

УДК 551.465.4

©Л. М. Наумов^{1,2,3}, С. М. Гордеева^{1,2,3*}

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, 192007, Воронежская ул., д. 79, г. Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Университетская наб., 7–9, г. Санкт-Петербург, Россия

³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, Россия

*e-mail: smgordeeva@yandex.ru

БОКОВОЙ ПЕРЕНОС ТЕПЛА И СОЛИ В ЛОФОТЕНСКОМ БАССЕЙНЕ: СРАВНЕНИЕ НА ОСНОВЕ ТРЕХ БАЗ ДАННЫХ

Статья поступила в редакцию 03.02.2020, после доработки 21.05.2020

На основе данных океанских реанализов ECMWF ORAS4 и ORAS5 выполнен расчет объемного расхода, потоков тепла и соли на боковых границах в Лофотенском бассейне (Норвежское море), а также оценка их баланса. Полученные величины сравнивались с оценками по данным реанализа CMEMS GLORYS12V1. Выявлено, что физически обоснованный объемный расход демонстрирует реанализ ORAS5 с невязкой 6,0 %, в то время реанализ GLORYS12V1 дает наиболее реалистичную оценку баланса тепла, так как использование этих данных позволяет учесть повышенный приток тепла, которое расходуется на теплообмен с атмосферой. Показано, что притоки водных масс и, соответственно, тепла и соли доминируют с южной стороны бассейна, а максимальный их вынос характерен для восточной границы. Установлено, что все три реанализа демонстрируют для Лофотенской котловины превышение притока воды и соли над стоком, что свидетельствует о незамкнутости балансов для отдельных бассейнов и ограниченности подходов при использовании этих данных.

Во временной изменчивости всех потоков на границах бассейна отмечаются нерегулярные колебания с различной для разных реанализов дисперсией. За период 1993–2016 гг. по данным реанализа ORAS5 на всех границах, кроме северной, отмечаются значительные линейные тренды всех потоков, что свидетельствует об увеличении транзита через Лофотенский бассейн. По балансу трендов реанализ ORAS5 показывает накопление воды в регионе, охлаждение и накопление соли. В реанализе GLORYS12V1 суммарный тренд для потока тепла за тот же период определяет небольшое потепление.

Ключевые слова: ECMWF ORAS5, ORAS4, CMEMS GLORYS12V1, объемный расход, поток тепла, поток соли, Лофотенский бассейн, верификация, реанализ.

©Л. М. Наумов^{1,2,3}, С. М. Гордеева^{1,2,3*}

¹Russian State Hydrometeorological University, 192007, Voronezhskaya Str., 79, St. Petersburg, Russia

²St. Petersburg State University, 199034, 7–9, Universitetskaya Emb., St. Petersburg, Russia

³Shirshov Institute of Oceanology RAS, 117997, Nahimovsky Prospekt, 36, Moscow, Russia

*e-mail: smgordeeva@yandex.ru

LATERAL HEAT AND SALT TRANSPORTS IN THE LOFOTEN BASIN: COMPARISON BASED ON THREE DATABASES

Received 03.02.2020, in final form 21.05.2020

Based on ECMWF ORAS4 and ORAS5 reanalysis data volumetric flow rate and also heat and salt fluxes and their balances have been calculated on the lateral boundaries of the Lofoten Basin area in the Norwegian Sea. These results have been compared with results based on CMEMS reanalysis GLORYS12V1 data. We revealed, that the most physically justified in the volumetric flow rate is the ORAS5 reanalysis with a 6.0 % discrepancy. Heat balance estimation based on the GLORYS12V1 reanalysis data is more realistic because it shows an increased heat influx that participates in the ocean-atmosphere heat exchange. We conclude that the influx from the southern boundary dominates while the outflux through the eastern boundary is prevalent in the study area, which is mainly determined by the region's waters dynamics. All of three reanalysis shows an excess of water and salt inflow over outflow for the Lofoten Basin. That indicates the balances for individual basins are not closed and approaches to using these data are limited.

Ссылка для цитирования: Наумов Л.М., Гордеева С.М. Боковой перенос тепла и соли в Лофотенском бассейне: сравнение на основе трех баз данных // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 3. С. 43–55. doi: 10.7868/S207366732003003X

For citation: Naumov L.M., Gordeeva S.M. Lateral Heat and Salt Transports in the Lofoten Basin: Comparison Based on Three Databases. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2020, 13, 3, 43–55. doi: 10.7868/S207366732003003X

All reanalysis data demonstrate the irregular fluctuations in the temporal variability of the fluxes through the boundaries with the different variance rate. Using the ORAS5 reanalysis data from 1993–2016, we estimate significant linear trends of the studied fluxes through all boundaries, except the northern one. It can be a real proof of increasing transport through the Lofoten Basin. The linear trends of the balance calculated using the ORAS5 data of the same period show the accumulation of water in the region as well as the cooling and accumulation of salt. The linear trends of the balance calculated using the GLORYS12V1 reanalysis demonstrate positive values indicating the warming of the basin.

Key words: ECMWF ORAS5, ORAS4, CMEMS GLORYS12V1, transport, heat flow, salt flow, Lofoten Basin, verification, reanalyses.

1. Введение

Лофотенская котловина Норвежского моря играет центральную роль в Атлантической меридиональной опрокидывающейся циркуляции в Северной Атлантике, выступая в качестве резервуара для теплых и соленых потоков воды, распространяющихся из Атлантики в Северный Ледовитый океан [1–5]. Накапливаемые здесь тепло и соль оказывают значительное влияние на трансформацию адвективных потоков, а также определяют значительные, до 80 Вт/м^2 , потери тепла с поверхности моря в атмосферу [2, 6]. Атлантические воды располагаются в верхнем слое и могут проникать до глубины 800–1000 м в периоды зимней конвекции [2, 4, 5, 7]. Наблюдения показывают, что основными факторами, влияющими на боковой перенос тепла в Лофотенском бассейне, являются средний поток воды в поверхностном слое в южном секторе бассейна и вихревые потоки с Лофотенского откоса на востоке [1], а пониженный перенос вод в северном направлении может обуславливать заглубливание атлантических вод [3]. Мезомасштабная динамика региона является объектом множества исследований [5, 8–10]. В котловине постоянно присутствует квазистационарный мезомасштабный Лофотенский вихрь [5–11], который, по мнению некоторых авторов [12], является конвективным каналом передачи тепла и соли между поверхностью и глубинными водами Норвежского моря.

В отличие от натурных измерений, данные реанализов, в основе которых положены гидродинамические модели, позволяют вычислять значения потоков водных масс, тепла и соли на регулярной сетке с постоянной дискретностью во времени. Лишь этот тип данных обеспечивает полное, непрерывное по времени и пространству покрытие исследуемого региона. В настоящее время доступны данные нескольких реанализов, учитывающих различную часть спектра гидродинамических процессов, так как они основаны на разных гидродинамических моделях с различной детализацией описания природной среды. Таким образом, в настоящее время актуальна задача верификации реанализов, особенно в части выполнения балансов массы, тепла и соли на ограниченной акватории, т. к. данный тип верификации не проводится разработчиками. В работе используются данные реанализа ORAS4, нового реанализа ORAS5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), и также реанализ GLORYS12V1 (CMEMS), предоставляющий данные о состоянии Мирового океана через сервис Copernicus.

Потоки тепла и соли через боковые границы Лофотенской котловины несомненно содержат в себе значительную вихревую составляющую, оценка которой затруднена, прежде всего, из-за плохого пространственно-временного разрешения данных реанализов. Поэтому на основании этих данных адекватно можно получить только климатическую оценку.

Таким образом, в настоящей работе решаются три задачи:

- оценка климатических значений объемного расхода, потоков тепла и соли через боковые границы Лофотенского бассейна;
- выявление трендов в межгодовой изменчивости этих потоков;
- сравнительный анализ трех используемых в работе реанализов на примере Лофотенского бассейна.

2. Исходные данные и методы исследования

Район исследования представляет собой прямоугольную область Лофотенской котловины — Лофотенский бассейн (ЛБ) в географических координатах $68.5^\circ\text{--}72^\circ$ с.ш. и $0^\circ\text{--}8^\circ$ в.д. (пунктирная линия на рис. 1, см. вклейку), охватывающую центральную часть Лофотенской котловины. Выбранные пространственные пределы определены исходя из многолетней локализации Лофотенского вихря (ЛВ) (центр 70° с.ш., 3° в.д., радиус порядка 20–40 км [7–11]) который проявляется в ярко выраженных аномалиях различных гидрофизических характеристик, и включают прилегающую область, где происходит взаимодействие ЛВ с другими мезомасштабными вихрями [2]. Площадь района составляет $116\,811 \text{ км}^2$, периметр — 2040 км.

Уравнение водного баланса ЛБ с открытыми внешними границами можно представить в общем виде [13]:

$$\Delta V = U + W + E_{\text{эф}}, \quad (1)$$

где ΔV — изменение объема моря за конкретный период времени; U — горизонтальные потоки массы по периметру бассейна; W — вертикальный поток массы через нижнюю границу; $E_{\text{эф}}$ — эффективное испарение с поверхности, равное разности объемов испарения и осадков. Водный баланс кроме объемной характеристики можно выразить через приращение слоя воды (уровня) ΔH на поверхности моря как

$$\Delta V = \Delta H \cdot S, \quad (2)$$

где S — площадь поверхности бассейна.

Основной характеристикой потока массы является объемный расход — объем жидкости, протекающей через поперечное сечение потока в единицу времени:

$$F = V \cdot s, \quad (3)$$

где F — объемный расход ($\text{м}^3/\text{с}$), V — скорость течения ($\text{м}/\text{с}$), s — площадь поперечного сечения (м^2). В океане чаще всего объемный расход измеряется в Свердрупсах ($1 \text{ Св} = 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$)

Тепловой поток — количество теплоты, передаваемой за единицу времени через единицу площади, который можно определить, как [14]

$$F_t = C_p \cdot \rho \cdot T \cdot V \cdot s, \quad (4)$$

где F_t — поток тепла (Вт); C_p — удельная теплоемкость воды, ($\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$); T — температура морской воды, ρ — плотность воды, ($\text{кг}/\text{м}^3$).

Следует отметить, что для соленых морей, температура замерзания которых отличается от 0°C , уравнение (3) принимает следующий вид:

$$F_t = C_p \cdot \rho \cdot (T - T_f) \cdot V \cdot s, \quad (5)$$

где T_f — температура замерзания морской воды.

Поток соли — количество соли, передаваемой за единицу времени через единицу площади, который можно определить, как [14]

$$F_s = \rho \cdot S_w \cdot V \cdot s, \quad (6)$$

где F_s — поток соли ($\text{г}/\text{с}$); S_w — соленость морской воды ($\text{г}/\text{кг}$).

Для оценки потоков значения C_p и T_f рассчитывались по полиномиальному уравнению ЮНЕСКО [15], ρ — по уравнению состояния морской воды TEOS-10 ($\text{кг}/\text{м}^3$) [16].

В качестве источников информации о гидрофизических параметрах (температура, соленость, зональные и меридиональные компоненты скорости течений и уровень моря) на поверхности и глубинах послужили данные трех океанских реанализов.

Первый — новейший продукт ECMWF ORAS5 [17], который выпущен в 2019 году и представляет собой глобальный вихреразрешающий реанализ с горизонтальным разрешением 0.25° и 75 вертикальными уровнями, основанный на модели NEMO 3.4.1, где за ледовый блок отвечает модель LIM2. Ассимиляция наблюдений моделью проводится по средним значениям с использованием фильтра Калмана. Ассимилируются данные о поверхностной температуре воды (HadISST2), сплоченности льда (OSTIA), профилях температуры воды и солености in situ (EN4), а также данные об уровне моря (продукт DT2014 AVISO). Ассимиляционное окно составляет 5 суток. Следует отметить, что данные ORAS5 находятся на криволинейной сетке. Для корректного расчета потоков мы использовали билинейную интерполяцию на прямоугольную сетку с разрешением 0.25° . Данная операция осуществлялась с помощью пакета CDO (Climate Data Operators) [18].

Второй реанализ — более старый ECMWF ORAS4 [19], который основан на модели NEMO 3.0. Отдельный блок для динамики льда здесь отсутствует. ORAS4 имеет горизонтальное разрешение 1° и 42 вертикальных уровня. Модель ассимилирует профили температуры и солености воды из базы EN3v2a, поверхностную температуру воды и сплоченность льда (ERA40, NCEP OISSTv2, OSTIA), вдолетрековые альтиметрические измерения уровня моря (AVISO). Ассимиляционное окно составляет 10 суток.

Третьим источником информации послужил реанализ GLORYS12V1, доступный на сайте CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) по ссылке (<http://marine.copernicus.eu>). Мы использовали продукт Global-reanalysis-phy-001-030-monthly исследовательской группы GLO-MERCATOR (Тулуза,

Франция) [20]. Этот продукт GLORYS12V1 представляет собой глобальный океанский вихреразрешающий реанализ с горизонтальным разрешением $1/12^\circ$ и 50 вертикальными уровнями. Он основан в большей части на системе глобального прогнозирования в режиме реального времени CMEMS. Модельным компонентом является платформа NEMO (<https://www.nemo-ocean.eu/>), управляемая на поверхности реанализом ECMWF ERA-Interim [21]. Ассимиляция наблюдений проводится по средним значениям с помощью фильтра Калмана, ассимилируются вдоль-трековые альтиметрические данные (аномалии уровня моря), спутниковые данные о температуре поверхности моря, концентрации морского льда и глубоководные измерения на вертикальных профилях температуры и солёности морской воды.

Для замыкания балансов объемного расхода и тепла на поверхности моря использовались данные атмосферного реанализа ECMWF ERA-Interim с горизонтальным разрешением 0.125° и временной дискретностью данных 3 часа, которые осреднялись до среднемесячных значений. Использовались значения эффективного испарения (разность испарения E и осадков P) в исследуемой области за исследуемый период. Значения потоков тепла из океана в атмосферу находились из уравнения внешнего теплового баланса:

$$B = R + LE + F, \quad (7)$$

где B — суммарный поток тепла ($\text{Вт}/\text{м}^2$); R — радиационный баланс поверхности океана ($\text{Вт}/\text{м}^2$); LE — скрытый турбулентный поток тепла ($\text{Вт}/\text{м}^2$); F — явный турбулентный поток тепла ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

Все потоки рассчитывались на боковых границах ЛБ от поверхности до дна, потоки через нижнюю границу (на дне) считались ничтожными.

Из каждого архива выбирались среднемесячные данные за период 1993–2016 гг. По формулам (3), (5), (6) рассчитывались объемный расход, потоки тепла и соли за каждый месяц, которые затем осреднялись за весь рассматриваемый период.

Следует отметить, что при осреднении за длительный период исключаются колебания всех потоков в мезомасштабном диапазоне, тем самым мы исключаем влияние мезомасштабных вихрей ЛБ на оценки потоков.

3. Результаты и обсуждение

Расчеты течений на границах ЛБ по данным ORAS5. Для оценки гидрофизических и гидродинамических параметров по данным реанализа ORAS5 были построены зональные разрезы среднесезонных значений меридиональной компоненты скорости течения на самой северной (72° с.ш.) и самой южной (68.5° с.ш.) границах исследуемой зоны, а также меридиональные разрезы климатических значений зональной компоненты скорости течения на самой западной (0° д.) и самой восточной (8° в.д.) границах (рис. 2, см. вклейку), распределения температуры и солёности воды у поверхности котловины (рис. 3), а также профили климатических средних по региону значений температуры и солёности (рис. 4) [22].

На рис. 2 видно, что в целом наиболее динамичный слой в исследуемом регионе расположен в слое до 500 м, где скорости составляют 4–7 см/с. Глубже 500 м скорости уменьшаются на порядок и более. Поверхностные, наиболее сильные, течения имеют положительное направление (т. е. направлены на север и на восток), в то время как течения противоположного направления в основном сосредоточены на глубинах, превышающих 1000 м. Однако, на западной и северной границах такие течения наблюдаются и в верхних слоях. Следует отметить, что течения, направленные на запад или юг, имеют меньшие скорости по сравнению с положительно направленными поверхностными течениями. Северные и восточные потоки воды на поверхности определяются преобладающими ветвями Норвежского течения (рис. 1), в то время как западные и южные, вероятно, порождаются внутренней циркуляцией в Лофотенской котловине.

Расчеты течений на границах ЛБ по данным GLORYS12V1. Вертикальное распределение средних многолетних скоростей течений, рассчитанных по данным реанализа GLORYS12V1, по направлениям в целом совпадает с течениями, полученными из реанализа ORAS5. Значительное различие отмечается на восточной границе — поток из Лофотенской котловины в поверхностных слоях рассчитанный по данным реанализа ORAS5 два раза сильнее. В южной части разреза наоборот, реанализ GLORYS12V1 показывает проникновение вод в ЛБ из Норвежского течения, т. е. ветвь входящего в ЛБ потока в реанализе GLORYS12V1 смещена к северо-востоку. На остальных разрезах по данным реанализа GLORYS12V1 на всех горизонтах течение по величине в 1.5–2 раза интенсивнее.

Вертикальные разрезы распределений температуры и солёности воды. В пространственном и в вертикальном распределениях температуры воды (рис. 3, а и рис. 4, а) отсутствует какая-либо выраженная региональная специфика: изменчивость температуры воды в пространстве носит квазиширотный характер, наруша-

емый влиянием ветвей теплого Норвежского течения так, что градиент температуры направлен с юго-востока на северо-запад акватории. С глубиной температура воды уменьшается, достигая на глубине 1000 м отрицательных значений, что может свидетельствовать об обмене между Гренландской и Лофотенской котловинами в промежуточных слоях [3].

Распределение солёности, напротив, имеет ярко выраженные региональные особенности. Так, в поверхностных слоях в Лофотенском бассейне (рис. 3, б), наблюдаются повышенные значения солёности, что позволяет допустить аккумуляцию соли вихрем. Однако максимумы солёности в центре ЛБ по данным реанализов ORAS5 и GLORYS12V1 не совпадают: пятно повышенной солёности по данным реанализа ORAS5 расположено южнее и локализовано ближе к центру Лофотенского вихря (центр 70° с.ш., 3° в.д. [6]). Можно отметить неравномерное изменение солёности с глубиной: в верхнем 100-метровом слое солёность увеличивается с глубиной (рис. 4, б), а ниже, до глубины 1100 м, солёность с глубиной уменьшается. Указанная закономерность также отмечается в работах [2, 4, 5]. Похожее вертикальное распределение выявлено и по данным реанализа GLORYS12V1, только распресненный промежуточный слой располагается выше на 100 м.

Отметим, что подобная стратификация может характеризоваться тонкой термохалинной структурой с эффектом дифференциально-диффузионной конвекции, которая проявляется в виде «солевых пальцев». Как указывал К. Н. Федоров, за счет этого механизма осуществляется основной перенос соли и тепла в глубинные слои океана (глубже 1500 м) без затраты энергии от внешних источников [23].

Оценки среднесезонных потоков водных масс, тепла и соли в ЛБ по данным реанализов. По формулам (3), (5) и (6) были рассчитаны среднесезонные за период 1993–2016 гг. объемный расход воды и потоков тепла и соли по данным разных реанализов. Объемный расход воды представлен на рис. 5.

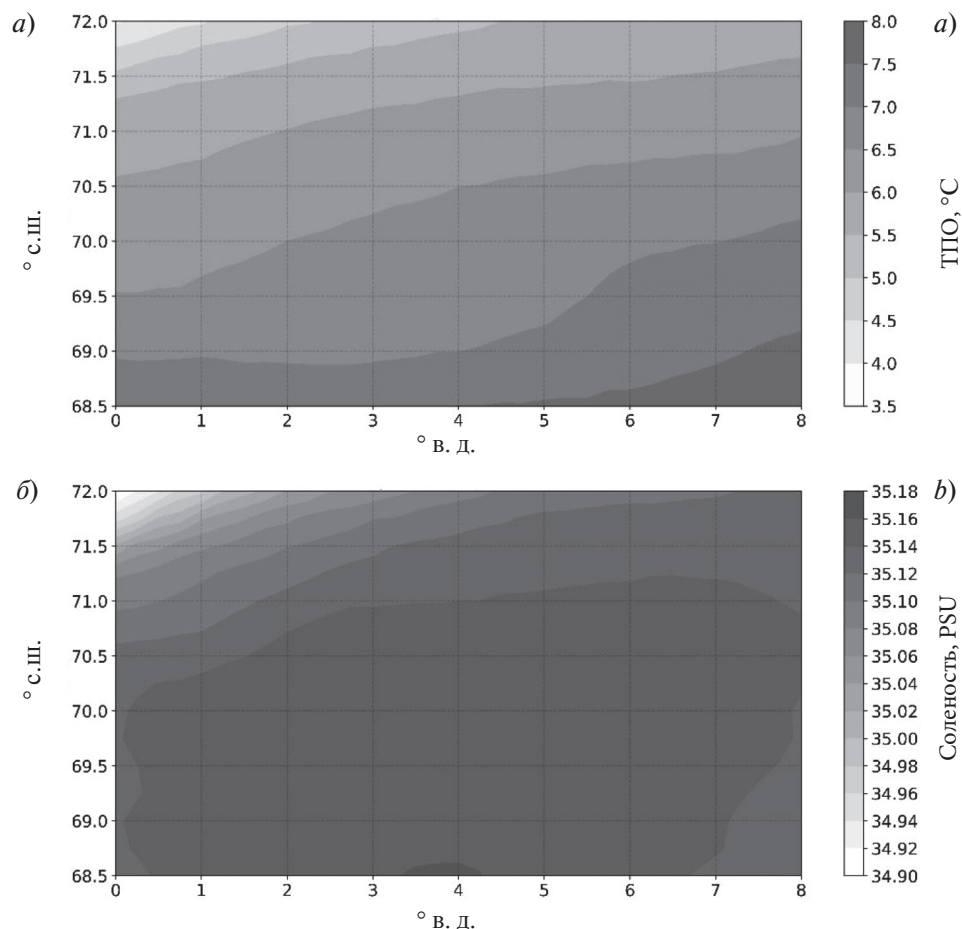


Рис. 3. Среднесезонные за период 1993–2016 гг. значения температуры (а) и солёности (б) на поверхности моря по данным реанализа ORAS5.

Fig. 3. Values of temperature (а) and salinity (б) on the sea surface according to the ORAS5 reanalysis data averaged for the period 1993–2016.

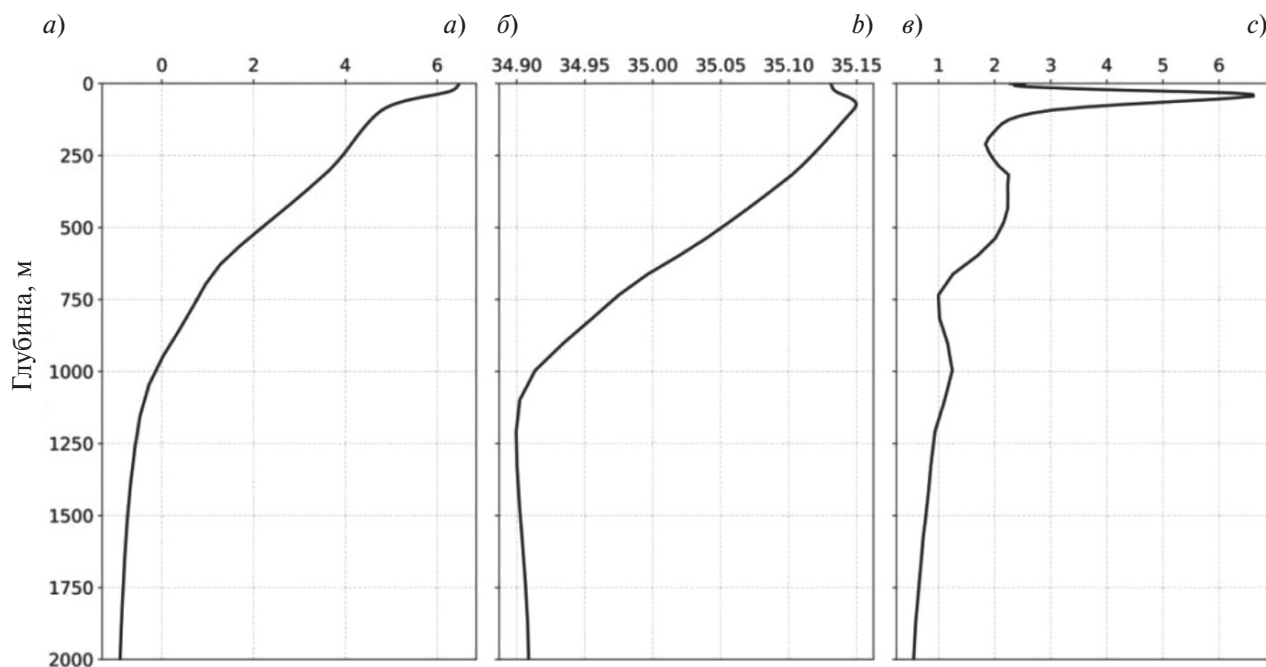


Рис. 4. Среднегодовые за период 1993–2016 гг. осредненные по региону ЛБ профили значений температуры воды (а), солёности (б) и соответствующий профиль частоты Брента-Вайсяля (в) по данным реанализа ORAS5.

Fig. 4. Averaged for the period 1993–2016 and region-averaged profiles of water temperature (a), salinity (b), and the Brent — Väisälä frequency (c) calculated from the ORAS5 reanalysis data.

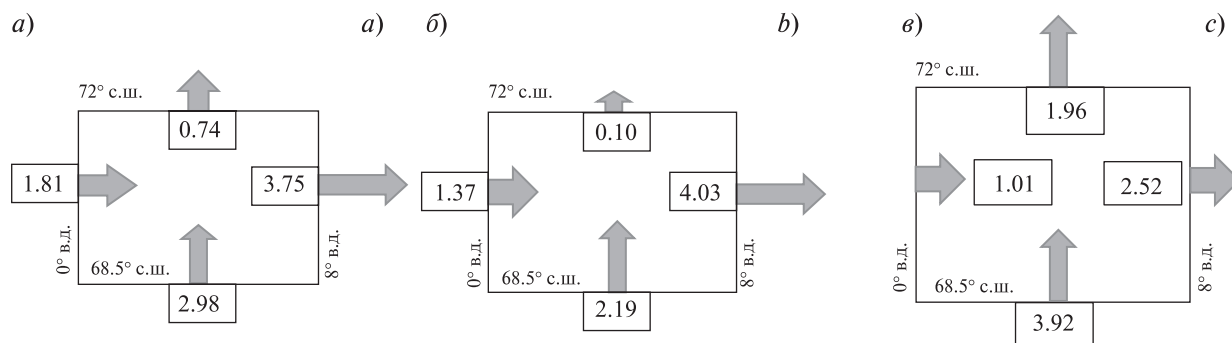


Рис. 5. Объемный расход воды (Св) на границах исследуемой области по данным разных реанализов: а — ORAS5; б — ORAS4; в — GLORYS12V1.

Fig. 5. Volumetric flow rate (Sv) at the study area boundaries according to different reanalyses: а — ORAS5; б — ORAS4; в — GLORYS12V1.

На рис. 5 видно, что по данным реанализов GLORYS12V1 и ORAS5 входящие в ЛБ потоки воды преобладают над выходящими, т. е. наблюдается их конвергенция со значениями объемного расхода 0.45 Св и 0.30 Св, соответственно. По данным реанализа ORAS4 — дивергенция со значением объемного расхода -0.57 Св. Следует отметить, что по данным реанализов ORAS4 и ORAS5 в ЛБ среднегодовой уровень моря на 0.1 м выше уровня окружающих вод (по реанализу GLORYS12V1 — выше на 0.27 м), что говорит о конвергенции потоков массы в регионе. Таким образом, можно сказать, что наиболее физически обоснованные результаты демонстрируют реанализы ORAS5 и GLORYS12V1, причем у ORAS5 — наименьшая невязка. Также следует отметить, что атмосферное влияние на баланс воды в регионе через эффективное испарение при климатическом осреднении пренебрежительно мало по сравнению с адвективной составляющей: по данным реанализа ERA-Interim эффективное испарение ($E-P$) в Лофотенском бассейне составило $1.7 \cdot 10^{-9}$ м³/с с поверхности площадью 1 м² или 0.000212 Св со всей площади исследуемого региона.

Так как реанализ ORAS4 показал неадекватную оценку объемного расхода, т. е. основы для расчета всех потоков, то следующие потоки тепла и соли рассчитывались и сравнивались только для реанализов ORAS5 и GLORYS12V1.

В табл. 1 и 2 приведены результаты расчета потоков тепла и соли через границу исследуемой зоны. Из табл. 1 видно, что для адвективной составляющей потока тепла по данным ORAS5 баланс практически равен нулю, абсолютное значение невязки составляет лишь 0.07 ТВт. Из таблицы также видно, что наибольшие значения входящих в регион потоков тепла наблюдаются на южной границе (72.51 ТВт), наибольшие значения выходящих потоков — на восточной границе (92.41 ТВт).

Потоки тепла на границе по данным GLORYS12V1 по направлению и соотношениям такие же, как и по данным ORAS5, однако, в отличие от него баланс показывает накопление тепла в регионе в количестве 6.97 ТВт (60 Вт/м²), Суммарный климатический поток тепла из океана в атмосферу в исследуемой области по данным реанализа ERA-Interim составляет 10.2 ТВт (78 Вт/м²), что соответствует оценкам других авторов (80 Вт/м²) [2, 6]. Таким образом, по данным реанализа GLORYS12V1 остается некомпенсированным 3.2 ТВт тепла (2.5 %), а по реанализу ORAS5—10.1 ТВт (9 %), что значит, что океанские реанализы недооценивают поступление тепла в бассейн.

На основе данных табл. 2 можно заключить, что в ЛБ по данным реанализов присутствует положительный баланс соли, что проявляется в виде превышения входящих потоков соли над выходящими. Данный факт хорошо согласуется с рис. 3, б, на котором отчетливо видна область повышенных значений поверхностной солености, согласующаяся с зоной климатического положения Лофотенского вихря. Наибольший входящий поток соли по данным реанализа ORAS5 наблюдается на южной границе исследуемой области и составляет 107.7 кт/с. Наибольший выходящий поток соли наблюдается на восточной границе исследуемой области и составляет 135.73 кт/с. По данным реанализа GLORYS12V1 накопление соли в регионе в два раза больше, чем у ORAS5, что связано с тем, что у первого расход через южную границу воды с повышенной соленостью выше.

Таблица 1

Потоки тепла через границы исследуемой области по данным реанализов ORAS5 и GLORYS12V1
Heat fluxes across the studied area boundaries according to the reanalysis data of ORAS5 and GLORYS12V1

Направление потока	Величина потока тепла			
	ТВт (=10 ¹² Вт)		%	
	ORAS5	GLORYS12V1	ORAS5	GLORYS12V1
Входящий поток				
Через западную границу	39.47	26.22	35.25	20.7
Через южную границу	72.51	100.74	64.75	79.3
Сумма	111.98	126.96	100	100
Выходящий поток				
Через восточную границу	92.41	66.74	82.52	52.6
Через северную границу	19.50	53.25	17.41	41.9
Сумма	111.91	119.99	99.93	94.5
Баланс				
Разность входящих и выходящих потоков	0.07	6.97	0.07	5.5

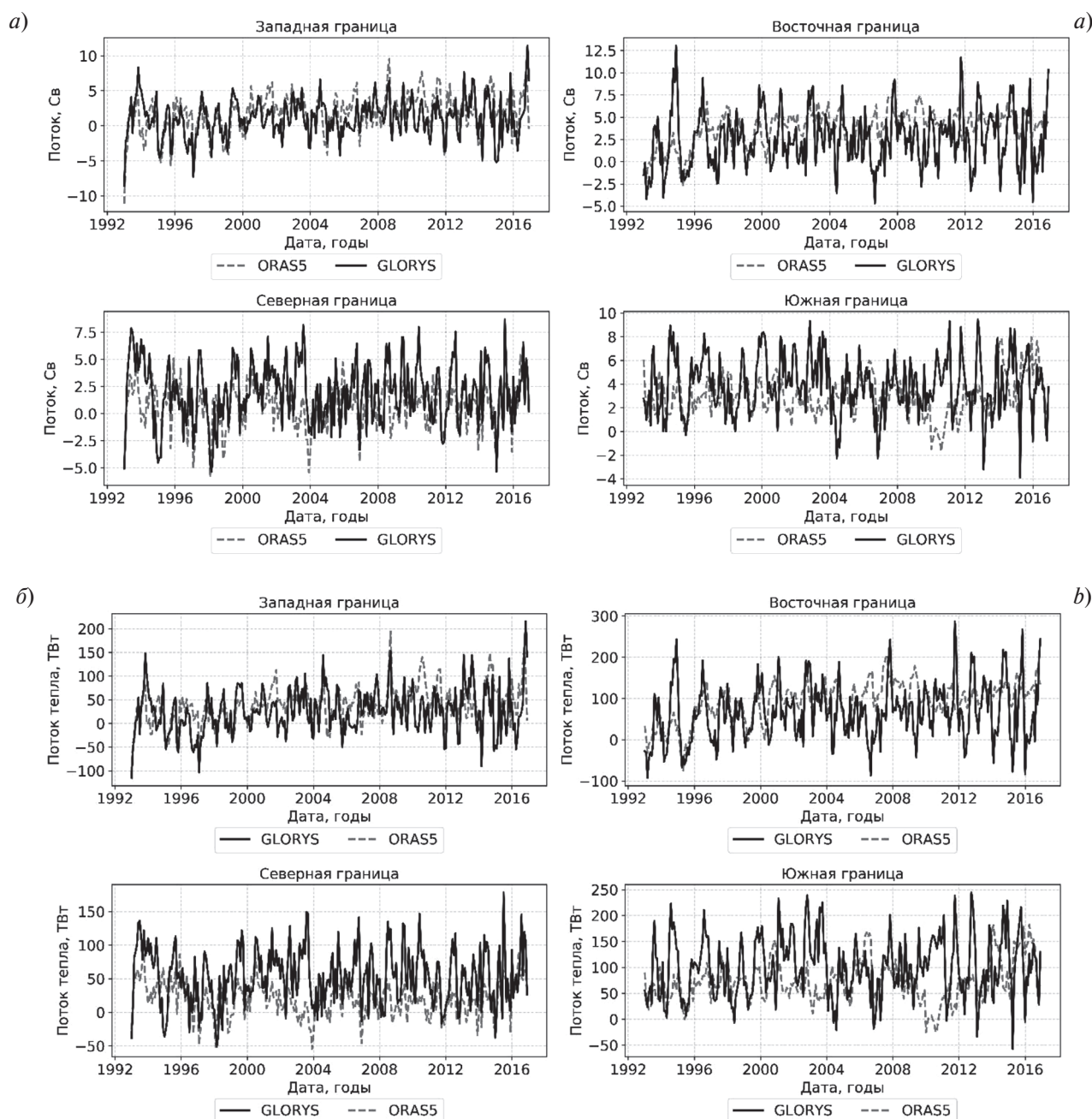
Таблица 2

Потоки соли через границы исследуемой области по данным реанализов ORAS5 и GLORYS12V1
Salt fluxes across the studied area boundaries according to the reanalysis data of ORAS5 and GLORYS12V1

Направление потока	Величина потока соли			
	кт/с		%	
	ORAS5	GLORYS12V1	ORAS5	GLORYS12V1
Входящий поток				
Через западную границу	65.37	40.43	37.77	22.29
Через южную границу	107.70	140.98	62.23	77.71
Сумма	173.07	181.41	100	100
Выходящий поток				
Через восточную границу	135.73	91.42	78.42	50.39
Через северную границу	26.82	68.99	15.5	38.03
Сумма	162.55	160.41	93.92	88.42
Баланс				
Разность входящих и выходящих потоков	10.52	21.00	6.08	11.58

Анализ временной изменчивости интегральных объемных расходов воды, потоков тепла и соли. Далее мы анализируем временную изменчивость интегральных объемных расходов воды, потоков тепла и соли на каждой границе ЛБ по среднемесячным данным за период 1993–2016 гг. (рис. 6). Дисперсия этих рядов и характеристики линейного тренда представлены в табл. 3.

Как видно из рис. 6, согласно данным реанализов ORAS5 и GLORYS12V1, объемный расход на всех границах испытывает значительные нерегулярные колебания. По данным реанализа GLORYS12V1 на всех границах отмечаются как положительные, так и отрицательные значения расхода, в отличие от реанализа ORAS5, который показывает на восточной границе только исходящий из региона поток воды. Дополнительно в ORAS5 обращает на себя внимание аномальный исходящий поток на южной границе в 2010 г., сменившийся усиливающимся входящим потоком. Эта аномалия может быть вызвана естественными причинами, учитывая, что 2010 г. в Европе был значительно аномальным [24]. Это требует дополнительного изучения. За период 1993–2016 гг. значимый слабый положительный тренд (табл. 3) отмечается на западной границе бассейна, который практически полностью компенсируется трендом на восточной границе, что показывает усиление широтного транзита воды через регион.



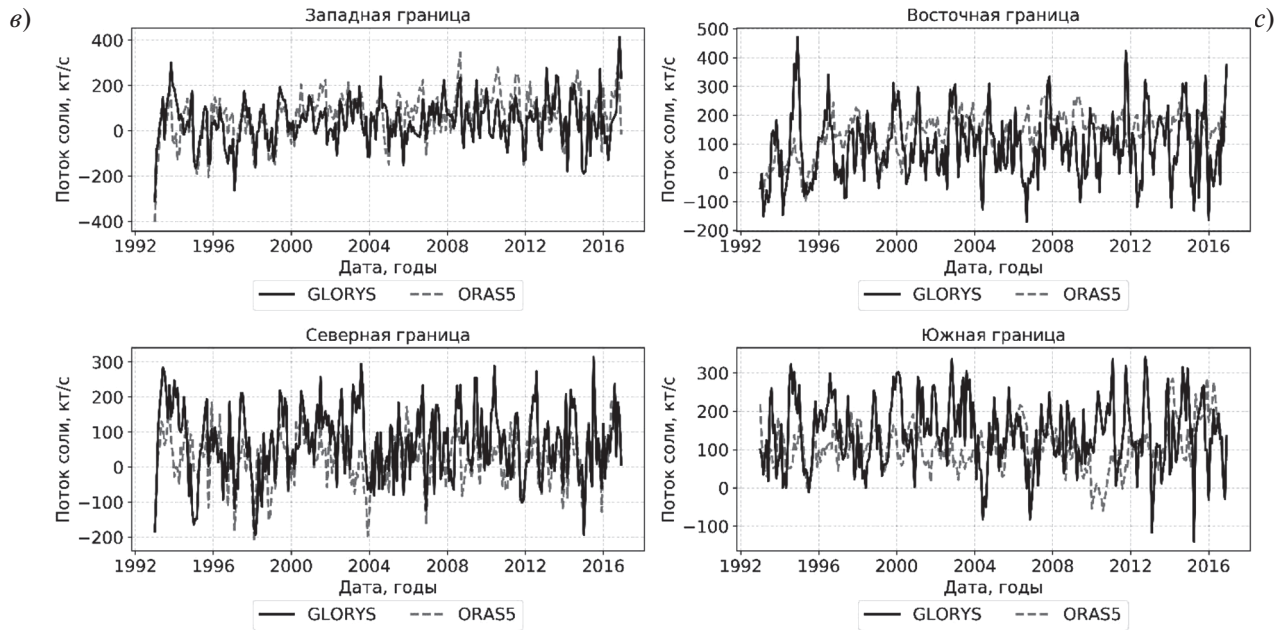


Рис. 6. Временная изменчивость объемного расхода воды (а), потоков тепла (б) и соли (в) на границах бассейна за период 1993–2016 гг. по данным реанализов ORAS5 и GLORYS12V1.

Fig. 6. Temporary variability of flow rate (a), heat (b) and salt (c) fluxes at the basin borders for the period 1993–2016. according to the reanalyses of ORAS5 and GLORYS12V1.

Таблица 3

Стандартное отклонение и характеристики линейного тренда временной изменчивости среднемесячных значений объемного расхода воды, потоков тепла и соли на границах бассейна за период 1993–2016 гг. по данным реанализов ORAS5 и GLORYS12V1. Полужирным выделены тренды, значимые при уровне значимости 5%

Standard deviation and linear trend characteristics of monthly average flow rate values, heat and salt fluxes at the basin boundaries for the period 1993–2016. according to the reanalyses of ORAS5 and GLORYS12V1. Significant trends at level of 5% are shown in bold

Направление потока	ORAS5			GLORYS12V1		
	Стандартное отклонение	Коэффициент тренда	Коэффициент детерминации R ²	Стандартное отклонение	Коэффициент тренда	Коэффициент детерминации, R ²
Объемный расход воды (Св/мес)						
Входящий поток						
Западная граница	2.84	0.012	0.12	2.74	0.005	0.02
Южная граница	1.63	0.002	0.01	2.44	−0.001	0.001
Выходящий поток						
Восточная граница	1.90	0.012	0.26	3.16	0.004	0.01
Северная граница	1.96	0.001	0.02	2.80	−0.0004	0.0002
Поток тепла (ТВт/мес)						
Входящий поток						
Западная граница	39.42	0.20	0.17	47.29	0.12	0.04
Южная граница	39.41	0.11	0.05	58.07	0.07	0.01
Выходящий поток						
Восточная граница	46.16	0.32	0.34	69.05	0.17	0.04
Северная граница	25.22	0.03	0.01	41.79	0.004	0.000
Поток соли (т/мес)						
Входящий поток						
Западная граница	102.64	0.42	0.12	99.01	0.17	0.02
Южная граница	58.9	0.08	0.01	88.08	−0.02	0.00
Выходящий поток						
Восточная граница	68.53	0.42	0.26	114.15	0.14	0.01
Северная граница	70.72	0.04	0.00	101.12	−0.02	0.00

Особенности временной изменчивости потоков тепла на границах региона имеют такой же характер, что и расходы воды на тех же границах, за исключением линейных трендов, которые значительно выше практически на всех (кроме северной) границах по данным реанализа ORAS5. Также они появляются и по данным реанализа GLORYS12V1 на западной и восточной границах. Несомненно, это связано с общим ростом температуры воды в Северной Атлантике, обусловленным глобальным потеплением [25]. Сумма трендов входящих в регион потоков тепла показывает рост поступления тепла в ЛБ, однако тренды исходящего потока также велики, что, в целом свидетельствует об увеличении транзита тепла через котловину. В общей сумме трендов по данным реанализа ORAS5 регион с течением времени охлаждался, а по данным реанализа GLORYS12V1 — немного нагревался.

Поток соли во временной изменчивости, как и остальные потоки, по данным реанализа ORAS5 имеет меньшую дисперсию, чем по GLORYS12V1, и также, как поток тепла, показывает возросший широтный транзит через ЛБ. Однако видно, что поток соли, входящий через южную границу по данным ORAS5, к концу периода увеличился. Это, в конечном итоге, определяет увеличение количества соли в регионе. По данным GLORYS12V1 количество соли в регионе также увеличивается, хотя и не такими значительными темпами.

5. Заключение

При сравнении океанских реанализов ECMWF ORAS5, ORAS4 и GLORYS12V1 выявлено следующее.

В вертикальном распределении средние многолетние скорости течений в реанализе GLORYS12V1 на всех уровнях в 1.5–2 раза интенсивнее по величине, чем в реанализе ORAS5. Средние многолетние распределения температуры и солёности воды на поверхности показывают относительно холодное и солёное пятно в центре бассейна, причем по данным реанализа ORAS5 это пятно смещено к югу, в зону действия Лофотенского вихря. Средняя многолетняя плотностная стратификация в регионе характеризуется тонкой термохалинной структурой с эффектом дифференциально-диффузионной конвекции, которая проявляется в виде «солевых пальцев», что позволяет осуществлять перенос соли и тепла в глубинные слои океана без затраты энергии от внешних источников.

Наибольшие входящие в регион ЛБ значения потоков всех субстанций наблюдаются на южной его границе, в то время как наибольшие выходящие значения потоков — на восточной границе. При оценке балансов объемного расхода, тепла и соли выявлено, что в ЛБ приток воды и соли превышает её сток, что проявляется в повышенном уровне моря по сравнению с уровнем окружающих вод, а также в повышенных значениях солёности в регионе. Положительный баланс адвекции тепла определяет расход тепла на теплообмен с атмосферой.

Реанализ ECMWF ORAS5, имеет наименьшую среди всех приведенных в исследовании реанализов невязку при вычислении баланса расходов воды на границах региона. Рассчитанные по его данным балансы потоков имеют наименьшие невязки: 6.0, 0.7 и 6.1 % для потоков воды, тепла и соли, соответственно. Оценка баланса тепла по данным реанализа GLORYS12V1 более реалистична, так как показывает повышенный приток тепла, которое, очевидно, расходуется на теплообмен с атмосферой. По данным реанализа GLORYS12V1 накопление соли в регионе в два раза больше, чем у ORAS5, что связано с тем, что у первого расход через южную границу воды с повышенной солёностью выше.

Во временной изменчивости среднемесячных значений всех потоков на границах бассейна отмечаются нерегулярные колебания, причем дисперсия данных реанализа GLORYS12V1 в среднем в полтора раза выше, чем у реанализа ORAS5. По данным реанализа ORAS5 практически на всех границах (кроме северной) отмечаются значительные линейные тренды всех потоков, что свидетельствует о росте транзита через ЛБ за исследуемый период. По балансу трендов реанализ ORAS5 показывает слабое накопление воды в регионе, охлаждение и накопление соли. В отличие от этого, в реанализе GLORYS12V1 тренды в несколько раз меньше и выражены только для потоков на западной границе региона, причем, суммарный тренд для потока тепла, в отличие от реанализа ORAS5, определяет небольшое потепление.

В связи с тем, что в последнее время стало популярным использование данных реанализов для климатических исследований и, особенно, для исследования тенденций в климатических системах, исходя из результатов данной работы следует особо заметить, что разные модели показывают различные результаты, как в климатическом масштабе, так и во временной изменчивости гидрофизических параметров. Поэтому вопрос доверия к этим результатам остается открытым.

6. Финансирование

Проект выполнен при финансовой поддержке гранта РНФ № 18–17–00027 «Вихревая динамика Лофотенской котловины и ее роль в переносе термохалинных свойств вод в Норвежском море».

Литература

1. Dugstad J., Fer I., LaCasce J., Sanchez de La Lama M., Trodahl M. Lateral Heat Transport in the Lofoten Basin: Near-Surface Pathways and Subsurface Exchange // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019. V. 124, Iss. 5. P. 2992–3006. doi: <https://doi.org/10.1029/2018jc014774>
2. Bosse A., Fer I., Soiland H., Rossby T. Atlantic water transformation along its poleward pathway across the Nordic Seas // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2018. N 123. doi: <https://doi.org/10.1029/2018JC014147>
3. Orvik K.A. The deepening of the Atlantic water in the Lofoten Basin of the Norwegian Sea, demonstrated by using an active reduced gravity model // *Geophysical Research Letters*. 2004. V. 31, L01306. doi: <https://doi.org/10.1029/2003GL018687>
4. Spall M.A. Non-local topographic influences on deep convection: An idealized model for the Nordic Seas // *Ocean Modelling*. 2010. V. 32. P. 72–85. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.10.009>
5. Gascard J.-C., Mork K.A. Climatic importance of large-scale and mesoscale circulation in the Lofoten Basin deduced from Lagrangian observations // *Arctic-Subarctic Ocean Fluxes. Defining the Role of the Northern Seas in Climate* / Ed. by Dickson R.R., Meincke J., Rhines P. Springer Science, 2008. P. 131–144.
6. Richards C.G., Straneo F. Observations of Water Mass Transformation and Eddies in the Lofoten Basin of the Nordic Seas // *Journal of Physical Oceanography*. 2015. 45. P. 1735–1756. doi: <https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0238.1>
7. Федоров А., Башмачников И., Белоненко Т. Зимняя конвекция в Лофотенской котловине по данным буев ARGO и гидродинамического моделирования // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. 2019. Т. 64, № 3. С. 491–511. doi: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.308>
8. Белоненко Т.В., Волков Д.Л., Ожигин В.К., Норден Ю.Е. Циркуляция вод в Лофотенской котловине Норвежского моря // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. 2014. Сер. 7. Вып. 2. С. 108–121.
9. Travkin V.S., Belonenko T.V. Seasonal variability of mesoscale eddies of the Lofoten Basin using satellite and model data // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2019. V. 19, N 5. ES5004, doi: <https://doi.org/10.2205/2019ES000676>
10. Зинченко В.А., Гордеева С.М., Собко Ю.В., Белоненко Т.В. Мезомасштабные вихри Лофотенской котловины по спутниковым данным // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 3. С. 46–54. doi: 10.7868/S2073667319030067
11. 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, № 4. С. 502–519. doi: 10.21638/spbu07.2019.308
12. Kovalevsky D.V., Bashmachnikov I.L., Alekseev G.V. Formation and decay of a deep convective chimney // *Ocean Modelling*. 2020. V. 148. 101583. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2020.101583>
13. Малинин В.Н., Догановский А.М. Гидросфера Земли. СПб.: Гидрометеиздат, 2004. 625 с.
14. Доронин Ю.П. Физика океана. СПб.: Изд. РГГМУ, 2000. 340 с.
15. Frank J. Millero. History of the Equation of State of Seawater // *Oceanography*. 2015. V. 23, N 3. doi: <https://doi.org/10.5670/oceanog.2010.21>
16. McDougall T.J., Barker P.M. Getting started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) Oceanographic Toolbox // *SCOR/IAPSO WG127*. 2011. 28 p.
17. Zuo H., Balmaseda M.A., Tietsche S., Mogensen K., Mayer M. The ECMWF operational ensemble reanalysis-analysis system for ocean and sea-ice: a description of the system and assessment // *Ocean Science*. 2019. V. 15, N 3. P. 779–808. doi: <https://doi.org/10.5194/os-15-779-2019>
18. Climate Data Operators // Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M). Electronic resource. URL: <https://code.mpiet.mpg.de/projects/cdo> (дата обращения: 10.04.2020).
19. Balmaseda M.A., Mogensen K., Weaver A.T. Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4 // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2013. N 139. P. 1132–1161. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.2063>
20. Global ocean physics reanalysis GLORYS12v1 // Copernicus Marine Environment Monitoring Service. Electronic resource. URL: http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=global_reanalysis_phy_001_030 (дата обращения: 31.01.2020).
21. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011. V. 137, N 656. P. 553–597. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.828>

22. Наумов Л.М., Гордеева С.М., Белоненко Т.В. Оценка потоков тепла, массы и соли в Лофотенской котловине Норвежского моря на основе данных реанализов // CITES'2019. Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде. 2019. С. 174–179.
23. Федоров К.Н., Перескоков А.И. Типизация термохалинных условий стратификации в мировом океане // Метеорология и гидрология. 1986. № 12. С. 71–77.
24. О возможных причинах аномальной погоды на территории России летом 2010 года // Гидрометцентр России. Интернет-ресурс. URL: <https://meteoinfo.ru/news/1-2009-10-01-09-03-06/3376-10112010-l-r> (дата обращения: 31.01.2020).
25. Stocker T.F. et al. Technical Summary in Climate Change 2013: the Physical Science Basis // Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013).

References

1. Dugstad J., Fer I., LaCasce J., Sanchez de La Lama M., Trodahl M. Lateral Heat Transport in the Lofoten Basin: Near-Surface Pathways and Subsurface Exchange. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019, 124, 5, 2992–3006. doi: <https://doi.org/10.1029/2018jc014774>
2. Bosse A., Fer I., Søiland H., Rossby T. Atlantic water transformation along its poleward pathway across the Nordic Seas. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2018, 123, doi: <https://doi.org/10.1029/2018JC014147>
3. Orvik K.A. The deepening of the Atlantic water in the Lofoten Basin of the Norwegian Sea, demonstrated by using an active reduced gravity model. *Geophysical Research Letters*. 2004, 31, L01306. doi: <https://doi.org/10.1029/2003GL018687>
4. Spall M.A. Non-local topographic influences on deep convection: An idealized model for the Nordic Seas. *Ocean Modelling*. 2010, 32, 72–85. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.10.009>
5. Gascard J.-C., Mork K.A. Climatic importance of large-scale and mesoscale circulation in the Lofoten Basin deduced from Lagrangian observations. *Arctic-Subarctic Ocean Fluxes. Defining the Role of the Northern Seas in Climate* / Ed. by Dickson R.R., Meincke J., Rhines P. Springer Science, 2008, 131–144.
6. Richards C.G., Straneo F. Observations of Water Mass Transformation and Eddies in the Lofoten Basin of the Nordic Seas. *Journal of Physical Oceanography*. 2015, 45, 1735–1756. doi: <https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0238.1>
7. Fedorov A.M., Bashmachnikov I.L., Belonenko T.V. Winter convection in the Lofoten Basin according to ARGO buoys and hydrodynamic modeling. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2019, 64, 3, 491–511. (in Russian). doi: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.308>
8. Belonenko T.V., Volkov D.L., Ozhigin V.K., Norden Yu.E. Circulation of waters in the Lofoten Basin of the Norwegian Sea. *Vestnik of Saint Petersburg University*. 2014, Ser.7, 2, 108–121 (in Russian)
9. Travkin V.S., Belonenko T.V. Seasonal variability of mesoscale eddies of the Lofoten Basin using satellite and model data. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2019, 19, 5, ES5004, doi: <https://doi.org/10.2205/2019ES000676>
10. 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, 12, 3, 46–54. doi: 10.7868/S2073667319030067
11. Belonenko T.V., Koldunov A.V., Sentyabov E.V., Karsakov A.L. Thermohaline structure of the Lofoten vortex in the Norwegian sea based on field research and hydrodynamic modeling. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2018, 63, 4, 502–519. doi: 10.21638/spbu07.2019.308 (in Russian).
12. Kovalevsky D.V., Bashmachnikov I.L., Alekseev G.V. Formation and decay of a deep convective chimney. *Ocean Modelling*. 2020, 148, 101583, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2020.101583>
13. Malinin V.N., Doganovsky A.M. Earth Hydrosphere. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2004. 625 p. (in Russian).
14. Doronin Yu.P. Ocean Physics. St. Petersburg, RSMU Publ., 2000, 340 p. (in Russian).
15. Frank J. Millero. History of the Equation of State of Seawater. *Oceanography*. 2015, 23, 3, doi: <https://doi.org/10.5670/oceanog.2010.21>
16. McDougall T.J., Barker P.M. Getting started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) Oceanographic Toolbox. *SCOR/IAPSO WG127*. 2011. 28 p.
17. Zuo H., Balmaseda M.A., Tietsche S., Mogensen K., Mayer M. The ECMWF operational ensemble reanalysis-analysis system for ocean and sea-ice: a description of the system and assessment. *Ocean Science*. 2019, 15, 3, 779–808. doi: <https://doi.org/10.5194/os-15-779-2019>
18. Climate Data Operators. Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M). Electronic resource. URL: <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo> (date of access: 10.04.2020).
19. Balmaseda M.A., Mogensen K., Weaver A.T. Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2013, 139, 1132–1161. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.2063>

20. Global ocean physics reanalysis GLORYS12v1. Copernicus Marine Environment Monitoring Service. Electronic resource. URL: http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=global_reanalysis_phy_001_030 (date of access: 31.01.2020).
21. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011, 137, 656, 553–597. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.828>
22. Naumov L.M., Gordeeva S.M., Belonenko T.V. Heat, mass and salt fluxes in the Lofoten Basin (Norwegian Sea) estimating using reanalysis data. *CITES'2019. International Young Scientists School and Conference on Computational Information Technologies for Environmental Sciences*. 2019, 174–179 (in Russian).
23. Fedorov K.N., Pereskokov A.I. Typification of thermohaline stratification conditions in the oceans. *Russian Meteorology and Hydrology*. 1986, 12, 71–77 (in Russian).
24. On the possible causes of abnormal weather in Russia in the summer of 2010. *Hydrometcenter Rossii*. Electronic resource. URL: <https://meteoinfo.ru/news/1-2009-10-01-09-03-06/3376-10112010-1-r> (date of access: 31.01.2020) (in Russian).
25. Stocker T.F. et al. Technical Summary in Climate Change 2013: the Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013).

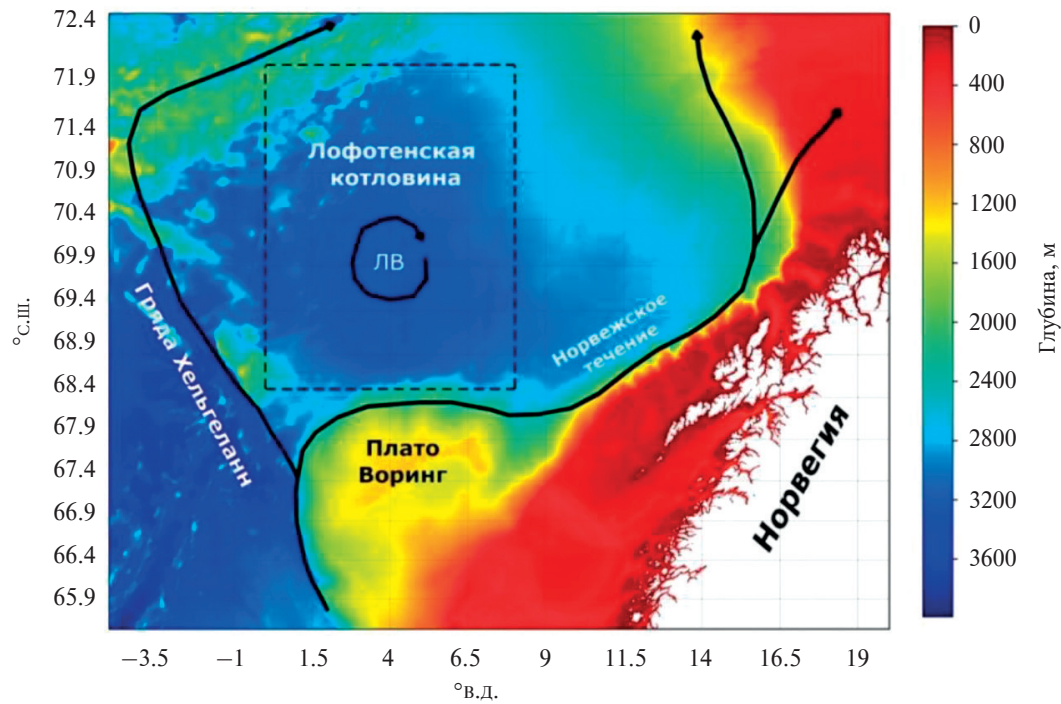


Рис. 1. Топография дна и основная циркуляция в Норвежском море. Регион исследования (ЛБ) выделен пунктиром. Стелками показаны основные течения и положение Лофотенского вихря (ЛВ).

Fig. 1. Bottom topography (color) and general circulation (arrows) of the study region. The dotted line shows the study area. Arrows show the main currents and the Lofoten vortex position.

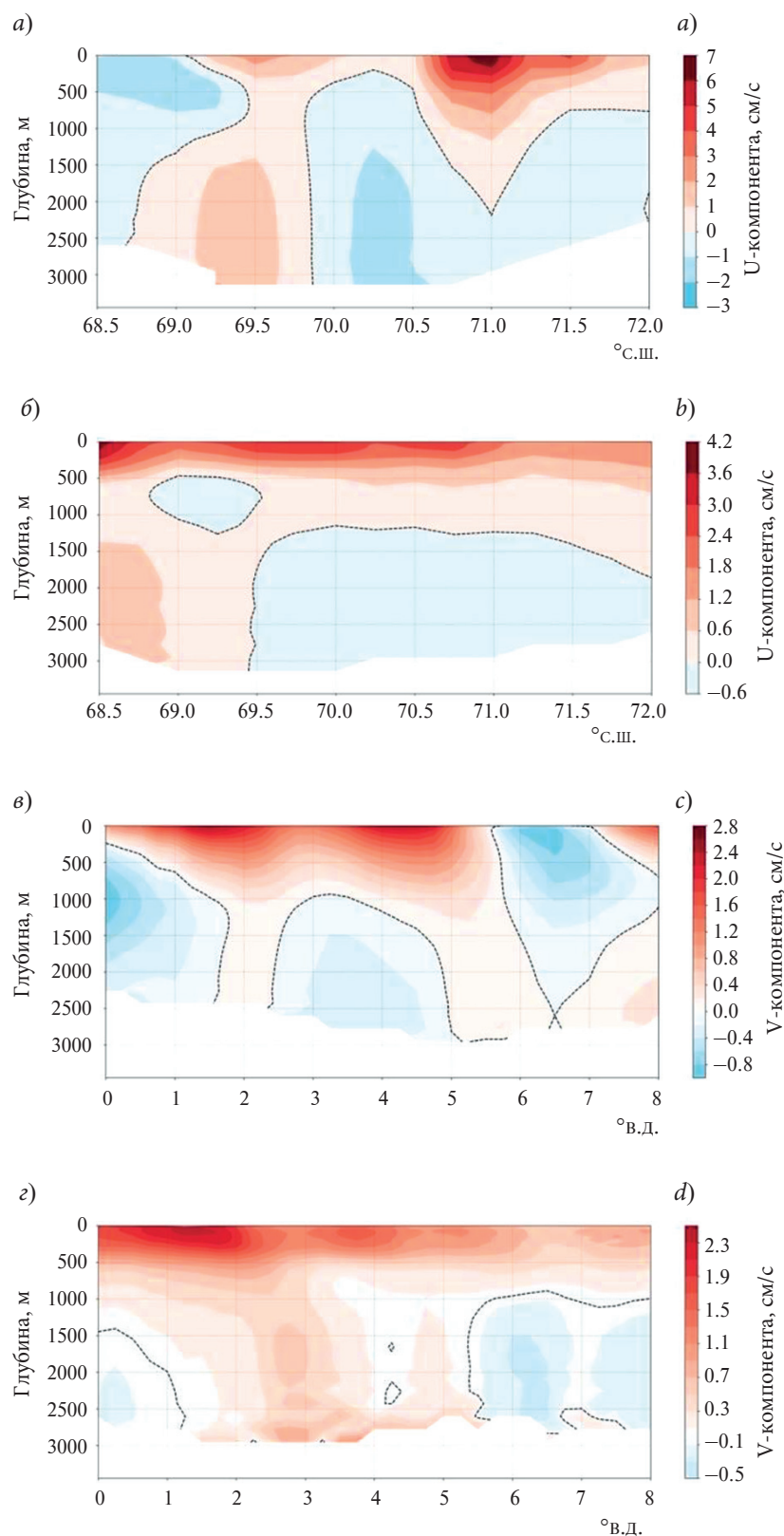


Рис. 2. Среднеголетние за период 1993–2016 гг. значения нормальных к разрезам скоростей течения по данным реанализа ORAS5 на меридиональных разрезах по 0° д. (а) и 8° в.д. (б), на широтных разрезах по 72° с.ш. (в) и 68.5° с.ш. (г). Черным контуром выделена нулевая изолиния.

Fig. 2. Normal to sections velocities according to the ORAS5 reanalysis data at meridional sections 0 °E (a) and 8 °E (b), at latitudinal sections 72 °N (c) and 68.5 °N (d) averaged for the period 1993–2016. Zero contour is shown in black color.