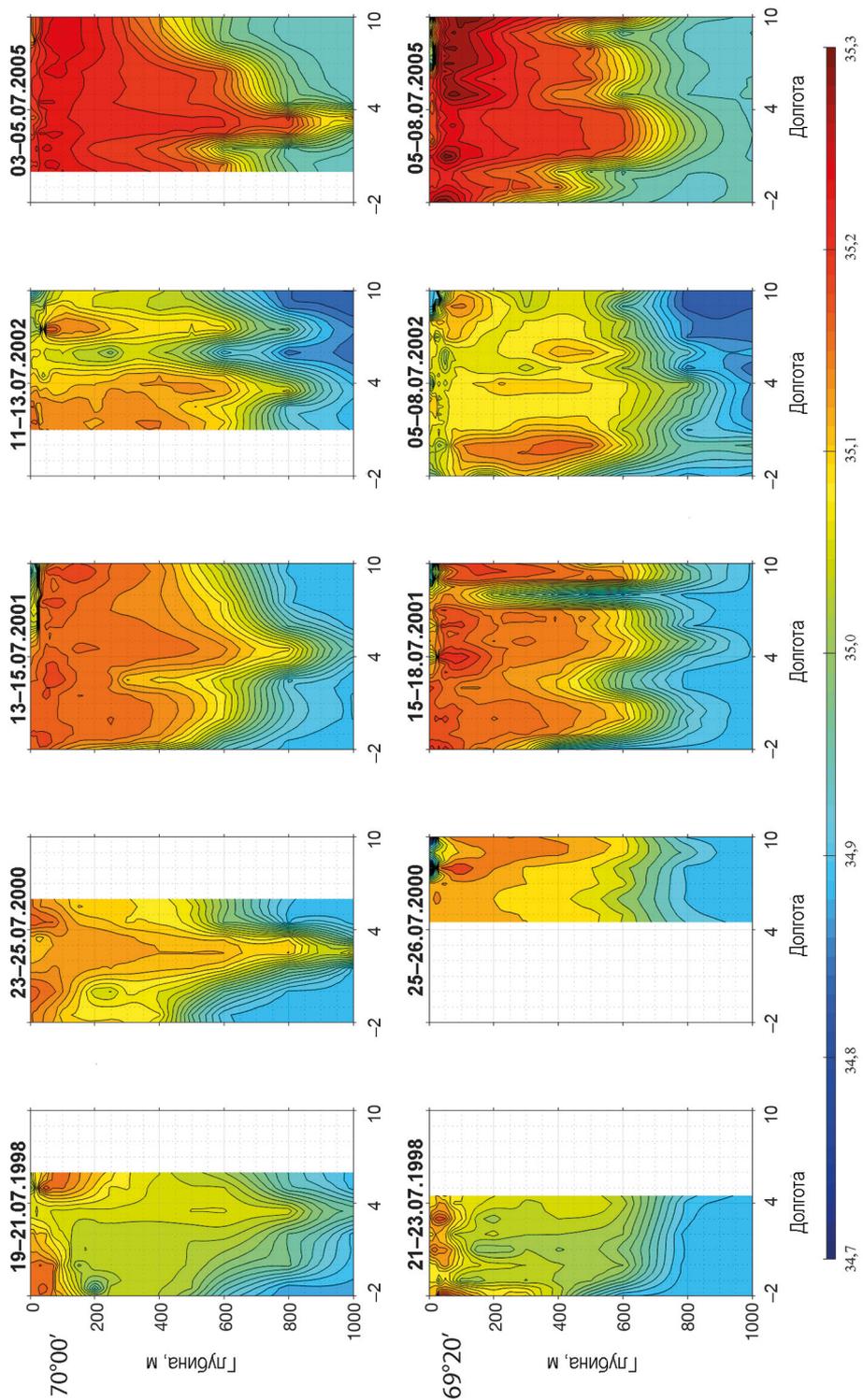


Рис. 4. Соленость воды, измеренная на разрезах по 70°00' и 69°20' с. ш. в июле 1998, 2000, 2001, 2002 и 2005 гг.

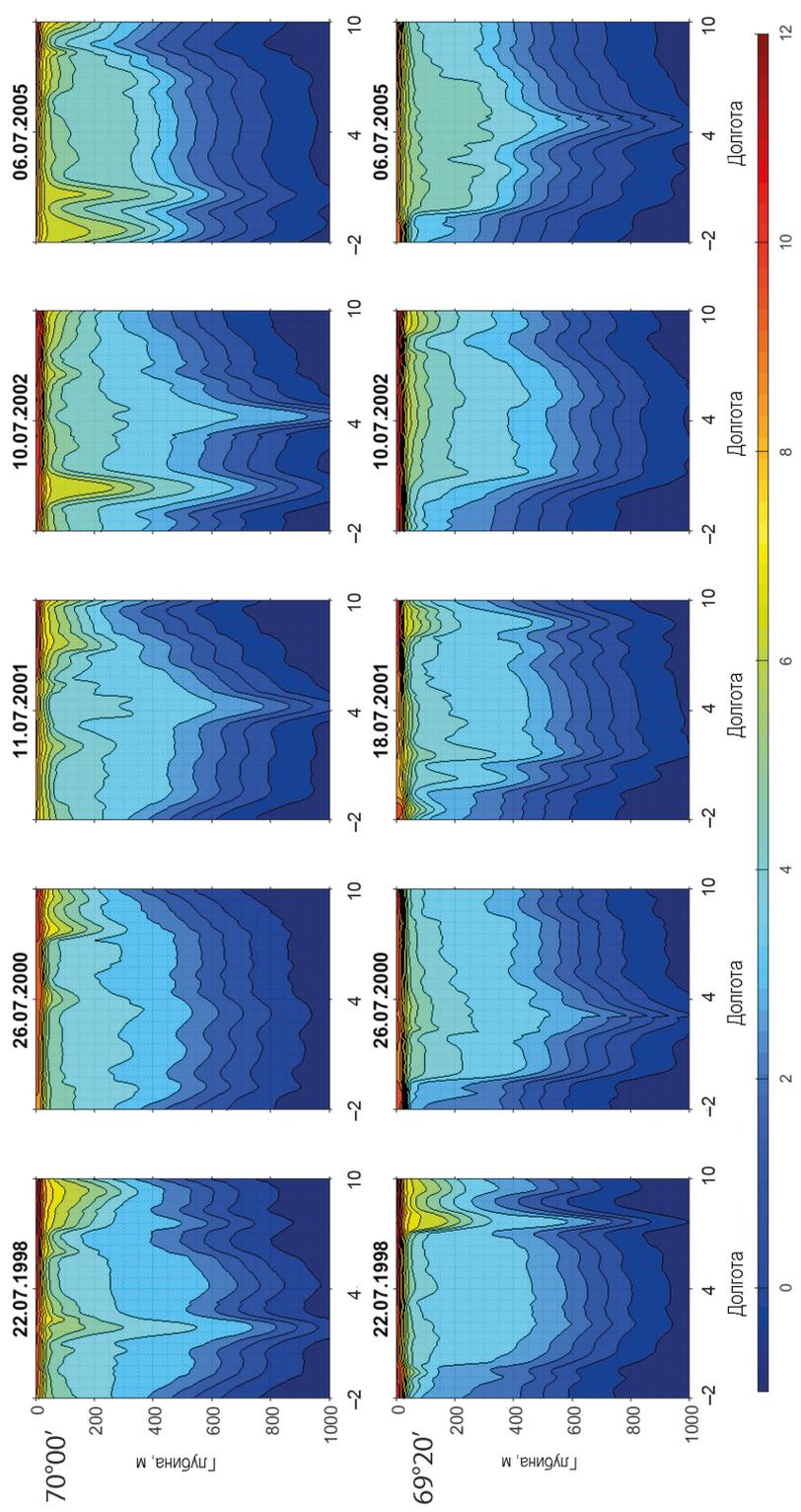


Рис. 5. Профили температуры (°С), построенные на разрезах по 70°00' и 69°20' с. ш. на основе численной реализации гидродинамической модели МПГсм для июля 1998, 2000, 2001, 2002 и 2005 гг.

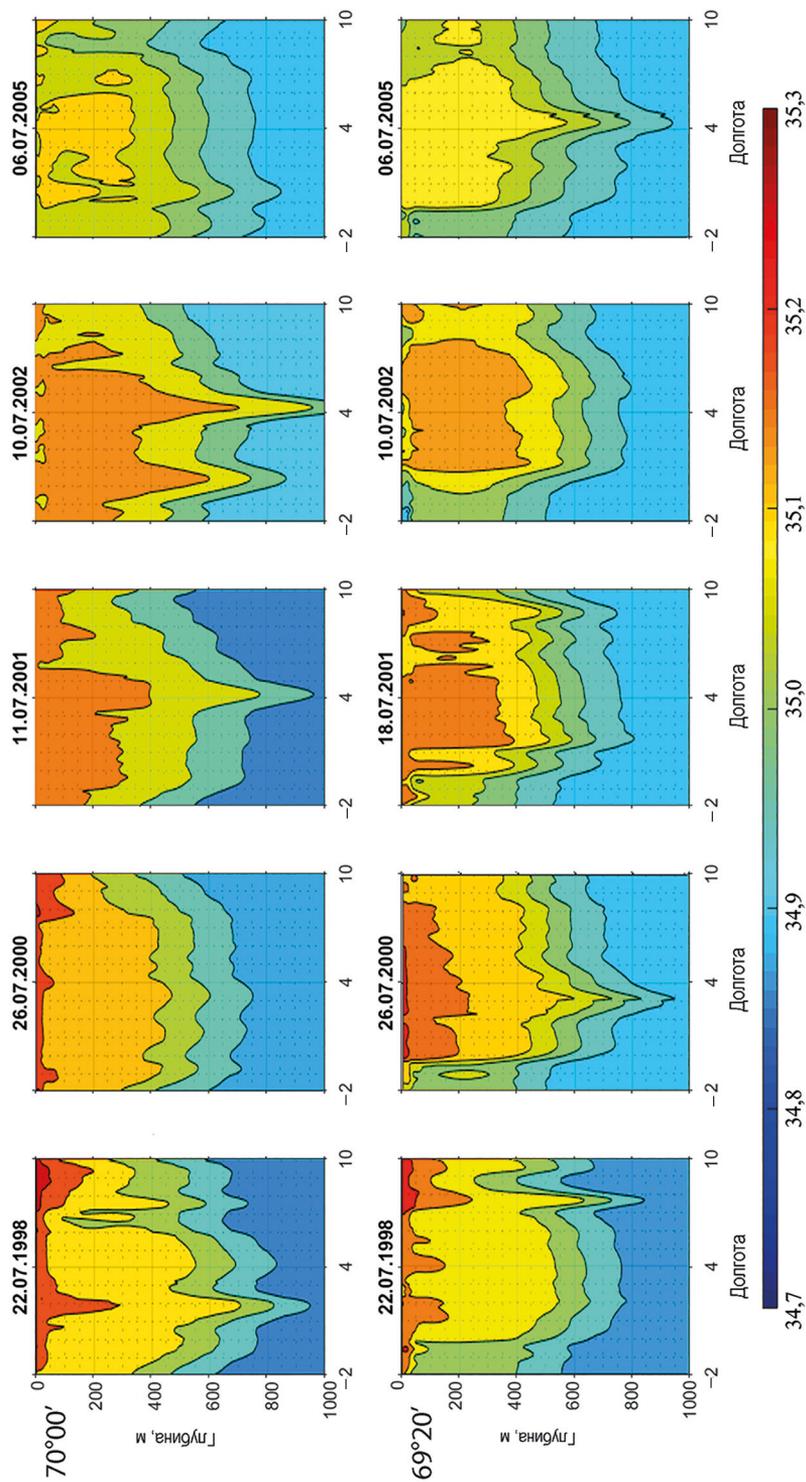


Рис. 6. Профили солёности воды, построенные на разрезах по 70°00' и 69°20' с. ш. на основе численной реализации гидродинамической модели МГГсм для июля 1998, 2000, 2001, 2002 и 2005 гг.

к поверхности океана и заглубленным примерно до 700 м. Однако на разрезах, построенных по модельным данным, этот вихрь отсутствует (рис. 5 и 6).

В 2001 г. на разрезе 70° с. ш. вытянутая горизонтально линза ЛВ, ядро которой, очевидно, расположено в районе $4-5^{\circ}$ в. д., одинаково хорошо выделяется и по натурным данным, и по модельным (см. рис. 3–6). Изолинии практически повторяют друг друга. Изотерма 4°C заглубляется до 800 м, изохалина 35,1 достигает глубины 700 м.

На гидрологическом разрезе $69^{\circ}20'$ с. ш. наблюдаются два других вихря: в районе $0-1^{\circ}$ в. д. и $4-6^{\circ}$ в. д., которые едва показаны на модельных данных из-за меньших зональных градиентов термохалинных характеристик, хотя некоторое заглубление изолиний до 500 м может свидетельствовать в пользу обнаружения здесь вихревых образований (рис. 5 и 6).

В 2002 г. на разрезе по 70° с. ш. по вертикальному распределению температуры и солёности *in situ* (рис. 3 и 4) мы можем выделить два вихревых образования с центрами на $3-4^{\circ}$ в. д. и на 8° в. д. На графиках, построенных по модели, вихрь с центром $3-4^{\circ}$ в. д. также присутствует, но нет вихря на 8° в. д. Этот вихрь включает в себя распресненную воду с повышенными значениями температуры. ЛВ на гидрологическом разрезе по 70° с. ш. не виден, так как остался не охваченным наблюдениями. По модельным данным, ядро ЛВ проходит в районе $0-1^{\circ}$ в. д., заглубляясь до 600 м.

На гидрологическом разрезе по $69^{\circ}20'$ с. ш. в районе 3° в. д. наблюдается заглубление изотерм, в частности изотермы 4°C до 650 м (рис. 3), при этом на графике солёности вихри практически не определяются (рис. 4). На модельных данных выделяется значительное по площади вихревое образование, заглубленное до 400–500 м.

В 2005 г. на гидрологическом разрезе по 70° с. ш. ЛВ хорошо выделяется в районе $3-4^{\circ}$ в. д. Ядро вихря заглубляется почти на 1000 м (рис. 2 и 3). На разрезе, построенном по модельным данным, ЛВ расположен западнее, на $3-4^{\circ}$ в. д., а ядро, характеризующееся изотермой 4°C и изохалиной 35,1, расположено на меньшей глубине — 500–600 м. На модельных данных на участке $1-2^{\circ}$ з. д. виден еще один вихрь, который, к сожалению, не охвачен натурными наблюдениями.

На разрезе $69^{\circ}20'$ с. ш. ЛВ присутствует также в районе $3-4^{\circ}$ в. д., заглубляясь до 700–800 м (рис. 3 и 4). Но на модельных данных, где представлен ЛВ, он расположен на 1° к востоку: на $4-5^{\circ}$ в. д. (рис. 5 и 6).

На рис. 7 показаны графики температуры и солёности по разрезу 70° с. ш. для 2001 г. Видно, что MITgcm замечательно моделирует термохалинную структуру рассматриваемого бассейна: ЛВ практически одинаково представлен и по измерениям *in situ*, и по модельным данным. По другим разрезам сходство *in situ* и модельных данных существенно хуже, однако в целом также наблюдается неплохое соответствие распределений термохалинных характеристик. При этом, как видно из рис. 3–6, во многих случаях модельные данные в разрезах имеют несколько большие зональные градиенты и «более острые» наклоны изолиний. Наше исследование подтверждает вывод авторов работ (Köhl, 2007; Volkov et al., 2013; Volkov et al., 2015) о том, что модель MITgcm позволяет в целом описать структуру ЛВ и может быть использована для исследования вихревой динамики в котловине.

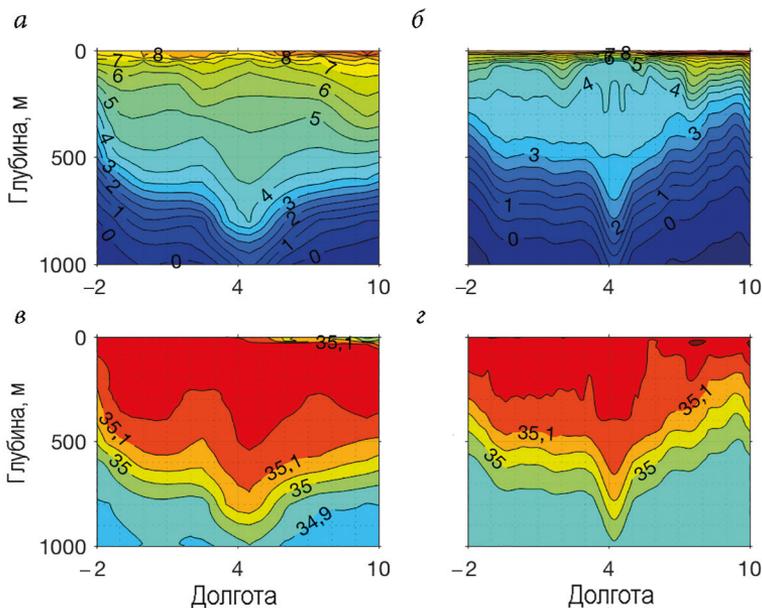


Рис. 7. Значения температуры ($^{\circ}\text{C}$; а, в) и солёности (б, г) на разрезе по $70^{\circ}00'$ с. ш. по натурным (измеренным 13–15 июля 2001 г.) и модельным (рассчитанным для 11 июля 2001 г.) данным

3. Обсуждение

В ходе исследований, проводившихся океанологами ПИНРО в Норвежско-Гренландском бассейне в июне-июле 1998–2005 гг. (Сентябов, 2000; Сентябов, 2009; Сентябов, 2010; Prokorchuk and Sentyabov, 2006) и включавших регулярное выполнение в июле 1998, 2000–2002 и 2005 гг. двух гидрологических разрезов: по $69^{\circ}20'$ и $70^{\circ}00'$ с. ш. в северной части моря в районе ЛВ, было установлено, что наибольшие горизонтальные контрасты температуры и солёности характерны для слоя 600–800 м. Анализ данных гидрологических разрезов ПИНРО, проведенных в июле 1998, 2000–2002 и 2005 гг., показывает, что в Лофотенской котловине наряду с квазипостоянным ЛВ также присутствуют и другие вихри. Именно интенсивная вихревая активность выделяет эту котловину среди соседних бассейнов. Мористее Лофотенских о-вов, где континентальный склон исключительно крутой, восточная ветвь Норвежского течения — Норвежское Атлантическое склоновое течение (Mork and Skagseth, 2010; Volkov et al., 2015) становится неустойчивым и порождает антициклонические вихри (Ikeda et al., 1989; Johannessen et al., 1989; Köhl, 2007; Rossby et al., 2009b), которые отрываются от основного течения и дрейфуют вдоль циклонической траектории по направлению к центру бассейна (Volkov et al., 2013, 2015; Raj et al., 2016). Таким образом вихри Лофотенской котловины извлекают теплую и солёную атлантическую воду из Норвежского течения и распространяют ее по всему бассейну. Непрерывные процессы формирования и дрейфа вихрей приводят к общему углублению изотерм в котловине, в частности в самой глубоководной ее части, где приходящие и сливающиеся друг с другом вихри формируют и под-

держивают квазипостоянный антициклонический круговорот, известный как Лофотенский вихрь.

Хорошо известно, что Лофотенская котловина — основной резервуар тепла (Rossby et al., 2009a) и наиболее динамически активная область северной Атлантики (Volkov et al., 2013). Будучи транзитной зоной для теплых и соленых атлантических водных масс на их пути к Северному Ледовитому океану, она играет важную роль в поддержании глобальной меридиональной циркуляции в области, где атлантические водные массы отдают тепло в атмосферу, перемешиваются с окружающими водами и претерпевают трансформацию, приобретая свойства глубинных вод. Не исключено, что мезомасштабные вихри, которые мы проанализировали наряду с ЛВ по данным гидрологических разрезов, дрейфуют к западу по направлению к ЛВ, поглощаются в нем ЛВ и подпитывают его кинетической энергией. Эти вихри переносят теплые и соленые воды Норвежского течения в центр Лофотенской котловины. Хотя важная роль синоптической изменчивости в котловине широко признана, в настоящее время полностью отсутствуют количественные оценки тепла и соли, содержащихся в вихревых структурах, притом что сам регион благодаря своим специфическим термодинамическим свойствам привлекает пристальное внимание исследователей. Один из основных неисследованных вопросов — в какой степени синоптические вихри воздействуют на меридиональный перенос тепла. Наше исследование, проведенное на основе данных наблюдений на уникальных гидрологических разрезах, а также их сравнения с полями температуры и солёности по модельным данным, показывает, что пространственные масштабы вихрей, отрывающихся от Норвежского течения, сопоставимы с масштабами самого ЛВ. Следовательно, оценки количества переносимых этими вихрями тепла и соли, как и воздействие их на меридиональные переносы тепла и соли к Северному Ледовитому океану, могут быть весьма значительными.

Выводы

Впервые проанализированы и введены в научный оборот материалы гидрологических съемок в Лофотенской котловине, выполненных исследователями из ПИНРО в июле 1998, 2000–2002 и 2005 гг. Данные этих наблюдений сравниваются с аналогичными данными гидродинамической модели высокого разрешения MITgcm. Установлено, что наибольшие горизонтальные контрасты температуры и солёности характерны для области ЛВ с размерами 180–200 миль по горизонтали и более 1000 м по вертикали, ядро которого расположено в слое глубин 200–800 м и имеет радиус от 20 до 60 км.

По измерениям *in situ* и модельным данным показано, что наряду с квазипостоянным ЛВ в котловине наблюдаются мезомасштабные вихри, расположенные на глубине 50–500 м, в которых пространственные масштабы и градиенты термохалинных характеристик сравнимы с характеристиками для ЛВ.

Распределения значений термохалинных характеристик по данным гидрологических разрезов ПИНРО и по модели MITgcm в целом согласуются, хотя в большинстве случаев модельные данные имеют несколько большие зональные градиенты температуры и солёности.

На основе прямого сравнения модельных данных и натуральных измерений показано, что в период описанных исследований данные MITgcm адекватно отражают гидрологические параметры акватории и могут быть использованы для ретроспективного анализа вихревой активности Лофотенской котловины.

Литература

- Алексеев, В. А., Иванов, В. В., Репина, И. А., Лаврова, О. Ю., Станичный, С. В., 2016. Конвективные структуры в Лофотенской котловине по данным спутников и буев Арго. Исследование Земли из космоса 1–2, 90–104.
- Башмачников, И. Л., Белоненко, Т. В., Куйбин, П. А., 2017. Приложение теории колоннообразных Q-вихрей с винтовой структурой к описанию динамических характеристики Лофотенского вихря Норвежского моря. Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле 62(3), 221–336. URL: <https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2017.301>.
- Белоненко, Т. В., Башмачников, И. Л., Колдунов, А. В., Куйбин, П. А., 2017. О вертикальной компоненте скорости в Лофотенском вихре Норвежского моря. Известия РАН. Физика атмосферы и океана 53(6), 728–737. URL: <https://doi.org/10.7868/S0003351517060071>.
- Белоненко, Т. В., Волков, Д. Л., Ожигин, В. К., Норден, Ю. Е., 2014. Циркуляция вод в Лофотенской котловине Норвежского моря. Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7. Геология. География (2), 108–121.
- Блошкина, Е. В., Иванов, В. В., 2016. Конвективные структуры в Норвежском и Гренландском морях по результатам моделирования с высоким пространственным разрешением. Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации 361, 146–168.
- Иванов, В. В., Кораблев, А. А., 1995. Динамика внутритропикной клинны в Норвежском море. Метеорология и гидрология 10, 55–62.
- Колдунов, А. В., Колдунов, Н. В., Волков, Д. Л., Белоненко, Т. В., 2015. Применение спутниковых данных для валидации гидродинамической модели Северного Ледовитого океана. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса 12(6), 111–124, 178–187.
- Сентябов, Е. В., 2000. Колебания теплового состояния вод Норвежского моря во второй половине 1990-х гг. и их влияние на распределение пелагических рыб. Материалы отчет. сессии ПИНРО по итогам научно-исслед. работ в 1998–1999 гг. 1. ПИНРО, Мурманск.
- Сентябов, Е. В., 2009. Межгодовые изменения океанографических условий в Норвежском море и их влияние на распределение пелагических рыб. URL: <http://www.dissercat.com/content/mezhgodovye-izmeneniya-okeanograficheskikh-uslovii-v-norvezhskom-more-i-ikh-vliyanie-na-rasp> (дата обращения: 03.12.2018).
- Сентябов, Е. В., 2010. Закономерности пространственного распределения термохалинных характеристик на стандартных разрезах в южной части Норвежского моря. Вопросы промысловой океанологии 7(1), 189–205.
- Antonov, J. I., Seidov, D., Boyer, T. P., Locarnini, R. A., Mishonov, A. V., Garcia, H. E., Baranova, O. K., Zweng, M. M., Johnson, D. R., 2010. Salinity, in: World Ocean Atlas 2009 Series 2 / Levitus, S. (ed.) U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Bashmachnikov, I., Sokolovskiy, M. A., Belonenko, T. V., Volkov, D. L., Isachsen, P. E., Carton, X., 2017. On the vertical structure and stability of the Lofoten vortex in the Norwegian Sea, Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers 128, 1–27. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2017.08.001>.
- Daru, V., Tenaud, C., 2004. High order one-step monotonicity preserving schemes for unsteady compressible flow calculations. Journal of Computational Physics 193(2), 563–594. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2003.08.023>.
- Faghmous, J. H., Frenger, I., Yao, Y., Warmka, R., Lindell, A., Kumar, V., 2015. Data from: A daily global mesoscale ocean eddy dataset from satellite altimetry. URL: <https://doi.org/10.5061/druad.gp40h> (дата обращения: 14.01.2019).
- Fox-Kemper, B., Menemenlis, D., 2008. Can large eddy simulation techniques improve mesoscale rich ocean models? Ocean Modeling in an Eddy Regime 177, 319–338. URL: <https://doi.org/10.1029/177GM19>.
- Ikeda, M., Johannessen, J. A., Lygre, K., Sandven, S., 1989. A process study of mesoscale meanders and eddies in the Norwegian Coastal current. Journal of Physical Oceanography 19, 20–35.

- Jackett, D. R., McDougall, T. J., 1995. Minimal adjustment of hydrographic profiles to achieve static stability. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 12, 381–389.
- Johannessen, J. A., Svendsen, E., Sandven, S., Johannessen, O. M., 1989. Three dimensional structure of mesoscale eddies in the Norwegian Coastal Current. *Journal of Physical Oceanography* 19, 3–19.
- Köhl, A., 2007. Generation and stability of a quasi-permanent vortex in the Lofoten Basin. *Journal of Physical Oceanography* 37, 2637–2651. URL: <http://dx.doi.org/10.1175/2007JPO3694>.
- Large, W. G., McWilliams, J. C., Doney, S., 1994. Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Reviews of Geophysics* 32(4), 363–403.
- Large, W., Yeager, S., 2004. Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea-ice models: The data sets and flux climatologies, in: Tech. Note NCAR/TN-460+STR. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado. URL: <http://dx.doi.org/10.5065/D6KK98Q6>.
- Leith, C. E., 1996. Stochastic models of chaotic systems. *Physica D: Nonlinear Phenomena* 98(2–4), 481–491. URL: [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(96\)00107-8](https://doi.org/10.1016/0167-2789(96)00107-8).
- Locarnini, R. A., Mishonov, A. V., Antonov, J. I., Boyer, T. P., Garcia, H. E., Baranova, O. K., Zweng, M. M., Johnson, D. R., 2010. Temperature, in: Levitus, S. (ed.). *World Ocean Atlas 2009 Series 1*. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Marshall, J., Adcroft A., Hill C., Perelman L., Heisey C., 1997. A finite-volume, incompressible Navier—Stokes model for studies of the ocean on parallel computers. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 102(C3), 5753–5766. URL: <https://doi.org/10.1029/96JC02775>.
- Mork, K. A., Skagseth, Ø., 2010. A quantitative description of the Norwegian Atlantic Current by combining altimetry and hydrography. *Ocean Science* 6, 901–911. <https://doi.org/10.5194/os-6-901-2010>.
- Nguyen, A. T., Menemenlis, D., Kwok, R., 2011. Arctic ice-ocean simulation with optimized model parameters: Approach and assessment. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 116(C4), C04025. URL: <https://doi.org/10.1029/2010JC006573>.
- Prokopchuk, I., Sentyabov, E., 2006. Diet of spring-spawning herring, mackerel and blue whiting related to *Calanus finmarchicus* distribution and hydrography in the Norwegian Sea. *ICES Journal of Marine Science* 63, 117–127.
- Raj, R. P., Johannessen, J. A., Eldevik, T., Nilsen, J. E. Ø., Halo, I., 2016. Quantifying mesoscale eddies in the Lofoten Basin. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 121(7), 4503–4521. URL: <https://doi.org/10.1002/2016JC011637>.
- Rosby, T., Ozhigin, V., Ivshin, V., Bacon, S., 2009a. An isopycnal view of the Nordic seas hydrography with focus on properties of the Lofoten Basin. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 56, 1955–1971.
- Rosby, T., Prater, M. D., Søiland, H., 2009b. Pathways of inflow and dispersion of warm waters in the Nordic seas. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 114(C4), C04011. URL: <https://doi.org/10.1029/2008JC005073>.
- Smith, W. H. F., Sandwell, D. T., 1997. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science* 277(5334), 1956–1962.
- Søiland, H., Chafik, L., Rosby, T., 2016. On the long-term stability of the Lofoten Basin Eddy. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 121(7), 4438–4449. URL: <https://doi.org/10.1002/2016JC011726>.
- Volkov, D. L., Belonenko, T. V., Foux, V. R., 2013. Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin — a sub-Arctic hot spot of ocean variability. *Geophysical Research Letters* 40(4), 738–743. URL: <https://doi.org/10.1002/grl.50126>.
- Volkov, D. L., Kubryakov, A., Lumpkin, R., 2015. Formation and variability of the Lofoten Basin vortex in a high-resolution ocean model. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 105, 142–157. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.09.001>.

Статья поступила в редакцию 28 апреля 2018 г.
Статья рекомендована в печать 15 октября 2018 г.

Контактная информация:

Белоненко Татьяна Васильевна — btvlisab@yandex.ru
Колдунов Алексей Владимирович — a.koldunov@gmail.com
Сентябов Евгений Валериевич — sentyab@pinro.ru
Карсаков Алексей Леонидович — karsakov@pinro.ru

Thermohaline structure of the Lofoten vortex in the Norwegian Sea based on in-situ and model data

T. V. Belonenko¹, A. V. Koldunov¹, E. V. Sentyabov², A. L. Karsakov²

¹ St. Petersburg State University,

7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² Polar Research Institute (PINRO),

6, ul. Knipovich, Murmansk, 183763, Russian Federation

For citation: Belonenko T. V., Koldunov A. V., Sentyabov E. V., Karsakov A. L. Thermohaline structure of the Lofoten vortex in the Norwegian Sea based on in-situ and model data. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2018, vol. 63, issue 4, pp. 502–519. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.406> (In Russian)

For the first time, the materials of oceanographic measurements in the Lofoten basin, made by oceanographers from the Knipovich Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography (PINRO, Murmansk, Russia) from the “Fridtjof Nansen” research ship in July 1998, 2000–2002 and 2005 during the investigations in the Norwegian and Greenland seas. We compare these materials with thermohaline sections for the same periods deriving from the MITgcm simulation. We found that the greatest horizontal contrasts of temperature and salinity are characteristic of a region with dimensions of 180–200 miles horizontally and more than 1000 m vertically, and the core of the Lofoten vortex is located in a layer at the depth of 200–800 m and has a radius varying from 20 to 60 km. It is established that apart from the quasi-permanent Lofoten vortex, many mesoscale vortices located at a depth between 50–500 m are observed in the basin, spatial scales and characteristic gradients of which can be compared to the characteristics of the Lofoten vortex. The distribution of thermohaline characteristic values according to the PINRO hydrological sections and the MITgcm model generally correspond to each other, but in the most considered cases the model data are slightly larger in zonal gradients of temperature and salinity. Based on a direct comparison of model data and field measurements, it is shown that in the considered periods the MITgcm data adequately reflect the hydrological parameters of the water area and can be used for retrospective analysis of the vortex activity in the Lofoten basin.

Keywords: Norwegian Sea, Lofoten basin, Lofoten vortex, synoptic, mesoscale eddies, hydrological sections, temperature, salinity, MITgcm.

References

- Alexeev, V. A., Ivanov, V. V., Repina, I. A., Lavrova, O. Yu., Stanichny, S. V., 2016. Konvektivnye struktury v Lofotenskoj kotlovine po dannym sputnikov i buev Argo [Convective Structures in Lofoten Basin from Remote Sensing Data and Argo Floats]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth exploration from space]* 1–2, 90–104. (In Russian)
- Antonov, J. I., Seidov, D., Boyer, T. P., Locarnini, R. A., Mishonov, A. V., Garcia, H. E., Baranova, O. K., Zweng, M. M., Johnson, D. R., 2010. Salinity, in: Levitus, S. (ed.) *World Ocean Atlas 2009 Series 2*. U. S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Bashmachnikov, I. L., Belonenko, T. V., Kuibin, P. A., 2017. Prilozhenie teorii kolonnoobraznykh Q-vikhrei s vintovoi strukturoi k opisaniiu dinamicheskikh kharakteristiki Lofotenskogo vikhria Norvezhskogo moria [Application of the theory of columnar Q-vortices with helical structure to the description of the dynamic characteristics of the Lofoten vortex of the Norwegian Sea]. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences* 62(3), 221–336. Available at: <https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2017.301>. (In Russian).
- Bashmachnikov, I., Sokolovskiy, M. A., Belonenko, T. V., Volkov, D. L., Isachsen, P. E., Carton, X., 2017. On the vertical structure and stability of the Lofoten vortex in the Norwegian Sea, *Deep Sea Research Part I. Oceanographic Research Papers* 128, 1–27. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2017.08.001>.

- Belonenko, T. V., Bashmachnikov, I. L., Koldunov, A. V., Kuibin, P. A., 2017. O vertikal'noi komponente skorosti v Lofotenskom vikhre Norvezhskogo moria [On the Vertical Velocity Component in the Mesoscale Lofoten Vortex of the Norwegian Sea]. *Izvestiia RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics] 53(6), 641–649. <https://doi.org/10.1134/S0001433817060032>.
- Belonenko, T. V., Volkov, D. L., Ozhigin, V. K., Norden, Yu. E., 2014. Tsirkulatsiia vod v Lofotenskoj kotlovine Norvezhskogo moria [Circulation of waters in the Lofoten depression in the Norwegian Sea]. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences* (2), 108–121. (In Russian)
- Bloshkina, E. V., Ivanov, V. V., 2016. Konvektivnye struktury v Norvezhskom i Grenlandskom moriakhs po rezul'tatam modelirovaniia s vysokim prostranstvennym razresheniem [Convective structures in the Norwegian and Greenland Seas based on modeling results with high spatial resolution]. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiiskoi Federatsii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia] 361, 146–168. (In Russian)
- Daru, V., Tenaud, C., 2004. High order one-step monotonicity preserving schemes for unsteady compressible flow calculations. *Journal of Computational Physics* 193(2), 563–594. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2003.08.023>.
- Faghmous, J. H., Frenger, I., Yao, Y., Warmka, R., Lindell, A., Kumar, V., 2015. Data from: A daily global mesoscale ocean eddy dataset from satellite altimetry. Available at: <https://doi.org/105061/druad.gp40h> (дата обращения: 14.01.2019).
- Fox-Kemper, B., Menemenlis, D., 2008. Can large eddy simulation techniques improve mesoscale rich ocean models? *Ocean Modeling in an Eddying Regime* 177, 319–338. Available at: <https://doi.org/10.1029/177GM19>.
- Ikeda, M., Johannessen, J. A., Lygre, K., Sandven, S., 1989. A process study of mesoscale meanders and eddies in the Norwegian Coastal current. *Journal of Physical Oceanography* 19, 20–35.
- Ivanov, V. V., Korablev, A. A., 1995. Dinamika vnutripiknoklinnoi linzy v Norvezhskom more [Dynamics of an intrapycnocline lens in the Norwegian Sea]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology] 10, 55–62. (In Russian)
- Jackett, D. R., McDougall, T. J., 1995. Minimal adjustment of hydrographic profiles to achieve static stability. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 12, 381–389.
- Johannessen, J. A., Svendsen, E., Sandven, S., Johannessen, O. M., 1989. Three dimensional structure of mesoscale eddies in the Norwegian Coastal Current. *Journal of Physical Oceanography* 19, 3–19.
- Köhl, A., 2007. Generation and stability of a quasi-permanent vortex in the Lofoten Basin. *Journal of Physical Oceanography* 37, 2637–2651. Available at: <http://dx.doi.org/10.1175/2007JPO3694>.
- Koldunov, A. V., Koldunov, N. V., Volkov, D. L., Belonenko, T. V., 2015. Primenenie sputnikovykh dannykh dlia validatsii gidrodinamicheskoi modeli Severnogo Ledovitogo okeana [Applying Satellite Data for Validation of the Hydrodynamic Model for the Arctic Ocean]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space] 12(6), 111–124. (In Russian)
- Large, W. G., McWilliams, J. C., Doney, S., 1994. Oceanic vertical mixing: A review and a model with a non-local boundary layer parameterization. *Reviews of Geophysics* 32(4), 363–403.
- Large, W., Yeager, S., 2004. Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea-ice models: The data sets and flux climatologies, in: *Tech. Note NCAR/TN-460+STR*. National Center for Atmospheric Research. Boulder, Colorado. Available at: <http://dx.doi.org/10.5065/D6KK98Q6>.
- Leith, C. E., 1996. Stochastic models of chaotic systems. *Physica D: Nonlinear Phenomena* 98(2–4), 481–491. Available at: [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(96\)00107-8](https://doi.org/10.1016/0167-2789(96)00107-8).
- Locarnini, R. A., Mishonov, A. V., Antonov, J. I., Boyer, T. P., Garcia, H. E., Baranova, O. K., Zweng, M. M., Johnson, D. R., 2010. Temperature, in: *Levitus, S. (ed.) World Ocean Atlas 2009. Series 1*. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Marshall, J., Adcroft A., Hill C, Perelman L., Heisey C., 1997. A finite-volume, incompressible Navier — Stokes model for studies of the ocean on parallel computers. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 102(C3), 5753–5766. Available at: <https://doi.org/10.1029/96JC02775>.
- Mork, K. A., Skagseth, Ø., 2010. A quantitative description of the Norwegian Atlantic Current by combining altimetry and hydrography. *Ocean Science* 6, 901–911. Available at: <https://doi.org/10.5194/os-6-901-2010>.
- Nguyen, A. T., Menemenlis, D., Kwok, R., 2011. Arctic ice-ocean simulation with optimized model parameters: Approach and assessment. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 116(C4), C04025. <https://doi.org/10.1029/2010JC006573>.

- Prokopchuk, I., Sentyabov, E., 2006. Diet of spring-spawning herring, mackerel and blue whiting related to *Calanus finmarchicus* distribution and hydrography in the Norwegian Sea. *ICES Journal of Marine Science* 63, 117–127.
- Raj, R. P., Johannessen, J. A., Eldevik, T., Nilsen, J. E. Ø., Halo, I., 2016. Quantifying mesoscale eddies in the Lofoten Basin. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 121(7), 4503–4521. Available at: <https://doi.org/10.1002/2016JC011637>.
- Rossby, T., Ozhigin, V., Ivshin, V., Bacon, S., 2009a. An isopycnal view of the Nordic seas hydrography with focus on properties of the Lofoten Basin. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 56, 1955–1971.
- Rossby, T., Prater, M. D., Søiland, H., 2009b. Pathways of inflow and dispersion of warm waters in the Nordic seas. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 114(C4), C04011. Available at: <https://doi.org/10.1029/2008JC005073>.
- Sentyabov, E. V., 2000. Kolebaniia teplovogo sostoiianiia vod Norvezhskogo moria vo vtoroi polovine 1990-kh gg. i ikh vliianie na raspredelenie pelagicheskikh ryb [Fluctuations in the thermal state of the waters of the Norwegian Sea in the second half of the 1990s and their influence on the distribution of pelagic fishes]. *Materialy otchet. sessii PINRO po itogam nauchno-issled. rabot v 1998–1999 gg.* [Materials report. session of the PINRO on the results of the scientific-issled. works in 1998–1999], Ch. 1, Murmansk, Publishing house PINRO, 178–187. (In Russian)
- Sentyabov, E. V., 2009. Mezhgodovye izmeneniia okeanograficheskikh uslovii v Norvezhskom more i ikh vliianie na raspredelenie pelagicheskikh ryb. Available at: <http://www.dissercat.com/content/mezhgodovye-izmeneniya-okeanograficheskikh-uslovii-v-norvezhskom-more-i-ikh-vliianie-na-rasp> (accessed: 03/12/2018). (In Russian)
- Sentyabov, E. V., 2010. Zakonomernosti prostranstvennogo raspredeleniia termokhalinnykh kharakteristik na standartnykh razrezakh v iuzhnoi chasti Norvezhskogo moria [Regularities of spatial distribution of thermohaline characteristics on standard sections in the southern part of the Norwegian Sea]. *Voprosy promyslovoi okeanologii* [Issues of commercial oceanology] 7(1), 189–205. (In Russian)
- Smith, W. H. F., Sandwell, D. T., 1997. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science* 277(5334), 1956–1962.
- Søiland, H., Chafik, L., Rossby, T., 2016. On the long-term stability of the Lofoten Basin Eddy. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 121(7), 4438–4449. Available at: <https://doi.org/10.1002/2016JC011726>.
- Volkov, D. L., Belonenko, T. V., Foux, V. R., 2013. Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin — a sub-Arctic hot spot of ocean variability. *Geophysical Research Letters* 40(4), 738–743. Available at: <https://doi.org/10.1002/grl.50126>.
- Volkov, D. L., Kubryakov, A., Lumpkin, R., 2015. Formation and variability of the Lofoten Basin vortex in a high-resolution ocean model. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 105, 142–157. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.09.001>.

Received: April 28, 2018

Accepted: October 15, 2018

Author's information:

Tatyana V. Belonenko — btvlisab@yandex.ru
Aleksey V. Koldunov — koldunovv@gmail.com
Evgeniy V. Sentyabov — sentyab@pinro.ru
Alexey L. Karsakov — karsakov@pinro.ru