Термохалинная конвекция в субполярных морях Северной Атлантики и Северо-Европейского бассейна СЛО по спутниковым и натурным данным. Часть 1: локализация областей конвекции

И. Л. Башмачников^{1,2}, А. М. Федоров^{1,2}, А. В. Весман^{1,2,3}, Т. В. Белоненко¹, А. В. Колдунов¹, Д. С. Духовской⁴

¹ Санкт-Петербургский государственный университет Санкт-Петербург, 199034, Россия

² Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена, Санкт-Петербург, 199034, Россия

³ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт Санкт-Петербург, 199397, Россия

⁴ Центр прогнозов океана и атмосферы Флоридского университета Таллахасси, FL 32306-2741, США

E-mails: igorb1969@mail.ru, aandmofficially@gmail.com, anna.vesman@gmail.com, t.v.belonenko@spbu.ru, koldunovaleksey@gmail.com, ddukhovskoy@fsu.edu

Глубокая конвекция в Гренландском море и морях Лабрадор и Ирмингера, являясь частью глобального океанского конвейера (атлантической термохалинной циркуляции), представляет собой важный компонент климатической системы Земли. Натурные исследования межгодовой изменчивости глубокой конвекции сталкиваются с существенными трудностями в связи с малым размером конвективных ячеек и межгодовой изменчивостью их положения в пределах акваторий морей. В работе на основе комбинированного массива натурных и спутниковых данных ARMOR уточнены области наиболее частого возникновения конвекции в исследуемых морях. Показано, что в морях Лабрадор и Ирмингера развитие глубокой конвекции (>1000 м) происходит в связанной области, охватывающей большую часть акваторий обоих морей. Внутри области выделяются три сравнительно небольших района наиболее частого развития глубокой конвекции. Помимо двух традиционно выделяемых областей, глубокая конвекция часто происходила на стыке двух морей, южнее мыса Фарвель. В морях Лабрадор и Ирмингера конвекция, как правило, достигает максимальной глубины в марте. В Гренландском море глубокая конвекция наиболее часто возникает в двух районах — в центральной и в юго-восточной частях моря, а также в котловине Борея. Конвекция обычно достигает максимальной глубины в апреле.

Ключевые слова: глубокая конвекция, массивы с ассимиляцией спутниковых данных, Гренландское море, море Лабрадор, море Ирмингера

Одобрена к печати: 05.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-184-194

Введение

Будучи неотъемлемым компонентом атлантической термохалинной циркуляции (АТХЦ), интенсивность глубокой конвекции в Гренландском море, морях Лабрадор и Ирмингера является важным звеном глобальной климатической системы (Lozier et al., 2013; Rhein et al., 2015). Основной вклад в АТХЦ вносят воды Гренландского моря (Buckley, Marshall, 2016), а вертикальные конвективные потоки в море Лабрадор оцениваются как 1/3 общего переноса АТХЦ (Rhein et al., 2011; Yashayaev, 2007). До 50 % наименее плотных вод лабрадорской водной массы АТХЦ может также быть результатом глубокой конвекции в море Ирмингера (Гладышев и др., 2016). С 1980-х гг. серии натурных экспериментов (Drange et al., 2005; Greenland Sea Project..., 1990), теоретические и численные модели (Deep..., 1991; Killworth, 1983; Marshall, Schott, 1999; Moore et al., 2015) позволили выявить основные места и закономерности формирования и исчезновения областей глубокой конвекции.

Как правило, районы глубокой конвекции выделяются по наблюдениям максимальной глубины перемешанного слоя: Гренландское море (Нагурный, Попов, 1985; Budeus et al., 1998; Clarke et al., 1990; Greenland Sea Project..., 1990; Latarius, Quadfase, 2016; Malmberg, 1983; Ronski, Budeus, 2005), море Лабрадор (Gelderloos et al., 2013; Holte et al., 2017; Lazier, 2002; Kawasaki, Hasumi, 2014; Pickart et al., 2002; Rhein et al., 2011; Yashayaev, 2007; Yashayaev, Clarke, 2008; Yashayaev, Loder, 2009), море Ирмингера (Гладышев и др., 2016; de Jong et al., 2012; Fröb et al., 2016). Однако ограниченность баз данных приводит к существенной разнице в оценках максимальной глубины перемешанного слоя за год. Так, оценки максимальной глубины конвекции в 2003 г. в море Лабрадор колеблются от 500 м (Holte et al., 2017) до 1000-1500 м (Gelderloos et al., 2013). В Гренландском море зимой 1989 г., по разным данным, глубина конвекции составляла от 1400 до 2000 м (Greenland Sea Project..., 1990). Порой оценки глубины конвекции представлены в виде весьма широкого диапазона глубин — от 500 до 1000 м (Гладышев и др., 2016; Budeus et al., 1998). Это также является причиной неоднозначности в локализации областей развития конвекции. В предлагаемой статье представлен наиболее объективный результат анализа натурных и экстраполированных спутниковых наблюдений, что позволяет уточнить границы областей развития конвекции в Северной Атлантике.

Под областями конвекции средней интенсивности мы будем подразумевать области, где глубина перемешанного слоя превышает 500 м, а глубокой конвекции — 1000 м. Выбор критических горизонтов связан с примерным положением верхней границы фракций промежуточных водных масс в районах исследования: верхней фракции (промежуточной гренландской, промежуточной Ирмингера и верхней фракции лабрадорской водных масс) и нижней фракции (гренландской глубинной и лабрадорской (классической) водных масс) (Морецкий, Попов, 1989; Сарафанов и др., 2013; de Jong et al., 2012; Jeansson et al., 2017; Rudels et al., 2002; Yashayaev, 2007).

Материалы и методы

Для анализа на основе литературных источников были выделены области возможного возникновения глубокой конвекции (см. границы областей на *puc. 1*, см. с. 186). В этих областях на период наиболее вероятного развития глубокой конвекции (с января по апрель текущего года) было оценено количество *in situ* профилей температуры и солёности, достигающих 1000 м. Было установлено, что в морях Лабрадор и Ирмингера количество зимних профилей стабильно превышало 30 с конца 1990-х — начала 2000 гг. и было выше 100 только после 2009 г., а в Гренландском море не превышало 80 за весь период наблюдений (*puc. 2a*). Именно с первой половины 2000-х гг. достаточно равномерное распределение данных по пространству и времени делает анализ наиболее репрезентативным. Это связано с развитием программ регулярного мониторинга приполярных морей и присутствием в акваториях профилирующих буёв Арго.

В качестве основных массивов натурных данных были взяты массивы вертикальных профилей температуры и солёности *in situ* EN4 Hadley Center data base (1950–2016, https:// www.metoffice.gov.uk/hadobs/en4/) и массив ARMOR (1993–2016). Анализ пространственно-временных распределений профилей показал, что в районе исследования EN4 обладает большей репрезентативностью, а данные проходят более жёсткий контроль качества и более совершенную проверку на дублирование информации, чем часто используемый массив World Ocean Database 2013 (см. также (Good et al., 2013)). В массиве ARMOR (http://marine. copernicus.eu/) на основе совместного анализа изменчивости аномалий спутниковых данных (альтиметрии и температуры поверхности океана) и вертикальных профилей *in situ* получают уравнения линейной множественной регрессии, с помощью которых формируются так называемые «синтетические» вертикальные профили температуры и солёности на стандартных океанографических горизонтах в точках сетки разрешением $1/4 \times 1/4^{\circ}$ и с месячным шагом по времени. Конечные распределения получают путём оптимальной интерполяции *in situ* и «синтетических» профилей с разными весовыми коэффициентами (Guinehut et al., 2012).



Рис. 1. Батиметрия (тонкие серые контуры) и схема основных течений (чёрные стрелки) Северной Атлантики и Северо-Европейского бассейна. Районы морей Лабрадор, Ирмингера и Гренландского, где ожидается максимальное развитие глубокой конвекции, ограничены чёрными линиями: КБ — котловина Борея, ГК — Гренландская котловина, ИК — Исландская котловина, НК — Норвежская котловина, ЛК — Лофотенская котловина



Рис. 2. Количество вертикальных профилей наблюдений температуры и солёности воды, достигающих горизонта 1000 м, за период развития конвекции (январь–апрель) в морях Ирмингера (синяя кривая), Лабрадор (красная кривая) и Гренландском (чёрная кривая) (*a*). Профили температуры – солёности (*б*, *г*) и профили плотности воды (кг·м⁻³) (*в*, *д*) в центральных частях Гренландского моря (*б*, *в*) и моря Лабрадор (*г*, *д*) в период развития конвекции. Данные EN4 — пунктир, данные ARMOR — сплошные линии. На правых графиках представлены оценки глубины ВКС по работам: (de Boyer Montegut et al., 2004) — звёздочка (*M*); (Kara et al., 2003) — круг (*K*); Духовского Д. С. (2017, личное сообщение) — квадрат (*D*)

Привлечение спутниковой информации позволяет получить более детальное представление о пространственно-временной изменчивости термохалинных характеристик, чем результаты интерполяции только *in situ* профилей (как в массивах EN4-gridded или World Ocean Atlas). Мелкомасштабный шум профилей предварительно фильтровался скользящим сглаживанием. При наличии промежутков гравитационной неустойчивости (что нередко наблюдается в морях Лабрадор и Гренландском) профили предварительно искусственно перемешивались до достижения на этих промежутках нейтральной стратификации. Если в процессе выравнивания участков гравитационной неустойчивости общая мощность слоя искусственного перемешивания превышала половину глубины моря в данной точке, то такой профиль отфильтровывался как ненадёжный. На *рис. 26, г* (см. с. 60) представлены профили из EN4 и ARMOR.

Глубина верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) выделялась тремя различными способами по работам: (de Boyer Montegut et al., 2004), (Kara et al., 2003) и Духовского Д.С. (2017, частное сообщение). В методе (de Boyer Montegut et al., 2004) за нижнюю границу ВКС принимают первый горизонт, где разность значений потенциальной плотности фиксированного базового (10 м) и нижележащих горизонтов ($\Delta \sigma$) больше заранее выбранного критического значения ($\Delta \sigma_c$): $\Delta \sigma > \Delta \sigma_c$. Анализ вертикальных профилей показал, что в исследуемых слабостратифицированных районах оптимально значение $\Delta \sigma_c = 0,01 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$. В методе (Kara et al., 2003) фиксируется критическое изменение температуры ΔT , а $\Delta \sigma_c$ определяется для каждого профиля через уравнение состояния при измеренной на базовом горизонте температуре T_6 и температуре $T_6 - \Delta T$. Из-за нелинейности уравнения состояния при низких T_6 значение Δσ уменьшается, что позволяет точнее выявлять перемешанный слой на более гладких зимних профилях. Анализ показал, что оптимальным для исследуемых районов является $\Delta T = 0.1$ °C. В методе Духовского Д.С. (2017, личное сообщение) за глубину ВКС принимается глубина, где значения вертикального градиента плотности превышают два его локальных среднеквадратических отклонения на промежутке ±50 м. Критерий Δσ_с рассчитывается индивидуально для каждого профиля и фиксирует область быстрого изменения вертикального градиента плотности с глубиной при характерной для данного профиля фоновой изменчивости градиента плотности. Похожий метод был ранее использован в работе (Pickart et al., 2002). Результаты, полученные по трём методам, как правило, мало отличались между собой. Однако метод Духовского позволял более точно определить мощность заглубленного ВКС, часто характеризующегося небольшими скачками плотности на нижней границе (*puc. 2e, d*), и был выбран в качестве основного.

Результаты

В Гренландском море наибольшее за годовой период глубин ВКС (с октября предыдущего года по сентябрь текущего года) количество максимумов конвекции наблюдается с марта по май (65–70 % случаев), при этом 50 % случаев приходятся на апрель (*puc. 3a*). Единственный максимум глубин ВКС в июне отмечался в 2008 г., когда максимальная глубина перемешанного слоя порядка 1500 м и более наблюдалась начиная с января этого года. При этом 2008 г. характеризовался низкими значениями Северо-Атлантической осцилляции, при которой наблюдается высокая теплоотдача в регионе (Gelderloos et al., 2013; Latarius, Quadfase, 2016). К апрелю наблюдается также рост процента профилей (от общего количества за месяц), для которых глубина ВКС превышает 500 и 1000 м (*puc. 36, в*). Больший процент больших глубин ВКС в ЕN4 связан с неравномерностью покрытия акватории: подавляющее количество измерений проводились в районах вероятного развития глубокой конвекции (Федоров и др., 2018). Это связано как с направленностью натурных экспериментов в регионе, так и с захватом поплавков Арго циклоническим круговоротом Гренландской котловины.

Область зарегистрированных глубин развития зимней конвекции свыше 1000 м охватывает большую часть глубоководной области Гренландской котловины, юго-восток котловины Борея (по данным EN4) и практически все глубоководные районы Гренландского и Исландского морей (по данным ARMOR) (*рис. Зг*, ∂). Более информативны пространственные распределения вероятности развития ВКС до глубин 500 и 1000 м — отношение количества профилей с глубиной конвекции, превышающей заданный порог, к общему количеству профилей наблюдений в выбранных ячейках сетки (*рис. Зе–з*).



Рис. 3. Статистика пространственно-временного распределения параметров глубокой конвекции в Гренландском море по данным массивов EN4 и ARMOR (1993–2016): *а* — количество лет, когда максимальное развитие конвекции наблюдалось в текущем месяце (красный — EN4, чёрный — ARMOR); δ - σ — процент от общего числа профилей в текущем месяце, когда максимальная глубина развития конвекции превышала 500 м (δ) и 1000 м (θ); c- ∂ — пространственное распределение максимальной зафиксированной глубины конвекции за весь период наблюдений по данным EN4 (e) и ARMOR (∂); изолинии максимальной глубины конвекции 500 м (синий), 1000 м (чёрный) и 1700 м (розовый); e — процент от общего числа профилей (январь — апрель), когда глубина перемешанного слоя превышала 500 м по данным ARMOR, \mathcal{m} -3 — превышала 1000 м по данным EN4 (\mathcal{m}) и данным ARMOR (3). Чёрная изолиния отмечает 7%-ю вероятность того, что глубина перемешанного слоя профиля превыси 1000 м



Рис. 4. Статистика пространственно-временного распределения параметров глубокой конвекции в морях Лабрадор и Ирмингера по данным массивов EN4 и ARMOR (1993–2016): *а* — количество лет, когда максимальное развитие конвекции наблюдалось в текущем месяце (красный — EN4, чёрный — ARMOR); *б*-*в* — процент от общего числа профилей в текущем месяце, когда максимальная глубина развития конвекции превышала 500 м (*б*) и 1000 м (*в*); *г*-*д* — пространственное распределение максимальной зафиксированной глубины конвекции за весь период наблюдений по данным EN4 (*г*) и ARMOR (*д*); изолинии максимальной глубины конвекции 500 м (синий), 1000 м (чёрный) и 1700 м (розовый); *е* — процент от общего числа профилей (январь – апрель), когда глубина перемешанного слоя превышала 500 м по данным ARMOR, *ж*-*з* — превышала 1000 м по данным EN4 (*ж*) и ARMOR (*з*). Чёрная изолиния отмечает 7%-ю вероятность того, что глубина перемешанного слоя профиля превысит 1000 м

Глубокая конвекция развивается наиболее часто в ранее выделяемых в литературе районах на севере Гренландской котловины и на юге котловины Борея, по обе стороны Гренландского хребта (Marshall, Schott, 1999; Moore et al., 2015). Массив ARMOR позволил также выделить ранее не отмеченную область частого развития глубокой конвекции на юговостоке Гренландского моря. Она не проявляется в EN4, видимо, из-за слабого покрытия этой части акватории данными наблюдений (Федоров и др., 2018).

В морях Лабрадор и Ирмингера гистограммы показывают, что наиболее часто конвекция достигает максимальных глубин в марте при частом проникновении до больших глубин с января по апрель (*puc. 4a–e*, см. с. 60). Гистограммы для обоих морей практически идентичны и потому приводятся для двух морей вместе. Как и в Гренландском море, в морях Лабрадор и Ирмингера массив ARMOR показывает более обширную, чем массив EN4, область развития глубокой конвекции, которая охватывает практически всю акваторию обоих морей (*puc. 4e–d*). Границы области наиболее частого проникновения конвекции глубже 1000 м в массивах EN4 и ARMOR имеют похожие очертания и представляют собой единую связанную область (*puc. 4e–3*, см. также (Федоров и др., 2018)). По сравнению с EN4 массив ARMOR выделяет три практически равновероятных максимума: в южной части моря Лабрадор, в центральной части моря Ирмингера и на границе морей Лабрадор и Ирмингера.

Выводы

Результаты показали, что конвекция более 1000 м в морях Лабрадор и Ирмингера наиболее часто развивается в марте, а в Гренландском море — в апреле. Были уточнены контуры областей развития глубокой конвекции, показана связанность областей возможного развития глубокой конвекции.

Контуры областей глубокой конвекции в Гренландском море несколько расширяют границы ранее выделяемых областей развития конвекции (Androsov et al., 2005; Marshall, Schott, 1999). Помимо традиционно выделяемой в северной части Гренландской котловины области наиболее частого развития конвекции, была также выделена область в юго-восточной части котловины. Возможно, конвекция на юго-востоке моря усиливается благодаря развитию потенциальной неустойчивости столба воды (Chu, 1991) в связи с зимними затоками приповерхностных тёплых и солёных вод западной ветви Норвежского течения при их дальнейшем интенсивном выхолаживании. Несколько реже конвекция развивается в котловине Борея (Johannessen et al., 1991, 2005).

В морях Лабрадор и Ирмингера были выделены три области наиболее частого развития глубокой конвекции. Две из них, в южной части моря Лабрадор и в центральной части моря Ирмингера, традиционно выделялись ранее (de Jong, de Steur, 2016; Vage et al., 2009). На возможность развития глубокой конвекции на стыке двух морей — к югу от мыса Фарвель на южной оконечности о-ва Гренландия — впервые было указано на основе анализа пространственной изменчивости аномалий стратификации по данным профилирующих буёв Арго за 2013–2014 гг. (Фалина и др., 2017). По данным глубин ВКС ранее эта область не выделялась. Результаты нашего анализа также показывают, что, хотя в море Лабрадор конвекция может проникать глубже, чем в двух других областях (Гладышев и др., 2016; Yashayaev, 2007), вероятности того, что конвекция пробьёт слой более 1000 м, во всех трёх районах близки между собой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-17-01151).

Литература

1. *Гладышев С. В., Гладышев В. С., Фалина А. С., Сарафанов А.А.* Зимняя конвекция в море Ирмингера в 2004–2014 гг. // Океанология. 2016. Т. 56. № 3. С. 353–363.

- 2. *Морецкий В. Н., Попов А. В.* Водные массы Норвежского и Гренландского морей и основные типы вертикальной структуры вод // Структура и изменчивость крупномасштабных океанологических процессов и полей в Норвежской энергоактивной зоне. Л.: Гидрометиздат, 1989. С. 18–27.
- 3. *Нагурный А. П., Попов А. В.* Интенсивное поднятие глубинных и донных вод и их формирование на поверхности в районе Гренландской котловины // Метеорология и гидрология. 1985. № 7. С. 70–75.
- 4. *Сарафанов А.А., Фалина А.С., Соков А.В.* Многолетние изменения характеристик и циркуляции глубинных вод на севере Атлантического океана: роль региональных и внешних факторов // Доклады Академии наук. 2013. Т. 450. № 4. С. 470–473. DOI: 10.7868/S0869565213160196.
- 5. *Фалина А. С., Сарафанов А.А., Добролюбов С.А., Запотылько В. С., Гладышев С. В.* Конвекция и стратификация вод на севере Атлантического океана по данным измерений зимой 2013/14 гг. // Вестник Московского ун-та. Сер. 5: «География». 2017. № 4. С. 45–54.
- 6. *Федоров А. М., Башмачников И.Л, Белоненко Т. В.* Локализация областей глубокой конвекции в морях Северо-Европейского бассейна, Лабрадор и Ирмингера // Вестник Санкт-Петербургского ун-та. Науки о Земле. 2018. Т. 63. № 3. С. 345–362.
- Androsov A., Rubino A., Romeiser R., Sein D. V. 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. 2005. V. 14. No. 6. P. 693–702. DOI: https://doi.org/10.1127/0941-2948/2005/0078.
- 8. *Buckley M. W., Marshall J.* Observations, inferences, and mechanisms of Atlantic Meridional Overturning Circulation variability: A review // Reviews of Geophysics. 2016. V. 54. P. 5–63. DOI: 10.1002/2015RG000493.
- 9. *Budeus G., Schneider W., Krause G.* Winter convective events and bottom water warming in the Greenland Sea // J. Geophysical Research. C: Oceans. 1998. V. 103. No. C9. P. 18513–18527.
- Chu P. C. Geophysics of deep convection and deep water formation in oceans // Deep convection and deep water formation in the oceans / eds. Chu S., Gascard J. C. Elsevier Oceanography Series. 1991. V. 57. P. 3–16.
- 11. *Clarke R.A., Swift J. H., Reid J. L., Koltermann K. P.* The formation of Greenland Sea Deep Water: double diffusion or deep convection? // Deep Sea Research. Part A. 1990. V. 37. No. 9. P. 1385–1424.
- de Boyer Montegut C., Madec G., Fischer A.S., Lazar A., Iudicone D. Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology // J. Geophysical Research. 2004. V. 109. P. C12003. DOI: 10.1029/2004JC002378.
- de Jong M. F., de Steur L. Strong winter cooling of the Irminger Sea in winter 2014–15, exceptional deep convection, and the emergence of anomalously low SST // Geophysical Research Letters. 2016. V. 43. P. 1717–1734. DOI: 10.1002/2016GL069596.
- 14. *de Jong M. F., van Aken H. M., Våge K., Pickart R. S.* Convective mixing in the central Irminger Sea: 2002–2010 // Deep Sea Research. Pt. I. 2012. V. 63. No. 1. P. 36–51.
- 15. Deep convection and deep water formation in the oceans / eds. Chu S., Gascard J. C. Elsevier Oceanography Series. 1991. V. 57. 382 p.
- Drange H., Dokken T., Furevik T., Gerdes R., Berger W., Nesje A., Orvik A., Skagseth Ø., Skjelvan I., Østerhus S. The Nordic Seas: An Overview // The Nordic Seas: An Integrated Perspective. AGU Monograph 158. 2005. P. 1–10.
- Fröb F., Olsen A., Våge K., Moore G., Yashayaev I., Jeansson E., Rajasakaren B. Irminger Sea deep convection injects oxygen and anthropogenic carbon to the ocean interior // Nature Communications. 2016. V. 7. P. 13244. DOI: 10.1038/ncomms13244.
- Gelderloos R., Katsman C. A., Våge K. Detecting Labrador sea water formation from space // J. Geophysical Research. C: Oceans. 2013. V. 118. No. 4. P. 2074–2086.
- Good S.A., Martin M.J., Rayner N.A. EN4: Quality controlled ocean temperature and salinity profiles and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates // J. Geophysical Research. C: Oceans. 2013. V. 118. P. 6704–6716. DOI: 10.1002/2013JC009067.
- 20. Greenland Sea Project a venture toward improved understanding of the ocean's role in climate // EOS Trans. AGU. 1990. V. 71(24). P. 750–756. DOI: 10.1029/90EO00208.
- 21. *Guinehut S., Dhomps A. L., Larnicol G., Le Traon P. Y.* High resolution 3-D temperature and salinity fields derived from in situ and satellite observations // Ocean Science. 2012. V. 8. No. 5. P. 845–857.
- 22. *Holte J., Talley L. D., Gilson J., Roemmich D.* An Argo mixed layer climatology and database // Geophysical Research Letters. 2017. V. 44. P. 5618–5626. DOI: 10.1002/2017GL073426.
- 23. *Jeansson E., Olsen A., Jutterström S.* Arctic Intermediate Water in the Nordic Seas, 1991–2009 // Deep Sea Research. Part I. 2017. V. 128. P. 82–97.

- 24. Johannessen O. M., Sandven S., Johannessen J. A. Eddy-Related Winter Convection in the Boreas Basin // Deep convection and deep water formation in the oceans / eds. Chu S., Gascard J. C. Elsevier Oceanography Series. 1991. V. 57. P. 86–104.
- 25. Johannessen O. M., Lygre K., Eldevik T. Convective chimneys and plumes in the Northern Greenland Sea // The Nordic Seas: An Integrated Perspective. 2005. P. 251–272.
- 26. *Kara A. B., Rochford P.A., Hurlburt H. E.* Mixed layer depth variability over the global ocean // J. Geophysical Research. C: Oceans. 2003. V. 108. P. 3079. DOI: 10.1029/2000JC000736, C3.
- 27. *Kawasaki T., Hasumi H.* Effect of freshwater from the West Greenland Current on the winter deep convection in the Labrador Sea // Ocean Modelling. 2014. V. 75. P. 51–64.
- 28. Killworth P.D. Deep convection in the world ocean // Reviews of Geophysics. 1983. V. 21. No. 1. P. 1–26.
- 29. *Latarius K.*, *Quadfasel D.* Water mass transformation in the deep basins of the Nordic Seas: Analyses of heat and freshwater budgets // Deep Sea Research. Part I. 2016. V. 114. P. 23–42.
- Lazier J., Hendry R., Clarke A., Yashayaev I., Rhines P. Convection and restratification in the Labrador Sea, 1990–2000 // Deep-Sea Research. Part I. 2002. V. 49. P. 1819–1835.
- 31. *Lozier M. S., Gary S. F., Bower A. S.* Simulated pathways of the overflow waters in the North Atlantic: Subpolar to subtropical export // Deep Sea Research. Part II. 2013. V. 85. P. 147–153.
- 32. *Malmberg S.A.* Hydrographic investigations in the Iceland and Greenland seas in late winter 1971: "Deep Water Project" // Jokull. 1983. V. 33. P. 133–140.
- Marshall J., Schott F. Open-ocean convection: Observations, theory, and models // Reviews of Geophysics. 1999. V. 37. No. 1. P. 1–64.
- 34. *Moore G. W. K.*, *Våge K.*, *Pickart R. S.*, *Renfrew I.A.* Decreasing intensity of open-ocean convection in the Greenland and Iceland seas // Nature Climate Change. 2015. V. 5. No. 9. P. 877.
- 35. *Pickart R.S., Torres D.J., Clarke R.A.* Hydrography of the Labrador Sea during active convection // J. Physical Oceanography. 2002. V. 32. No. 2. P. 42–457.
- Rhein M., Kieke D., Hüttl-Kabus S., Roessler A., Mertens C., Meissner R., Yashayaev I. Deep water formation, the subpolar gyre, and the meridional overturning circulation in the subpolar North Atlantic // Deep Sea Research. Part II. 2011. V. 58. No. 17. P. 1819–1832.
- 37. *Rhein M., Kieke D., Steinfeldt R.* Advection of North Atlantic deep water from the Labrador Sea to the southern hemisphere // J. Geophysical Research. C: Oceans. 2015. V. 120. No. 4. P. 2471–2487.
- Ronski S., Budeus G. Time series of winter convection in the Greenland Sea // J. Geophysical Research. C: Oceans. 2005. V. 110. P. C04015. DOI: 10.1029/2004JC002318.
- 39. *Rudels B., Fahrbach E., Meincke J., Budéus G., Eriksson P.* The East Greenland Current and its contribution to the Denmark Strait overflow // ICES J. Marine Science. 2002. V. 59. No. 6. P. 1133–1154.
- 40. Vage K., Pickart R. S., Thierry V., Reverdin G., Lee C. M., Petrie B., Agnew T.A., Wong A., Ribergaard M. H. Surprising return of deep convection to the subpolar North Atlantic Ocean in winter 2007–2008 // Nature Geoscience. 2009. V. 2. P. 67–72. DOI: 10.1038/ngeo382.
- Yashayaev I. Hydrographic changes in the Labrador Sea, 1960–2005 // Progress in Oceanography. 2007. V. 73. P. 242–276.
- 42. *Yashayaev I., Clarke A.* Evolution of North Atlantic water masses inferred from Labrador Sea salinity series // Oceanography. 2008. V. 21. No. 1. P. 30–45.
- 43. *Yashayaev I., Loder J. W.* Enhanced production of Labrador Sea Water in 2008 // Geophysical Research Letters. 2009. V. 3. P. L0160. DOI: 10.1029/2008GL036162.

Thermohaline convection in the subpolar seas of the North Atlantic from satellite and in situ observations. Part 1: localization of the deep convection sites

I. L. Bashmachnikov^{1,2}, A. M. Fedorov^{1,2}, A. V. Vesman^{1,2,3}, T. V. Belonenko¹, A. V. Koldunov¹, D. S. Dukhovskoy⁴

 ¹ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia
² Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre Saint Petersburg 199034, Russia
³ State Research Center "Arctic and Antarctic Research Institute"

Saint Petersburg 199397, Russia

⁴ Center for Ocean-Atmospheric Prediction Studies, Florida State University Tallahassee FL 32306-2741, USA

E-mails: igorb1969@mail.ru, aandmofficially@gmail.com, anna.vesman@gmail.com, t.v.belonenko@spbu.ru, koldunovaleksey@gmail.com, ddukhovskoy@fsu.edu

Deep convection in the Greenland, the Labrador and the Irminger seas, as part of the global ocean conveyor belt (the Atlantic Meridional Overturning Circulation), is an important component of the climate system of the Earth. In situ investigations of interannual variability of the convection depth are challenging due to a small size of convective cells and interannual variations of their locations within the basins. In this work, using ARMOR data-set, which combines in situ and satellite data, the areas of the most frequent occurrence of deep convection in the North Atlantic are refined. It is shown that in the Labrador and the Irminger seas, deep convection (exceeding 1000 m) can develop in any point of a single region, covering almost all the water area of the seas. Within this region there are three sub-regions of the most frequent development of the deep convection. In addition to two traditionally allocated areas in each of the seas, the deep convection often occurs also at the junction of the two seas, south of Cape Farwell. Convection typically reaches its maximum depth in March. In the Greenland Sea deep convection optically reaches its maximum depth in April.

Keywords: deep convection, data-set with assimilation of satellite data, the Greenland Sea, the Labrador Sea, the Irminger Sea

Accepted: 05.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-184-194

References

- 1. Gladyshev S. V., Gladyshev V. S., Falina A. S., Sarafanov A. A., Zimnyaya konvektsiya v more Irmingera v 2004–2014 gg. (Winter convection in the sea of Irminger in 2004–2014), *Oceanology*, 2016, Vol. 56, No. 3, pp. 353–363.
- Moretskiy V. N., Popov A. V., Vodnye massy Norvezhskogo i Grenlandskogo morei i osnovnye tipy vertikal'noi struktury vod (Water masses of the Norwegian and Greenland seas and main types of vertical water structure), In: *Struktura i izmenchivost krupnomasshtabnyikh okeanologicheskikh protsessov i poley v Norvezhskoy energoaktivnoy zone* (Structure and variability of large-scale oceanographic processes and fields in the Norwegian energy-active zone), Leningrad: Gidrometizdat, 1989, pp. 18–27.
- 3. Nagurnyiy A. P., Popov A. V., Intensivnoe podnyatie glubinnykh i donnykh vod i ikh formirovanie na poverkhnosti v raione Grenlandskoi kotloviny (Intensive uplift of deep and bottom waters and their formation on the surface near the Greenland basin), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1985, No. 7, pp. 70–75.
- 4. Sarafanov A.A., Falina A.S., Sokov A.V., Mnogoletnie izmeneniya kharakteristik i tsirkulyatsii glubinnykh vod na severe Atlanticheskogo okeana: rol' regional'nykh i vneshnikh faktorov (Long-Term changes in the characteristics and circulation of deep water masses in the North Atlantic ocean: the role of regional and external factors), *Doklady Akademii nauk*, 2013, Vol. 450, No. 4, pp. 470–473, DOI: 10.7868/ S0869565213160196.

- 5. Falina A.S., Sarafanov A.A., Dobrolyubov S.A., Zapotyilko V.S., Gladyishev S.V., Konvektsiya i stratifikatsiya vod na severe Atlanticheskogo okeana po dannym izmerenii zimoi 2013/14 gg. (Convection and water stratification in the North Atlantic Ocean according to measurements in winter 2013/14), *Vestnik Moskovskogo universiteta, Ser. 5: "Geografiya"*, 2017, No. 4, pp. 45–54.
- 6. Fedorov A. M., Bashmachnikov I. L., Belonenko T. V., Lokalizatsiya oblastei glubokoi konvektsii v moryakh Severo-Evropeiskogo basseina, Labrador i Irmingera (Localization of areas of deep convection in the Nordic seas, the Labrador Sea and the Irminger Sea), *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2018, Vol. 63, No. 3, pp. 345–362.
- Androsov A., Rubino A., Romeiser R., Sein D. V., 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*, 2005, Vol. 14, No. 6, pp. 693–702, DOI: https://doi. org/10.1127/0941-2948/2005/0078.
- Buckley M. W., Marshall J., Observations, inferences, and mechanisms of Atlantic Meridional Overturning Circulation variability: A review, *Reviews of Geophysics*, 2016, Vol. 54, pp. 5–63, DOI: 10.1002/2015RG000493.
- 9. Budeus G., Schneider W., Krause G., Winter convective events and bottom water warming in the Greenland Sea, *J. Geophysical Research. C: Oceans*, 1998, Vol. 103, No. C9, pp. 18513–18527.
- Chu P. C., Geophysics of deep convection and deep water formation in oceans, In: *Deep convection and deep water formation in the oceans*, Chu S., Gascard J. C. (eds.), Elsevier Oceanography Series, 1991, Vol. 57, pp. 3–16.
- 11. Clarke R.A., Swift J.H., Reid J.L., Koltermann K.P., The formation of Greenland Sea Deep Water: double diffusion or deep convection? *Deep Sea Research. Part A*, 1990, Vol. 37, No. 9, pp. 1385–1424.
- 12. de Boyer Montegut C., Madec G., Fischer A. S., Lazar A., Iudicone D., Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology, *J. Geophysical Research. C: Oceans*, 2004, Vol. 109, p. C12003, DOI: 10.1029/2004JC002378.
- de Jong M. F., de Steur L., Strong winter cooling of the Irminger Sea in winter 2014–15, exceptional deep convection, and the emergence of anomalously low SST, *Geophysical Research Letters*, 2016, Vol. 43, pp. 1717–1734, DOI: 10.1002/2016GL069596.
- 14. de Jong M. F., van Aken H. M., Våge K., Pickart R. S., Convective mixing in the central Irminger Sea: 2002–2010, *Deep Sea Research. Part I*, 2012, Vol. 63, No. 1, pp. 36–51.
- 15. *Deep convection and deep water formation in the oceans*, Chu S., Gascard J. C. (eds.), Elsevier Oceanography Series, 1991, Vol. 57, 382 p.
- Drange H., Dokken T., Furevik T., Gerdes R., Berger W., Nesje A., Orvik A., Skagseth Ø., Skjelvan I., Østerhus S., The Nordic Seas: An Overview, In: *The Nordic Seas: An Integrated Perspective*, AGU Monograph 158, 2005, pp. 1–10.
- 17. Fröb F., Olsen A., Våge K., Moore G., Yashayaev I., Jeansson E., Rajasakaren B., Irminger Sea deep convection injects oxygen and anthropogenic carbon to the ocean interior, *Nature Communications*, 2016, Vol. 7, p. 13244, DOI: 10.1038/ncomms13244.
- 18. Gelderloos R., Katsman C. A., Våge K., Detecting Labrador sea water formation from space, *J. Geophysical Research. C: Oceans*, 2013, Vol. 118, No. 4, pp. 2074–2086.
- 19. Good S.A., Martin M.J., Rayner N.A., EN4: Quality controlled ocean temperature and salinity profiles and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates, *J. Geophysical Research*. *C: Oceans*, 2013, Vol. 118, pp. 6704–6716, DOI: 10.1002/2013JC009067.
- 20. Greenland Sea Project a venture toward improved understanding of the ocean's role in climate, *EOS Trans. AGU*, 1990, Vol. 71(24), pp. 750–756, DOI: 10.1029/90EO00208.
- 21. Guinehut S., Dhomps A. L., Larnicol G., Le Traon P.Y., High resolution 3-D temperature and salinity fields derived from in situ and satellite observations, *Ocean Science*, 2012, Vol. 8, No. 5, pp. 845–857.
- 22. Holte J., Talley L. D., Gilson J., Roemmich D., An Argo mixed layer climatology and database, *Geophysical Research Letters*, 2017, Vol. 44, pp. 5618–5626, DOI: 10.1002/2017GL073426.
- 23. Jeansson E., Olsen A., Jutterström S., Arctic Intermediate Water in the Nordic Seas, 1991–2009, *Deep Sea Research. Part I*, 2017, Vol. 128, pp. 82–97.
- Johannessen O. M., Sandven S., Johannessen J. A., Eddy-Related Winter Convection in the Boreas Basin, Deep convection and deep water formation in the oceans, Chu S., Gascard J. C. (eds.), Elsevier Oceanography Series, 1991, Vol. 57, pp. 86–104.
- 25. Johannessen O. M., Lygre K., Eldevik T., Convective chimneys and plumes in the Northern Greenland Sea, *The Nordic Seas: An Integrated Perspective*, 2005, pp. 251–272.
- 26. Kara A. B., Rochford P. A., Hurlburt H. E., Mixed layer depth variability over the global ocean, *J. Geophysical Research. C: Oceans*, 2003, Vol. 108, pp. 3079, DOI: 10.1029/2000JC000736, C3.

- 27. Kawasaki T., Hasumi H., Effect of freshwater from the West Greenland Current on the winter deep convection in the Labrador Sea, *Ocean Modelling*, 2014, Vol. 75, pp. 51–64.
- 28. Killworth P. D., Deep convection in the world ocean, *Reviews of Geophysics*, 1983, Vol. 21, No. 1, pp. 1–26.
- 29. Latarius K., Quadfasel D., Water mass transformation in the deep basins of the Nordic Seas: Analyses of heat and freshwater budgets, *Deep Sea Research. Part I*, 2016, Vol. 114, pp. 23–42.
- 30. Lazier J., Hendry R., Clarke A., Yashayaev I., Rhines P., Convection and restratification in the Labrador Sea, 1990–2000, *Deep-Sea Research. Part I*, 2002, Vol. 49, pp. 1819–1835.
- 31. Lozier M. S., Gary S. F., Bower A. S., Simulated pathways of the overflow waters in the North Atlantic: Subpolar to subtropical export, *Deep Sea Research. Part II*, 2013, Vol. 85, pp. 147–153.
- 32. Malmberg S.A., Hydrographic investigations in the Iceland and Greenland seas in late winter 1971: "Deep Water Project", *Jokull*, 1983, Vol. 33, pp. 133–140.
- 33. Marshall J., Schott F., Open-ocean convection: Observations, theory, and model, *Reviews of Geophysics*, 1999, Vol. 37, No. 1, pp. 1–64.
- 34. Moore G. W. K., Våge K., Pickart R. S., Renfrew I. A., Decreasing intensity of open-ocean convection in the Greenland and Iceland seas, *Nature Climate Change*, 2015, Vol. 5, No. 9, p. 877.
- 35. Pickart R.S., Torres D.J., Clarke R.A., Hydrography of the Labrador Sea during active convection, *J. Physical Oceanography*, 2002, Vol. 32, No. 2, pp. 428–457.
- 36. Rhein M., Kieke D., Hüttl-Kabus S., Roessler A., Mertens C., Meissner R., Yashayaev I., Deep water formation, the subpolar gyre, and the meridional overturning circulation in the subpolar North Atlantic, *Deep Sea Research. Part II*, 2011, Vol. 58, No. 17, pp. 1819–1832.
- 37. Rhein M., Kieke D., Steinfeldt R., Advection of North Atlantic deep water from the Labrador Sea to the southern hemisphere, *J. Geophysical Research. C: Oceans*, 2015, Vol. 120, No. 4, pp. 2471–2487.
- 38. Ronski S., Budeus G., Time series of winter convection in the Greenland Sea, *J. Geophysical Resarch. C: Oceans*, 2005, Vol. 110, p. C04015, DOI: 10.1029/2004JC002318.
- 39. Rudels B., Fahrbach E., Meincke J., Budéus G., Eriksson P., The East Greenland Current and its contribution to the Denmark Strait overflow, *ICES J. Marine Science*, 2002, Vol. 59, No. 6, pp. 1133–1154.
- 40. Vage K., Pickart R.S., Thierry V., Reverdin G., Lee C.M., Petrie B., Agnew T.A., Wong A., Ribergaard M. H., Surprising return of deep convection to the subpolar North Atlantic Ocean in winter 2007–2008, *Nature Geoscience*, 2009, Vol. 2, pp. 67–72, DOI: 10.1038/ngeo382.
- 41. Yashayaev I., Hydrographic changes in the Labrador Sea, 1960–2005, *Progress in Oceanography*, 2007, Vol. 73, pp. 242–276.
- 42. Yashayaev I., Clarke A., Evolution of North Atlantic water masses inferred from Labrador Sea salinity series, *Oceanography*, 2008, Vol. 21, No. 1, pp. 30–45.
- 43. Yashayaev I., Loder J.W., Enhanced production of Labrador Sea Water in 2008, *Geophysical Research Letters*, 2009, Vol. 3, p. L0160, DOI: 10.1029/2008GL036162.