

# Локализация областей глубокой конвекции в морях Северо-Европейского бассейна, Лабрадор и Ирмингера\*

А. М. Федоров<sup>1, 2</sup>, И. Л. Башмачников<sup>1, 2</sup>, Т. В. Белоненко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,

Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

<sup>2</sup> Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена»,

Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, В.О., 14-я линия, 7, оф. 49-Н

**Для цитирования:** Федоров А. М., Башмачников И. Л., Белоненко Т. В. Локализация областей глубокой конвекции в морях Северо-Европейского бассейна, Лабрадор и Ирмингер // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018. Т. 63. Вып. 3. С. 345–362. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.306>

Получены пространственные распределения изменчивости глубин верхнего квазиоднородного слоя за 1950–2015 гг. по данным массива EN4. Показано, что глубины этого слоя в Гренландском море, достигающие 1500–2000 м, наблюдаются преимущественно в Гренландской котловине (73°–76° с. ш., 5° з. д.–1° в. д.), а также в области глубокой конвекции в бассейне Борейя (77° с. ш., 1,0–2,5° з. д.). Это позволило уточнить размеры таких областей, выделенных ранее по натурным данным и результатам гидродинамического моделирования. Показано, что разделяемые в предыдущих исследованиях области глубокой конвекции в морях Лабрадор (55–59° с. ш., 50–56° з. д.) и Ирмингера (57–60° с. ш., 35–43° з. д.) на самом деле представляют собой единую область, соединяясь в районе эпизодического возникновения глубокой конвекции (1000 м и более) южнее Гренландии, между 56°–58° с. ш. Исследована внутритроговая изменчивость глубокой конвекции за весь период наблюдений 1950–2015 гг. Показано, что максимальные глубины ВКС во всей трех морях обычно фиксируются в период с декабря по май. При этом в морях Лабрадор и Ирмингера конвекция чаще всего наиболее интенсивно развивается в марте, а в Гренландском море — в апреле.

*Ключевые слова:* Северная Атлантика, глубокая конвекция, массив данных EN4, глубина верхнего квазиоднородного слоя, моря Лабрадор, Ирмингера, Гренландское, Норвежское.

## 1. Введение

Зонально осредненный перенос вод в приповерхностном, глубинном и придонном слоях океанических бассейнов формирует глобальную систему циркуляции, связывающую Атлантический, Индийский, Тихий и Южный океаны и называемую *Глобальным океаническим конвейером*, или *петлей Брокера* (Broecker, 1991). Основное звено этой глобальной океанической циркуляции — *Атлантическая меридиональная термохалинная циркуляция* (АТХЦ). В ней средний поток приповерхностных вод на север связан с потоком глубинных вод на юг через зоны глу-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 17-17-01151.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2018

бокой конвекции, локализованные в нескольких северных приполярных областях Атлантического океана и в Северо-Европейском бассейне Северного Ледовитого океана (СЛО) — морях Лабрадор, Ирмингера и Гренландском (Marshall, Schott, 1999). Глубокая конвекция — один из ключевых процессов, определяющих интенсивность АТХЦ, а следовательно, и общую интенсивность переноса тепла в полярные районы Северного полушария, и аэрацию глубинных вод (Pérez, et al., 2013; Buckley and Marshall, 2016). Предполагается, что изменение интенсивности АТХЦ также влияет на изменения климата северного полушария (Drijfhout, et al., 2012; Latif, et al., 2006).

Главная причина глубокой конвекции — отрицательный поток плавучести в верхних слоях океана, обусловленный интенсивной отдачей тепла из океана в атмосферу (Piron, et al., 2017). Его передача наиболее эффективна, когда в исследованные зоны поступают воздушные массы из полярных областей Северной Америки и Гренландии. Развитию глубокой конвекции способствует осолонение приповерхностного слоя океанских вод на ранних стадиях интенсивного льдообразования (Moore, et al., 2015), а также общее ослабление стратификации вод ниже сезонного термоклина (Buckley and Marshall, 2016). Характер стратификации приповерхностных вод зависит от термодинамических характеристик поступающих в районы конвекции атлантических и полярных вод и от интенсивности циклонической циркуляции в субполярных бассейнах (Gelderloos, et al., 2013; Белоненко и др., 2018). Ослабление стратификации может быть следствием предшествующих эпизодов глубокой конвекции (Зеленько и Реснянский, 2007).

Положение очагов конвекции в Северной Атлантике и Северо-Европейском бассейне СЛО варьируется от года к году, но все-таки имеет определенную локализацию. В море Лабрадор по различным оценкам область глубокой конвекции соответствует зоне «Л» на рис. 1 (Marshall, Schott, 1999; Lavender, et al., 2002). В частности, данные измерений, полученные на судне погоды Bravo (Marshall, Schott, 1999) и на более чем 200 буях нейтральной плавучести за 1996–1998 гг. (Lavender, et al., 2002), указывают на восточную часть рассматриваемой акватории как на область глубокой конвекции, что также подтверждается результатами работы (Marshall, et al., 1998). Границы показанного на рис. 1 района определены по данным буев Argo за 2000—2007 гг. (Våge, et al., 2009).

По сравнению с морем Лабрадор, в море Ирмингера область глубокой конвекции не так обширна (зона «И» на рис. 1), и конвекция в ней достигает меньших глубин (Гладышев и др., 2016). Эта область глубокой конвекции была выделена по данным наблюдений на основе оценок максимальной глубины перемешивания в зимний период (Centurioni and Gould, 2004; Våge, et al., 2009), а также по пониженным значениям потенциальной завихренности (Pickart, 2003a, b; de Jong, et al., 2012, de Jong, et al., 2016).

Глубокая конвекция в Гренландском море (зона «Г» на рис. 1) в целом характеризуется наибольшей интенсивностью в районе исследования и имеет более ограниченную локализацию (Marshall, Schot, 1999; Wadhams, et al., 2002; Androsov, et al., 2005; Moore, et al., 2015). В работах (Johannessen, et al., 1991; Johannessen, et al., 2005) также указывается на наблюдения глубокой конвекции в бассейне Борейя в северной части Гренландского моря (зона «ГБ» на рис. 1).

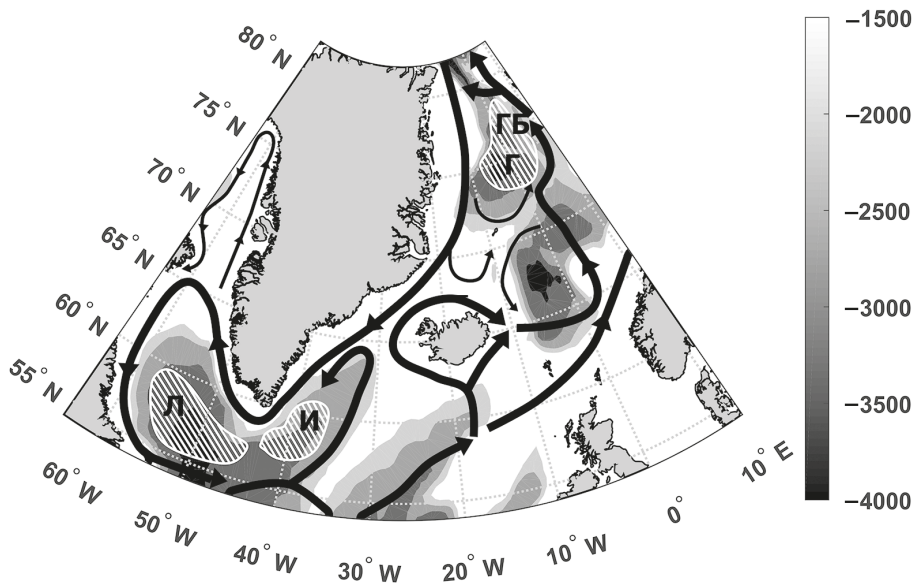


Рис. 1. Схема циркуляции и батиметрия рассматриваемого региона (глубины менее 1500 м не показаны). Заштрихованные области, ограниченные белыми линиями, охватывают районы глубокой конвекции согласно обзору литературных источников:

Л — в море Лабрадор (Marshall and Schott, 1999; Lavender, et al., 2002; Marshall, et al., 1998; Våge, et al., 2009), И — в море Ирмингера (Гладышев и др., 2016; Centurioni and Gould, 2004; Våge, et al., 2009; Pickart, 2003a, b; de Jong, et al., 2012; de Jong, et al., 2016), Г — в Гренландском море, ГБ — бассейн Борейя в Гренландском море (Marshall and Schot, 1999; Wadhams, et al., 2002; Androsov, et al., 2005; Moore, et al., 2015; Johannessen, et al., 1991; Johannessen, et al., 2005)

Расположение областей глубокой конвекции вблизи центральных областей циклонической циркуляции связано с подъемом изопикн и уменьшением интегрального теплосодержания верхнего слоя океана в этих районах (Белоненко и др., 2018).

В настоящей статье под областями конвекции средней интенсивности мы будем подразумевать области, в которых глубина перемешанного слоя превышает 500 м, а для глубокой конвекции — 1000 м. Данные критерии связаны с тем, что основной результат конвекции в районах исследования — это обновление промежуточных водных масс (Морецкий, Попов, 1989; Yashayaev, 2007; de Jong, et al., 2012; Jeansson, et al., 2017). Если конвекция достигает глубины 500 м, то обновляются промежуточная гренландская, промежуточная ирмингерская и верхняя лабрадорская водные массы, входящие в состав верхних фракций североатлантической глубинной водной массы. Если же конвекция пробивает слой в 1000 м, то начинается обновление гренландской глубинной и лабрадорской (классической) водных масс — основных составляющих североатлантической глубинной водной массы (Сарафанов, 2013). Именно последняя переносится на юг, составляя основную фракцию возвратного глубинного потока АТХЦ.

Максимальные глубины перемешанного слоя в рассматриваемых морях имеют значительную изменчивость и сильно варьируют от года к году. Глубины конвекции более 1000 м в Гренландском море зафиксированы в работах (Fischer, et al.,

1995; Budeus, et al., 1998; Latarius and Quadfase, 2016; Сарафанов, 2013), а более 2000 м — в работе (Wadhams, et al., 2002). На глубину конвекции в море Лабрадор, превышающую 1000 м, указывается в работах (Lazier, 2002; Gelderloos, et al., 2013; Yashayaev, 2007, Pickart, et al., 2002; Holte et al. 2017, Yashayaev, Loder, 2009; Lilly, 1998; Yashayaev, Loder, 2016, Сарафанов 2013; Фалина и др., 2017). В море Ирмингера глубина перемешанного слоя редко превышает 1000 м и чаще всего находится в пределах 800 м (Фалина и др., 2007; Гладышев и др. 2016, de Jong, et al., 2012; de Jong, et al., 2016).

В настоящей работе на основе анализа наиболее полного массива натуральных данных уточняются границы областей развития глубокой конвекции в морях Лабрадор, Ирмингера и Гренландском, а также даны основные оценки статистик пространственно-временной изменчивости глубин верхнего квазиоднородного слоя (ВКС).

## 2. Материалы и методы

Для расчета глубины ВКС в работе использовался неинтерполированный массив вертикальных профилей температуры и солености массива EN4<sup>1</sup> за 1950–2015 гг. Профили в EN4 достигают глубины 1000 м и более. Массив составлен на основе нескольких баз данных, включая данные наиболее часто используемого массива World Ocean Database (WOD).<sup>2</sup> Профили температуры и солености массива EN4 проходят дополнительный контроль для удаления недостоверных и дублирующихся значений (Good, et al., 2013).

Глубина ВКС определялась по двум эмпирическим методам, один из которых приведен в работе (Kara, et al., 2003), другой — в работе (Dukhovskoy, 2016).

**В методе Kara (Kara, et al., 2003)** глубина ВКС рассчитывается на основе сравнения потенциальных плотностей данного горизонта  $h$  и фиксированного верхнего реперного горизонта наблюдений  $\sigma(T_r, S_r)$ , где  $T_r$  и  $S_r$  — соответственно температура и соленость воды на реперном горизонте. За реперный горизонт  $r$  принимается верхняя точка вертикального профиля в промежутке глубин от 10 до 50 м. Горизонты выше 10 м игнорировались, чтобы минимизировать влияние суточного термоклина и измерительных неточностей на начальных отрезках вертикальных профилей. Эмпирический критерий представляет собой модуль разности плотности воды реперного горизонта и плотности воды с той же соленостью, но при температуре, которая на  $a^\circ\text{C}$  меньше, чем на реперном горизонте:

$$\Delta\sigma = \sigma(T_r, S_r) - \sigma(T_h, S_r),$$

где  $T_h = (T_r - 0,1)$  — температура воды на горизонте  $h$ .

Верхний горизонт, на котором разность плотностей с реперным горизонтом превышала  $\Delta\sigma$ , считается глубиной ВКС.

**В методе Д. Духовского (Dukhovskoy, 2016)** нет заранее заданного критерия разности плотностей, а за глубину ВКС принимается глубина  $h$ , на которой локальный градиент потенциальной плотности  $\left| \frac{d\sigma}{dz} \right|$  (здесь  $z$  — глубина) больше  $n$  сред-

<sup>1</sup> См. <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/en4/download-en4-0-2.html> (дата обращения: 09.08.2018).

<sup>2</sup> См. [https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr\\_wod.html](https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr_wod.html) (дата обращения: 09.08.2018).

неквадратических отклонений градиента потенциальной плотности в слое глубин  $\pm 100$  м от глубины  $h$ :  $[h - 100), (h + 100)]$ .

При наличии участков неустойчивой стратификации профили плотности предварительно искусственно перемешивались, чтобы выровнять неустойчивости, а мелкомасштабный шум в профилях плотности фильтровался методом скользящего среднего с шириной окна 10 м.

Так как оба метода определения глубины ВКС эмпирические, корректность работы алгоритмов контролировалась путем визуального анализа результатов автоматического определения глубины ВКС. Для метода (Kara, et al., 2003) наилучшие результаты были получены при  $a = 0,1^\circ\text{C}$ ; для метода (Dukhovskoy, 2016) наилучшими были результаты, полученные при двух ( $n = 2$ ) среднеквадратических отклонениях. Для большинства профилей оба метода показали примерно одинаковые глубины ВКС, но при слабом заглубленном скачке плотности метод (Dukhovskoy, 2016) позволял точнее определять эту глубину. Таким образом, последний был принят как основной метод для последующей работы с данными. Глубина конвекции определяется как максимальная глубина ВКС с ноября предыдущего по октябрь текущего года.

### 3. Результаты

#### 3.1. Гренландское и Норвежское моря

На рис. 2 приведены пространственные распределения максимальной глубины ВКС, зафиксированной за весь период наблюдений в Гренландском и Норвежском морях. Значения получены на регулярной сетке  $25 \times 25$  км. Для получения конечных распределений на рис. 2 проводилось пространственное сглаживание методом скользящего среднего с шириной окна, равной дискретности сетки. Положение областей глубокой конвекции в Гренландском море (обособленные области на рис. 2) в целом неплохо соответствует результатам других исследований (см. рис. 1). Глубины ВКС здесь достигают 1500–2000 м и тяготеют преимущественно к району  $73\text{--}76^\circ$  с. ш.,  $5^\circ$  з. д.,  $-1^\circ$  в. д., что позволяет сократить размеры области, выделенной в работе (Moore, et al., 2015) по данным гидродинамического моделирования. Помимо указанной обширной области глубокой конвекции выделяется также очаг конвекции с глубинами более 1000 м в бассейне Борейя, расположенный примерно на  $77^\circ$  с. ш.,  $1,0\text{--}2,5^\circ$  з. д., который ранее был указан в работах (Johannessen, et al., 1991, 2005; Wadhams, et al., 2002; Androsov, et al., 2005).

В Норвежском море выделяется область с максимальной глубиной конвекции более 600 м примерно на  $70^\circ$  с. ш.,  $0\text{--}5^\circ$  в. д., где расположен квазипостоянный Лофотенский вихрь (Башмачников и др., 2017; Белоненко и др., 2014, 2017; Volkov, et al., 2013, 2015). Зимнее перемешивание нередко проникает до хорошо перемешанного подповерхностного ядра вихря, формируя область конвекции средней интенсивности (Иванов и Кораблев, 1997; Блошкина и Иванов, 2016; Bashmachnikov, et al., 2017). Также высокая вероятность перемешивания до глубины более 500 м отмечается в северо-западной части Лофотенского бассейна на  $70\text{--}71^\circ$  с. ш.,  $0\text{--}3^\circ$  в. д. Данные области не относятся к традиционным районам глубокой конвекции Северной Атлантики, и формируемые в них в результате конвекции воды непосредственно не участвуют в АТХЦ.

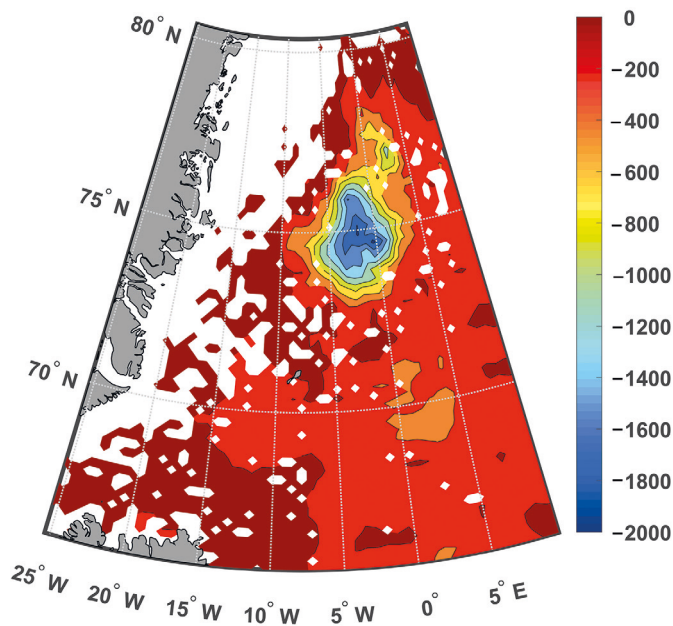


Рис. 2. Пространственное распределение глубины ВКС в Гренландском море за 1993–2015 гг. по данным массива EN4. Пространственное разрешение 25 × 25 км

Вероятность возникновения конвекции средней или большой интенсивности была оценена как доля профилей с глубиной конвекции более 500 (рис. 3, а) или более 1000 м (рис. 3, б) в общем числе профилей за зимний сезон (январь — апрель) (рис. 3, в), что показано соответствующими изолиниями. Профили с глубиной ВКС более 500 и 1000 м распределены по ячейкам размером 60 км в зональном и 90 км в меридиональном направлении. В центральной котловине Гренландского моря, а также в бассейне Борья наблюдается довольно много ячеек с более чем 50 вертикальными зондированиями. Практически на всем протяжении областей развития глубокой конвекции в обоих бассейнах (см. рис. 2) вероятность зимнего заглубления ВКС до 500 м составляла не менее 30 % (изолиния на рис. 3, а), до 1000 м — не менее 15 % (изолиния на рис. 3, б). В районе наибольших глубин конвекции с центром на 75° с. ш., 3° з. д. зимнее заглубление ВКС до 500 м и более зафиксировано не меньше чем на 25 профилях, а до 1000 м и более — на 15. Сравнение рис. 2 и 3 показывает, что в районе максимума глубин ВКС также максимальна вероятность глубокого перемешивания. Для Норвежского моря (область Лофотенского вихря, около 70° с. ш., 3° з. д.) в ячейках насчитывается не более 30–40 профилей (см. рис. 3, в), а глубины ВКС более 500 м наблюдаются в 5–10 % случаев.

### 3.2. Моря Лабрадор и Ирмингера

Для морей Лабрадор и Ирмингера было получено распределение максимальных глубин ВКС в ячейках 25 × 25 км (рис. 4). Видно, что определенные нами области с глубиной конвекции более 1000 м значительно обширнее областей, выде-



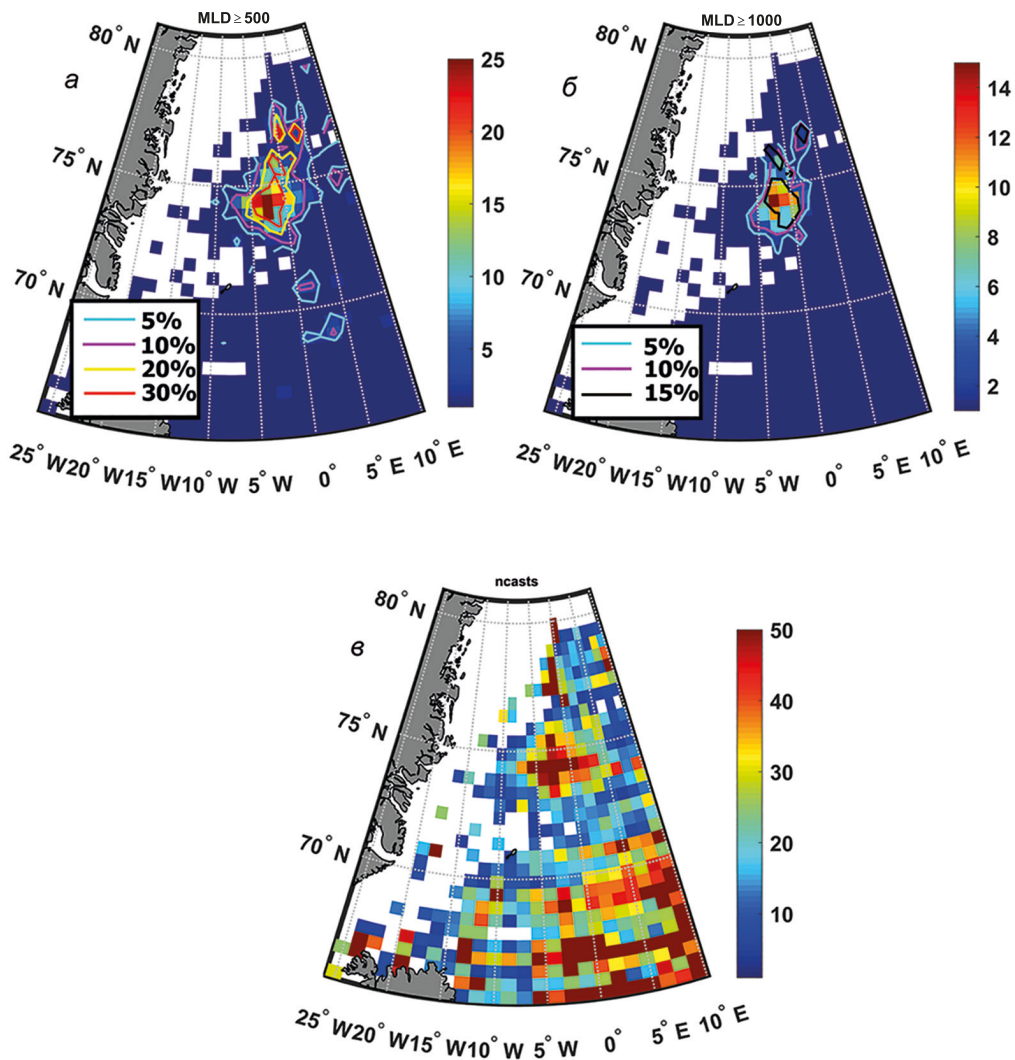


Рис. 3. Распределение профилей с различной глубиной ВКС в Гренландском море, %:

*a* — глубина ВКС более 500 м, *б* — глубина ВКС более 1000 м, *в* — общее число профилей за зимний сезон (январь—апрель) в 1950–2015 гг. Пространственное разрешение 60 км в зональном и 90 км в меридиональном направлении. Изолинии на рис. 3, *a* и *б*, показывают долю профилей с глубиной перемешивания более 500 и более 1000 м относительно данных на рис. 3, *в*

ленных по результатам предыдущих наблюдений и модельных расчетов (Pickart, et al., 2003b; Våge, et al., 2009; de Jong, et al., 2016; Holte, et al., 2017). В море Лабрадор область конвекции с зафиксированными глубинами ВКС более 1500 м соответствует району 57° с. ш., 55° з. д. Глубины конвекции более 1000 м (а в отдельных точках зафиксированы и глубины порядка 1500 м) располагаются к югу от Гренландии, соединяя ранее выделенные области максимальной конвекции в морях Лабрадор и Ирмингера. Область, где хоть однажды фиксировалась конвекция на глубине более 1000 м, простирается почти зонально между 56 и 58–59° с. ш. и 42–57° з. д.,

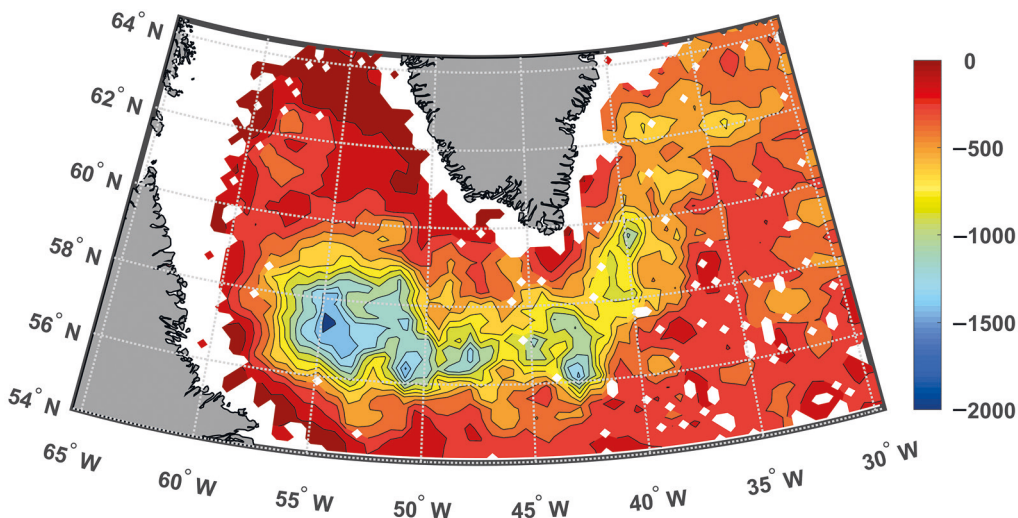


Рис. 4. Пространственное распределение максимальной глубины ВКС в морях Лабрадор и Ирмингера за 1993–2015 гг. Разрешение  $25 \times 25$  км

а в море Ирмингера (на  $38\text{--}42^\circ$  з. д.) она поднимается до  $60^\circ$  с. ш. К сожалению, за исключением моря Лабрадор, где в большинстве ячеек имеется более 25 измерений за весь период наблюдений (см. рис. 5, в), остальная часть выделенной области глубокой конвекции довольно скудно обеспечена наблюдениями — в большинстве ячеек сетки не более 5–10 профилей (см. рис. 5, в). Впрочем, контуры вероятности зимнего заглубления ВКС более чем на 500 м (не менее 30 % выполненных профилей, см. рис. 5, а) и более 1000 м (в некоторых точках — до 10–15 % выполненных профилей, см. рис. 5, в) повторяют изолинии максимальных глубин ВКС более 500 и более 1000 м (см. рис. 4), что свидетельствует о достаточно частом развитии конвекции в описанных выше областях. Максимальные глубины ВКС (порядка 2000 м) наблюдаются в море Лабрадор около  $57,5^\circ$  с. ш.,  $55^\circ$  з. д. (рис. 4), где также выявлено наиболее частое развитие глубокой конвекции (рис. 5, б). В море Ирмингера максимальная глубина ВКС (порядка 1000 м) зафиксирована около  $59^\circ$  с. ш.,  $40^\circ$  з. д.

### 3.3. Внутригодовая изменчивость глубокой конвекции

За 66 лет наблюдений максимальные за холодный сезон глубины ВКС чаще всего наблюдались в Гренландском море в апреле (17 раз, рис. 6, а), в море Лабрадор — в марте (19 раз, рис. 6, б), в море Ирмингера — в марте (11 раз, рис. 6, в). Однако в отдельные годы максимальные значения ВКС могут фиксироваться и в другие месяцы — с декабря по май.

Доля профилей с глубиной ВКС более 500 и более 1000 м (рис. 7) имеет схожую внутригодовую динамику, что и число зафиксированных максимальных глубин ВКС в отдельные месяцы (рис. 6). Доля профилей с глубиной ВКС, превышающей 500 м, максимальна в марте во всех трех морях и составляет 3 % общего числа профилей в Гренландском море (рис. 7, а), 15 % — в море Лабрадор (рис. 7, б) и 14 % — в море Ирмингера (рис. 7, в). Наибольшее число профилей с глубиной ВКС более



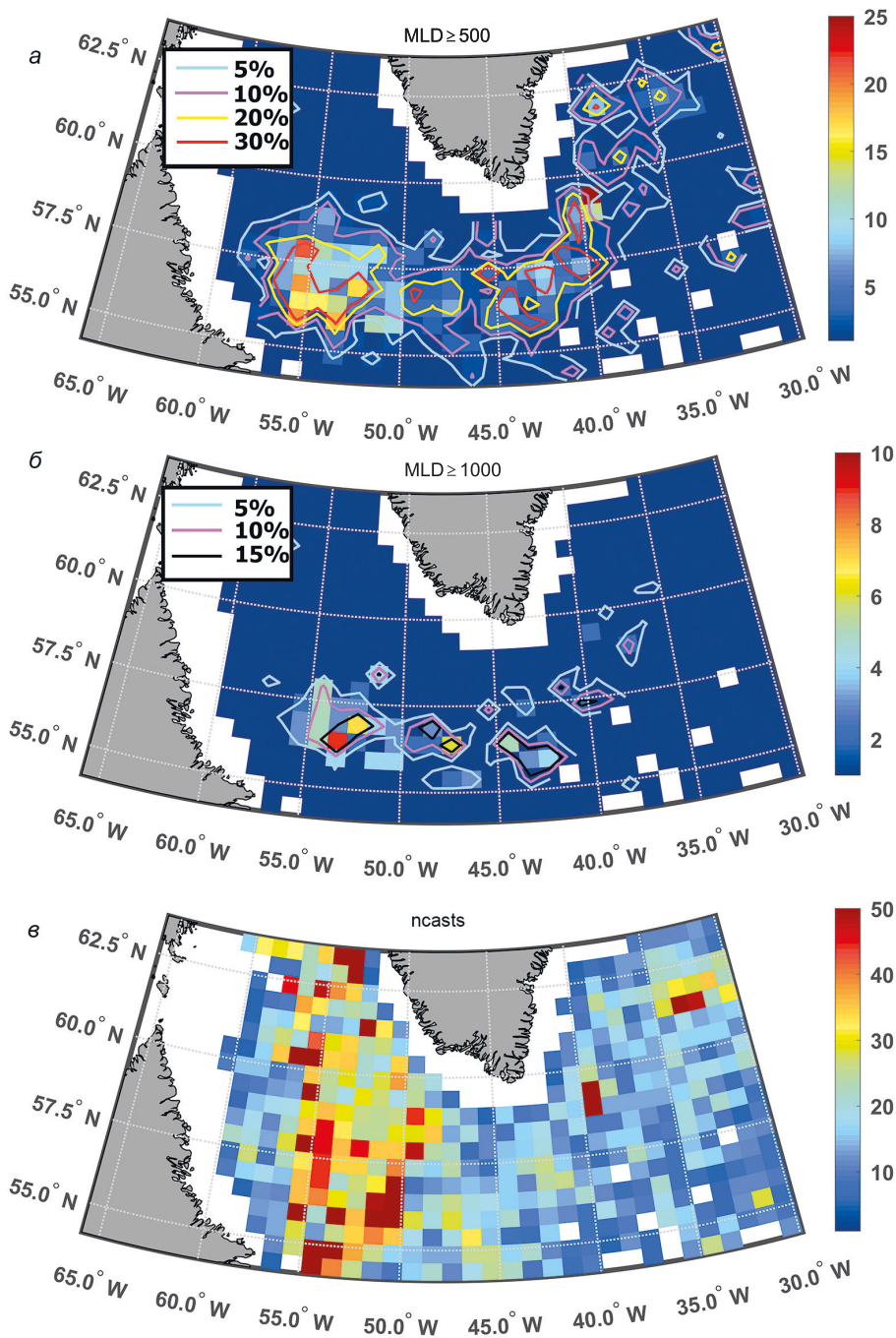


Рис. 5. Распределение профилей с различной глубиной ВКС в морях Лабрадор и Ирмингера: а — глубина ВКС более 500 м, б — глубина ВКС более 1000 м, в — число профилей за зимний сезон (январь — апрель) 1950–2015 гг. Пространственное разрешение 50 км в зональном и 60 км в меридиональном направлениях. Изолинии на рис. 5, а и б, показывают долю профилей с глубиной перемешивания более 500 и более 1000 м относительно данных на рис. 5, в

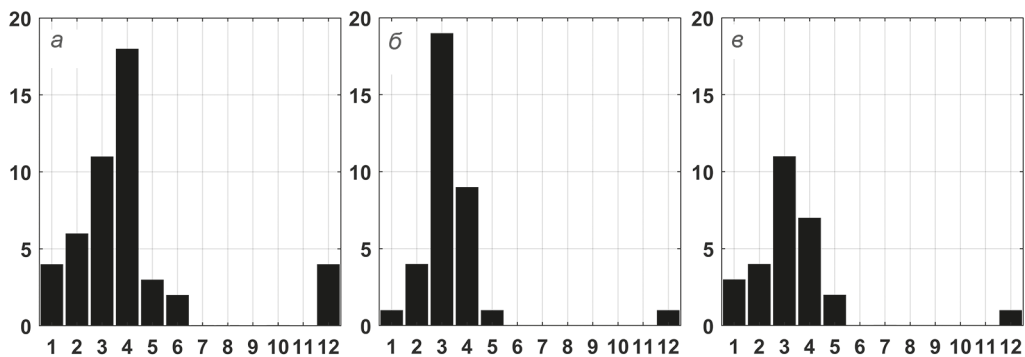


Рис. 6. Распределение по месяцам числа профилей с максимальной глубиной конвекции в морях Гренландском (а), Лабрадор (б) и Ирмингера (в)

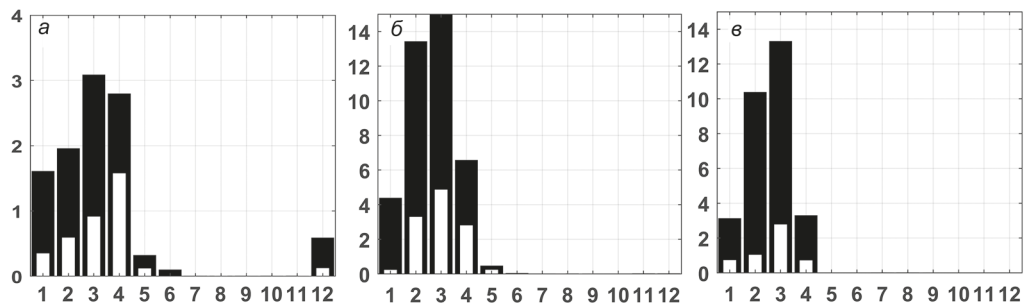


Рис. 7. Доля профилей с глубиной ВКС более 500 м (черный цвет) и более 1000 м (белый) в общем числе профилей по месяцам за период 1950–2015 гг. в морях Гренландском (а), Лабрадор (б) и Ирмингера (в), %

1000 м во всех трех морях за период 1950–2015 гг. наблюдается значительно реже и составляет 1,5 % в апреле в Гренландском море (рис. 7, а), 5 % в марте в море Лабрадор (рис. 7, б) и 3 % также в марте в море Ирмингера (рис. 7, в). В целом результаты показывают, что, как правило, в морях Лабрадор и Ирмингера конвекция достигает максимума интенсивности на месяц раньше, чем в Гренландском море.

#### 4. Обсуждение

В настоящей статье мы обобщили наиболее полные на данный момент результаты натурных наблюдений с 1950 по 2015 гг. (которые представляются достаточно надежными), чтобы локализовать области глубокой конвекции и выявить внутригодовую динамику развития глубокой конвекции в морях Северо-Европейского бассейна и Лабрадор—Ирмингера — основных районах формирования вод АТХЦ. Мы уточнили границы областей глубокой конвекции Гренландской котловины и котловины Борея по сравнению с предыдущими результатами анализа натурных данных (Marshall, Schot, 1999; Wadhams, et al., 2002; Johannessen, et al., 1991, 2005) и данных гидродинамического моделирования (Androsov, et al., 2005; Moore, et al., 2015). Мы также выявили связанность областей глубокой конвекции в морях Лабрадор и Ирмингера. Этот результат представляется наиболее значимым.

Еще в 1912 г. Ф. Нансен на основе крайне ограниченных данных о циркуляции в морях Лабрадор—Ирмингера осторожно предположил, что глубокая зимняя конвекция может развиваться в море Ирмингера вплоть до восточных областей моря Лабрадор (Nansen, 2012). В дальнейшем было обнаружено, что конвекция в море Лабрадор более интенсивна, чем в море Ирмингера. Результаты наблюдений конвекции в морях Лабрадор и Ирмингера были обобщены в работах (Marshall and Schott, 1999; Lavender, et al., 2002; Våge, et al., 2009; Kawasaki and Hasumi, 2014, и др.). Однако в них области развития глубокой конвекции в обоих морях рассматривались как несвязанные. В недавней работе (Фалина и др., 2017) были выделены районы пониженных значений вертикального градиента потенциальной плотности на основе данных профилирующих буев Argo за 2013–2014 гг. Использование эмпирического критерия позволило выделить области пониженных значений плотности, которые хорошо соответствуют выделенным нами областям развития глубокой конвекции на рис. 4 и 5 по данным наблюдений за глубиной перемешанного слоя. Это дополнительно подтверждает правильность наших выводов. В работе (Фалина и др., 2017) также указаны апрель и март как месяцы наиболее интенсивной конвекции в море Лабрадор.

Большинство авторов исследуют межгодовую изменчивость максимальной глубины конвекции в приполярных морях, которая может существенно меняться от года к году. Неоднозначность подобных исследований состоит в том, что непосредственно ячейки глубокой конвекции имеют весьма ограниченные размеры — 20–50 км в диаметре (Greenland..., 1990; Johannessen, et al., 1991; Ковалевский, 2002; Yashayaev, et al., 2007), внутри которых выделяются еще более мелкомасштабные конвективные структуры (Marshall and Schott, 1999). Размеры ячеек конвекции намного меньше характерного расстояния между океанологическими станциями, что сказывается на достоверности результатов подобных исследований. По данным анализа профилей, в Гренландском море максимальные глубины ВКС увеличивались с 1990-х к концу 2000-х гг., достигая 1500–2000 м и более (Wadhams, et al., 2002; Latarius and Quadfase, 2016). В море Лабрадор интенсивность конвекции в 2000-х гг., наоборот, уменьшалась (Våge, et al., 2009; Yashayaev, Loder, 2009). Глубины ВКС более 1500 м отмечались в 1990-х и 2014–2015 гг. (Våge, et al., 2009; Gelderloos, et al., 2013; Holte et al. 2017; Yashayaev, Loder, 2016). В море Ирмингера максимальные глубины ВКС, как правило, не превышают 1000 м (de Jong, et al., 2012; Våge, et al., 2009; Гладышев и др., 2016).

## 5. Выводы

В результате анализа пространственно-временной изменчивости глубин ВКС за 1950–2015 гг. по данным массива EN4 были получены следующие результаты.

Показано, что глубины ВКС в Гренландском море, достигающие 1500–2000 м, наблюдаются преимущественно в области 73°–76° с. ш., 5° з. д.–1° в. д. Уточнены границы области глубокой конвекции в бассейне Борейя в северной части Гренландского моря, где максимально зарегистрированная глубина конвекции составляла порядка 1000 м.

В Норвежском море выделяется область с максимальной глубиной конвекции, превышающей 500 м в районе квазипостоянного Лофотенского вихря, примерно

на 69–70° с. ш., 0–5° в. д., а также в районе северо-западной части Лофотенского бассейна на 70–71° с. ш., 0–3° в. д.

Показана связанность районов глубокой конвекции в морях Лабрадор и Ирмингера. Практически во всей этой области зафиксирована относительно высокая вероятность проникновения конвекции глубже 1000 м, при максимальных зафиксированных глубинах конвекции порядка 1000–1500 м, а в юго-западной части моря Лабрадор — более 1500–2000 м.

Исследована внутригодовая изменчивость глубокой конвекции в 1950–2015 гг. Показано, что максимальные глубины ВКС чаще всего фиксируются с декабря по май. В морях Лабрадор и Ирмингера чаще всего конвекция наиболее интенсивно развивалась в марте, а в Гренландском море — в апреле.

## Литература

- 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 С.-Петербург. ун-та. Сер. 7, 62(3), 221–236. 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.
- Белоненко, Т. В., Федоров, А. М., Башмачников, И. Л., Фукс, В. Р., 2018. Тренды интенсивности течений в Лабрадорском море и море Ирмингера по спутниковым альтиметрическим данным. Исследование Земли из космоса 2, 3–12.
- Белоненко, Т. В., Волков, Д. Л., Ожигин, В. К., Норден, Ю. Е., 2014. Циркуляция вод в Лофотенской котловине Норвежского моря. Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 7, 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.
- Гладышев, С. В., Гладышев, В. С., Фалина, А. С., Сарафанов, А. А., 2016. Зимняя конвекция в море Ирмингера в 2004–2014 гг. Океанология 56(3), 353–363. URL: <https://doi.org/10.7868/S0030157416030072>.
- Зеленько, А. А., Реснянский, Ю. Д., 2007. Глубокая конвекция в модели общей циркуляции океана: изменчивость на суточном, сезонном и межгодовом масштабах. Океанология 47(2), 211–224.
- Иванов, В. В., Кораблев, А. А., 1995. Формирование и регенерация внутрипикноклиновой линзы в Норвежском море. Метеорология и гидрология 9, 102–110.
- Ковалевский Д. В., 2002. Анализ и моделирование глубокой конвекции в Гренландском море. URL: <https://vivaldi.nlr.ru/bd000120788/view#page> (дата обращения: 09.08.2018).
- Морецкий, В. Н., Попов, А. В., 1989. Водные массы Норвежского и Гренландского морей и основные типы вертикальной структуры вод, в: Николаев, Ю. В., Алексеев, Г. В. (под ред.), Структура и изменчивость крупномасштабных океанологических процессов и полей в Норвежской энергоактивной зоне. Гидрометиздат, Ленинград, 18–27.
- Сарафанов, А. А., 2013. Циркуляция и термохалинные характеристики вод субарктической Атлантики: среднее состояние и изменения в масштабе десятилетий. URL: <http://www.dissercat.com/content/tsirkulyatsiya-i-termokhalinnye-kharakteristiki-vod-subarkticheskoi-atlantiki-srednee-sostoy> (дата обращения: 09.08.2018).
- Фалина, А. С., Сарафанов, А. А., Соков, А. В., 2007. К вопросу об обновлении Лабрадорской водной массы в бассейне Ирмингера. Океанология 47(4), 533–538.
- Фалина, А. С., Сарафанов, А. А., Добролюбов, С. А., Запотько, В. С., Гладышев, С. В., 2017. Конвекция и стратификация вод на севере Атлантического океана по данным измерений зимой 2013/14 гг. Вестник Московского ун-та. Сер. 5. География 4, 45–54.
- Androsov, A., Rubino, A., Romeiser, R., Sein, D. V., 2005. Open-ocean convection in the Greenland Sea: preconditioning through a mesoscale chimney and detectability in SAR imagery studied with a hi-

- erarchy of nested numerical models. *Meteorologische Zeitschrift* 14(6), 693–702. URL: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2005/0078>.
- 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 I*, 128, 1–27. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2017.08.001>.
- Broecker, W. S., 1991. The Great Ocean Conveyor. *Oceanography* 4, 79–89.
- Buckley, M. W., Marshall, J., 2016. Observations, inferences, and mechanisms of Atlantic Meridional Overturning Circulation variability: A review, *Rev. Geophys.* 54, 5–63. URL: <http://doi.org/10.1002/2015RG000493>.
- Budeus, G., Schneider, W., Krause, G., 1998. Winter convective events and bottom water warming in the Greenland Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 103(C9), 18513–18527.
- Centurioni, L. R., Gould, W. J., 2004. Winter conditions in the Irminger Sea observed with profiling floats. *Journal of Marine Research*, 62, 313–336. URL: <https://doi.org/10.1357/0022240041446209>
- de Jong, M. F., de Steur, L., 2016. Strong winter cooling of the Irminger Sea in winter 2014–15, exceptional deep convection, and the emergence of anomalously low SST. *Geophysical Research Letters* 43, 1717–1734. URL: <http://doi.org/10.1002/2016GL069596>.
- de Jong, M. F., van Aken, H. M., Våge, K., Pickart, R. S., 2012. Convective mixing in the central Irminger Sea: 2002–2010. *Deep Sea Research I: Oceanographic Research Papers* 63, 36–51.
- Drijfhout, S., van Oldenborgh, G. J., Cimadoribus, A., 2012. Is a Decline of AMOC Causing the Warming Hole above the North Atlantic in Observed and Modeled Warming Patterns? *Journal of Climate* 25, 8373–8379. URL: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00490.1>.
- Fischer, J., Schott, F., Visbeck, M., 1995. Greenland sea convection monitoring, in: *Nordic Seas Symposium*, 7–9 March 1995, Hamburg, 61–64.
- Dukhovskoy, D. S., Chassignet, E. P., Hogan, P. J., Metzger, E. J., Posey, P., Smedstad, O. M., Stefanova, L. B., Wallcraft, A. J., 2016. GC23H-07: Current state and recent changes in the Arctic Ocean from the HYCOM-NCODA Global Ocean and sea ice prediction system. URL: <https://agu.confex.com/agu/fm16/meetingapp.cgi/Paper/160356> (accessed 15.08.2018).
- Gelderloos, R., Katsman, C. A., Våge, K., 2013. Detecting Labrador Sea Water formation from space, *Journal of Geophysical Research: Oceans* 118, 2074–2086. URL: <http://doi.org/10.1002/jgrc.20176>.
- Good, S. A., Martin, M. J., Rayner, N. A., 2013. EN4: Quality controlled ocean temperature and salinity profiles and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 118, 6704–6716. URL: <http://doi.org/10.1002/2013JC009067>.
- Greenland Sea Project: a venture toward improved understanding of the ocean's role in climate? 1990. GSP Group (Eds.), *Eos, Transactions American Geophysical Union* 71(24), 750–756.
- Holte, J., Talley, L. D., Gilson, J., Roemmich, D., 2017. An Argo mixed layer climatology and database, *Geophysical Research Letters* 44, 5618–5626. URL: <http://doi.org/10.1002/2017GL073426>.
- Jeansson, E., Olsen, A., Jutterström, S., 2017. Arctic Intermediate Water in the Nordic Seas, 1991–2009. *Deep Sea Research I: Oceanographic Research Papers* 128, 82–97.
- Johannessen, O. M., Lygre, K., Eldevik, T., 2013. Convective Chimneys and Plumes in the Northern Greenland Sea, in: Drange, H., Dokken, T., Furevik, T., Gerdes, R., Berger, W. (Eds.), *The Nordic Seas: An Integrated Perspective*, Geophysical Monograph Series 158. Publ. American Geophysical Union Washington, D. C., 251–272. URL: <http://doi.org/10.1029/158GM17>.
- Johannessen, O. M., Sandven, S., Johannessen, J. A., 1991. Deep convection and deep water formation in the oceans. *Elsevier Oceanography Series* 57, 86–104.
- Kara, A. B., Rochford, P. A., Hurlburt, H. E., 2003. Mixed layer depth variability over the global ocean. *Journal of Geophysical Research* 108, 3079. URL: <http://doi.org/10.1029/2000JC000736>.
- Kawasaki, T., Hasumi, H., 2014. Effect of freshwater from the West Greenland Current on the winter deep convection in the Labrador Sea. *Ocean Modelling* 75, 51–64.
- Latarius, K., Quadfasel, D., 2016. Water mass transformation in the deep basins of the Nordic Seas: Analyses of heat and freshwater budgets. *Deep Sea Research I: Oceanographic Research Papers* 114, 23–42.
- Latif, M., Boning, C., Willebrand, J., Biastoch, A., Dengg, J., Keenlyside, N., Schweckendiek, U., Madec, G., 2006. Is the thermohaline circulation changing? *Journal of Climate* 19(18), 4631–4637. URL: <https://doi.org/10.1175/JCLI3876.1>.
- Lavender, K. L., Davis, R. E., Owens, W. B., 2002. Observations of open-ocean deep convection in the Labrador Sea from subsurface floats. *Journal of Physical Oceanography* 32, 511–526. URL: [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)032<0511:OOODC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032<0511:OOODC>2.0.CO;2).



- Lazier, J, Hendry, R., Clarke, A., Yashayaev, I., Rhines, P., 2002. Convection and restratification in the Labrador Sea, 1990–2000. *Deep Sea Research I*, 49(10), 1819–1835.
- Lilly, J. M., Rhines, P. B., Visbeck, M., Davis, R., Lazier, J. R., Schott, F., Farmer, D., 1999. Observing deep convection in the Labrador Sea during winter 1994/95. *Journal of Physical Oceanography* 29, 2065–2098. URL: [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<2065:ODCITL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<2065:ODCITL>2.0.CO;2)
- Marshall, J., Dobson, F., Moore, K., Rhines, P., Visbeck, M., d'Asaro, E., Bumke, K., Chang, S., Davis, R., Fischer, K., Garwood, R., Guest, P., Harcourt, R., Herbaut, C., Holt, T., Lazier, J., Legg, S., McWilliams, J., Pickart, R., Prater, M., Renfrew, I., Schott, F., Send, U., Smethie, W., 1998. The Labrador Sea Deep Convection Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79, 2033–2058. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<2033:TLSDCE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<2033:TLSDCE>2.0.CO;2)
- Marshall, J., Schott, F., 1999. Open-ocean convection: Observations, theory, and models. *Reviews of Geophysics* 37(1), 1–64.
- Moore, G. W. K., Våge, K., Pickart, R. S., Renfrew, I. A., 2015. Decreasing intensity of open-ocean convection in the Greenland and Iceland seas *Nature Climate Change* 5, 877–882. URL: <https://doi.org/1038/nclimate2688>.
- Nansen, F. Das Bodenwasser und die Abkühlung des Meeres, 1912. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie und Hydrographie* V, 1, 1–42.
- Pérez, F. F., Mercier, H., Vazquez-Rodriguez, M., Lherminier, P., Velo, A., Pardo, P., Roson, G., Rios, A., 2013. Reconciling air-sea CO<sub>2</sub> fluxes and anthropogenic CO<sub>2</sub> budgets in a changing North Atlantic. *Nature Geoscience* 6, 146–152, <https://doi.org/1038/ngeo1680>.
- Pickart, R. S., Spall, M. A., Ribergaard, M. H., Moore, G. W. K., Milliff, R. F., 2003a. Deep convection in the Irminger Sea forced by the Greenland tip jet. *Nature* 424, 6945, 152.
- Pickart, R. S., Straneo, F., Moore, G. W. K., 2003b. Is Labrador Sea Water formed in the Irminger basin? *Deep Sea Research I*, 50, 23–52. URL: [https://doi.org/1016/S0967-0637\(02\)00134-6](https://doi.org/1016/S0967-0637(02)00134-6).
- Pickart, R. S., Torres, D. J., Clarke, R. A., 2002. Hydrography of the Labrador Sea during active convection. *Journal of Physical Oceanography* 32, 428–457.
- Piron, A., Thierry, V., Mercier, H., Caniaux, G., 2016. Argo float observations of basin-scale deep convection in the Irminger sea during winter 2011–2012. *Deep Sea Research I*, 109, 76–90. URL: <https://doi.org/1016/j.dsr.2015.12.012>.
- Våge, K., Pickart, R. S., Thierry, V., Reverdin, G., Lee, C. M., Petrie, B., Agnew, T. A., Wong, A., Ribergaard, M. H., 2009. Surprising return of deep convection to the subpolar North Atlantic Ocean in winter 2007–2008. *Nature Geoscience* 2, 67–72. URL: <https://doi.org/1038/ngeo382>.
- 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, <https://doi.org/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 I*, 105, 142–157, <https://doi.org/1016/j.dsr.2015.09.001>.
- Wadhams, P., Holfort, J., Hansen, E., Wilkinson J. P., 2002. A deep convective chimney in the winter Greenland sea. *Geophysical Research Letters* 29(10), 76-1–76-4. <https://doi.org/10.1029/2001gl014306>.
- Yashayaev, I., 2007. Hydrographic changes in the Labrador Sea, 1960–2005. *Progress in Oceanography* 73, 242–276.
- Yashayaev, I., Loder, J. W., 2009. Enhanced production of Labrador Sea Water in 2008. *Geophysical Research Letters* 36(1), L01606. URL: <https://doi.org/1029/2008GL036162>.
- Yashayaev, I., Loder, J. W., 2016. Recurrent replenishment of Labrador Sea Water and associated decadal-scale variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 121, 8095–8114. URL: <http://doi.org/10.1002/2016JC012046>.

Статья поступила в редакцию 16 апреля 2018 г.

Статья рекомендована в печать 4 июля 2018 г.

#### Контактная информация:

Федоров Александр Михайлович — [aandmofficially@gmail.com](mailto:aandmofficially@gmail.com)

Баимачников Игорь Львович — [igorb1969@mail.ru](mailto:igorb1969@mail.ru)

Белоненко Татьяна Васильевна — [btvlibab@yandex.ru](mailto:btvlibab@yandex.ru)

# Localization of areas of deep convection in the Nordic seas, the Labrador Sea and the Irminger Sea

Fedorov A. M.<sup>1,2</sup>, Bashmachnikov I. L.<sup>1,2</sup>, Belonenko T. V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University,

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

<sup>2</sup> Nansen International Environmental and Remote Sensing Center,

St. Petersburg, 199034, Russian Federation

**For citation:** Fedorov A. M., Bashmachnikov I. L., Belonenko T. V. Localization of areas of deep convection in the Nordic seas, the Labrador Sea and the Irminger Sea. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2018, vol. 63, issue 3, pp. 345–362. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.306> (In Russian)

Using EN4 data-set from 1950 to 2015, the areas of the most intense deep convective mixing are identified as the maximum depths of the upper mixed layer during the cold season. It has been shown that the areas with the maximum registered convection depth of 1500–2000 m are found in the Greenland basin (73°–76° N, 5° W–1° E) and the Boreas basin (77° N, 1–2.5° W). This refines the areas of the deep convection derived from in situ data and results of hydrodynamic modeling. It has been shown that the previously separated in literature areas of deep convection in the Labrador Sea (55–59° N 50–56° W) and the Irminger Sea (57–60° N, 35–43° W), are in fact linked into one region by the episodic re-occurrence of the deep convection (1000 m and more) south of Greenland (between 56°–58° N). The intra-annual variability of deep convection was studied over the whole period of observations of 1950–2015. It is shown that the maximum depths of the upper mixed layer in all three seas was usually registered between December and May. The most often convection reaches the maximum depth in the Labrador and Irminger seas in March, and in the Greenland Sea — in April.

**Keywords:** North Atlantic, deep convection, EN4 data-set, depth of upper mixed layer, Labrador, Irminger, Greenland and Norwegian Seas.

## References

- Androsov, A., Rubino, A., Romeiser, R., Sein, D. V., 2005. Open-ocean convection in the Greenland Sea: preconditioning through a mesoscale chimney and detectability in SAR imagery studied with a hierarchy of nested numerical models. *Meteorologische Zeitschrift* 14(6), 693–702. URL: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2005/0078>.
- Bashmachnikov, I. L., Belonenko, T. V., Kuibin, P. A., 2017. Prilozhenie teorii kolonnoobraznykh Q-vikhrei s vintovoi strukturoi k opisaniu dinamicheskikh kharakteristiki Lofotenskogo vikhria Norvezhskogo moria [Application of the theory of columnar Q-vortices with helical structure for the Lofoten vortex in the Norwegian Sea]. *Vestnik S.-Peterburg. un-ta. Nauki o Zemle* [Herald S.-Petersburg. University. Earth Sciences] 62(3), 221–236. URL: <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 I*, 128, 1–27. URL: <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* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Atmosphere and ocean physics] 53(6), 641–649. (In Russian)
- Belonenko, T. V., Fedorov, A. M., Bashmachnikov, I. L., Foux, V. R., 2018. Trendy intensivnosti techenii v Labradorskom more i more Irmingera po sputnikovym al'timetriceskim dannym [Trends in Cur-

- rent Intensity in the Labrador Sea and the Irminger Sea from Satellite Altimetry Data]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth exploration from space]* 2, 3–12. (In Russian)
- Belonenko, T. V., Volkov, D. L., Norden, Yu. E., Ozhigin, V. K., 2014. Tsirkulatsiia vod v Lofotenskoj kotlovine Norvezhskogo moria [Water circulation in the Lofoten basin of the Norwegian sea]. *Vestn. S.-Peterburg. un-ta. Nauki o Zemle [Herald S.-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 simulation results with high spatial resolution]. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiiskoi Federatsii [Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation]* 361, 146–168. (In Russian)
- Broecker, W.S., 1991. The Great Ocean Conveyor. *Oceanography* 4, 79–89.
- Budeus, G., Schneider, W., Krause, G., 1998. Winter convective events and bottom water warming in the Greenland Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 103(C9), 18513–18527.
- Centurioni, L. R., Gould, W. J., 2004. Winter conditions in the Irminger Sea observed with profiling floats. *Journal of Marine Research*, 62, 313–336. URL: <https://doi.org/10.1357/0022240041446209>
- de Jong, M. F., de Steur, L., 2016. Strong winter cooling of the Irminger Sea in winter 2014–15, exceptional deep convection, and the emergence of anomalously low SST. *Geophysical Research Letters* 43, 1717–1734. URL: <http://doi.org/10.1002/2016GL069596>.
- Drijfhout, S., van Oldenborgh, G. J., Cimadoribus, A., 2012. Is a Decline of AMOC Causing the Warming Hole above the North Atlantic in Observed and Modeled Warming Patterns? *Journal of Climate* 25, 8373–8379. URL: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00490.1>.
- Dukhovskoy, D. S., Chassignet, E. P., Hogan, P. J., Metzger, E. J., Posey, P., Smedstad, O. M., Stefanova, L. B., Wallcraft, A. J., 2016. Current State and Recent Changes in the Arctic Ocean from the HYCOM-NCODA Global Ocean and Sea Ice Prediction System, GC23H-07, presented at 2016 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 12–16 Dec.
- Falina A. S., Sarafanov A. A., Dobrolyubov S. A., Zapotytko V. S., Gladyshev S. V., 2017. Konveksiia i stratifikatsiia vod na severe Atlanticheskogo okeana po dannym izmerenii zimoi 2013/14 gg. [Water convection and stratification in the Northern Atlantic data of in situ measurements in winter 2013/14]. *Vestnik Moskovskogo un-ta. Ser. 5. Geografiiia [Herald of the Moscow University. Series Geography]* 4, 45–54. (In Russian)
- Falina, A. S., Sarafanov, A. A., Sokov, A. V., 2007. K voprosu ob obnovlenii Labradorskoi vodnoi massy v basseine Irmingera [On the renewal of Labrador sea water in the Irminger basin]. *Okeanologiiia [Oceanology]* 47(4), 494–499. (In Russian)
- Fischer, J., Schott, F., Visbeck, M., 1995. Greenland sea convection monitoring, in: *Nordic Seas Symposium*, 7–9 March 1995, Hamburg, 61–64.
- Gelderloos, R., Katsman, C. A., Våge, K., 2013. Detecting Labrador Sea Water formation from space, *J. Geophys. Res. Oceans* 118, 2074–2086. URL: <http://doi.org/10.1002/jgrc.20176>.
- Gladyshev, S. V., Gladyshev, V. S., Falina, A. S., Sarafanov, A. A., 2016. Zimniaia konveksiia v more Irmingera v 2004–2014 gg. [Winter Convection in the Irminger Sea in 2004–2014]. *Okeanologiiia [Oceanologia]* 56(3), 353–363. URL: <https://doi.org/10.7868/S0030157416030072>. (In Russian)
- Good, S. A., Martin, M. J., Rayner, N. A., 2013. EN4: Quality controlled ocean temperature and salinity profiles and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 118, 6704–6716. URL: <http://doi.org/10.1002/2013JC009067>.
- Greenland Sea Project: a venture toward improved understanding of the ocean's role in climate? 1990. GSP Group (Eds.), *Eos, Transactions American Geophysical Union* 71(24), 750–756.
- Holte, J., Talley, L. D., Gilson, J., Roemmich, D., 2017. An Argo mixed layer climatology and database, *Geophysical Research Letters* 44, 5618–5626. URL: <http://doi.org/10.1002/2017GL073426>.
- Jeansson, E., Olsen, A., Jutterström, S., 2017. Arctic Intermediate Water in the Nordic Seas, 1991–2009. *Deep Sea Research I: Oceanographic Research Papers* 128, 82–97.
- Johannessen, O. M., Lygre, K., Eldevik, T., 2013. Convective Chimneys and Plumes in the Northern Greenland Sea, in: Drange, H., Dokken, T., Furevik, T., Gerdes, R., Berger, W. (Eds.), *The Nordic Seas: An Integrated Perspective*, Geophysical Monograph Series 158. Publ. American Geophysical Union Washington, D. C., 251–272. URL: <http://doi.org/10.1029/158GM17>.

- Ivanov, V. V., Korablev, A. A., 1995. Formirovanie i regeneratsiia vnutripiknoklinnoi linzy v Norvezhskom more [Formation and regeneration of the intrapycnocline lens in the Norwegian Sea]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology] 9, 102–110. (In Russian)
- Johannessen, O. M., Sandven, S., Johannessen, J. A., 1991. Deep convection and deep water formation in the oceans. *Elsevier Oceanography Series* 57, 86–104.
- Kara, A. B., Rochford, P. A., Hurlburt, H. E., 2003. Mixed layer depth variability over the global ocean. *Journal of Geophysical Research* 108, 3079. URL: <http://doi.org/10.1029/2000JC000736>.
- Kawasaki, T., Hasumi, H., 2014. Effect of freshwater from the West Greenland Current on the winter deep convection in the Labrador Sea. *Ocean Modelling* 75, 51–64.
- Kovalevsky D. V., 2002. Analiz i modelirovanie glubokoi konveksii v Grenlandskom more [Analysis and modeling of deep convection in the Greenland Sea]. URL: <https://vivaldi.nlr.ru/bd000120788/view#page=> (accessed 09.08.2018). (In Russian)
- Latarius, K., Quadfasel, D., 2016. Water mass transformation in the deep basins of the Nordic Seas: Analyses of heat and freshwater budgets. *Deep Sea Research I: Oceanographic Research Papers* 114, 23–42.
- Latif, M., Boning, C., Willebrand, J., Biastoch, A., Dengg, J., Keenlyside, N., Schweckendiek, U., Madec, G., 2006. Is the thermohaline circulation changing? *Journal of Climate* 19(18), 4631–4637. URL: <https://doi.org/10.1175/JCLI3876.1>.
- Lavender, K. L., Davis, R. E., Owens, W. B., 2002. Observations of open-ocean deep convection in the Labrador Sea from subsurface floats. *Journal of Physical Oceanography* 32, 511–526. URL: [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)032<0511:OOODC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032<0511:OOODC>2.0.CO;2).
- Lazier, J., Hendry, R., Clarke, A., Yashayaev, I., Rhines, P., 2002. Convection and restratification in the Labrador Sea, 1990–2000. *Deep Sea Research I*, 49(10), 1819–1835.
- Lilly, J. M., Rhines, P. B., Visbeck, M., Davis, R., Lazier, J. R., Schott, F., Farmer, D., 1999. Observing deep convection in the Labrador Sea during winter 1994/95. *Journal of Physical Oceanography* 29, 2065–2098. URL: [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<2065:ODCITL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<2065:ODCITL>2.0.CO;2)
- Marshall, J., Dobson, F., Moore, K., Rhines, P., Visbeck, M., d'Asaro, E., Bumke, K., Chang, S., Davis, R., Fischer, K., Garwood, R., Guest, P., Harcourt, R., Herbaut, C., Holt, T., Lazier, J., Legg, S., McWilliams, J., Pickart, R., Prater, M., Renfrew, I., Schott, F., Send, U., Smethie, W., 1998. The Labrador Sea Deep Convection Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79, 2033–2058.
- Marshall, J., Schott, F., 1999. Open-ocean convection: Observations, theory, and models. *Reviews of Geophysics* 37(1), 1–64.
- Moore, G. W. K., Våge, K., Pickart, R. S., Renfrew, I. A., 2015. Decreasing intensity of open-ocean convection in the Greenland and Iceland seas *Nature Climate Change* 5, 877–882. URL: <https://doi.org/10.1038/nclimate2688>.
- Moretsky, V. N., Popov, A. V., 1989. Vodnye massy Norvezhskogo i Grenlandskogo morei i osnovnye tipy vertikal'noi struktury vod [Water masses of the Norwegian and Greenland seas and the main types of vertical water structure], in: Nikolaev, Y. V., Alekseev, G. V. (Eds.), *Struktura i izmenchivost' krupnomasshtabnykh okeanologicheskikh protsessov i polei v Norvezhskoi energoaktivnoi zone* [Structure and variability of large-scale oceanological processes and fields in the Norwegian energy-active zone]. *Gidrometizdat, Leningrad*, 18–27. (In Russian)
- Nansen, F. Das Bodenwasser und die Abkühlung des Meeres, 1912. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie und Hydrographie* V, 1, 1–42.
- Pérez, F. F., Mercier, H., Vazquez-Rodriguez, M., Lherminier, P., Velo, A., Pardo, P., Roson, G., Rios, A., 2013. Reconciling air-sea CO<sub>2</sub> fluxes and anthropogenic CO<sub>2</sub> budgets in a changing North Atlantic. *Nature Geoscience* 6, 146–152, <https://doi.org/10.1038/ngeo1680>.
- Pickart, R. S., Spall, M. A., Ribergaard, M. H., Moore, G. W. K., Milliff, R. F., 2003a. Deep convection in the Irminger Sea forced by the Greenland tip jet. *Nature* 424, 6945, 152.
- Pickart, R. S., Straneo, F., Moore, G. W. K., 2003b. Is Labrador Sea Water formed in the Irminger basin? *Deep Sea Research I*, 50, 23–52. URL: [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(02\)00134-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(02)00134-6).
- Pickart, R. S., Torres, D. J., Clarke, R. A., 2002. Hydrography of the Labrador Sea during active convection. *Journal of Physical Oceanography* 32, 428–457.
- Piron, A., Thierry, V., Mercier, H., Caniaux, G., 2016. Argo float observations of basin-scale deep convection in the Irminger sea during winter 2011–2012. *Deep Sea Research I*, 109, 76–90. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.12.012>.

- Sarafanov, A. A., 2013. Tsirkulyatsiya i termokhalinnye kharakteristiki vod subarkticheskoi Atlantiki: srednee sostoianie i izmeneniia v masshtabe desiatiletii [Circulation and thermochaline characteristics of the waters of the subarctic Atlantic: the average state and changes in the scale of decades]. URL: <http://www.dissercat.com/content/tsirkulyatsiya-i-termokhalinnye-kharakteristiki-vod-subarkticheskoi-atlantiki-srednee-sostoy> (accessed 09.08.2018). (In Russian)
- Våge, K., Pickart, R. S., Thierry, V., Reverdin, G., Lee, C. M., Petrie, B., Agnew, T. A., Wong, A., Ribergaard, M. H., 2009. Surprising return of deep convection to the subpolar North Atlantic Ocean in winter 2007–2008. *Nature Geoscience* 2, 67–72. URL: <https://doi.org/1038/ngeo382>.
- 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, <https://doi.org/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 I*, 105, 142–157, <https://doi.org/1016/j.dsr.2015.09.001>.
- Wadhams, P., Holfort, J., Hansen, E., Wilkinson J. P., 2002. A deep convective chimney in the winter Greenland sea. *Geophysical Research Letters* 29(10), 76-1–76-4. <https://doi.org/10.1029/2001gl014306>.
- Yashayev, I., 2007. Hydrographic changes in the Labrador Sea, 1960–2005. *Progress in Oceanography* 73, 242–276.
- Yashayev, I., Loder, J. W., 2009. Enhanced production of Labrador Sea Water in 2008. *Geophysical Research Letters* 36(1), L01606. URL: <https://doi.org/1029/2008GL036162>.
- Yashayev, I., Loder, J. W., 2016. Recurrent replenishment of Labrador Sea Water and associated decadal-scale variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 121, 8095–8114. URL: <http://doi.org/10.1002/2016JC012046>.
- Zelen'ko, A. A., Resnyanskiy, Yu. D., 2007. Glubokaia konvektsiya v modeli obshchei tsirkulyatsii okeana: izmenchivost' na sutochnom, sezonnom i mezhgodovom masshtabakh [Deep convection in the model of general ocean circulation: variability at daily, seasonal and interannual scales]. *Okeanologiya* [Oceanology] 47(2), 211–224. (In Russian)

Received: April 16, 2018

Accepted: July 4, 2018

#### Author's information:

*Aleksandr M. Fedorov* — [aandmofficially@gmail.com](mailto:aandmofficially@gmail.com)

*Igor L. Bashmachnikov* — [igorb1969@mail.ru](mailto:igorb1969@mail.ru)

*Tatyana V. Belonenko* — [btvlisab@yandex.ru](mailto:btvlisab@yandex.ru)