

## Термохалинная конвекция в субполярных морях Северной Атлантики и Северо-Европейского бассейна СЛО по спутниковым и натурным данным. Часть 2: индексы интенсивности конвекции

И. Л. Башмачников<sup>1,2</sup>, А. М. Федоров<sup>1,2</sup>, А. В. Весман<sup>1,2,3</sup>,  
Т. В. Белоненко<sup>1</sup>, Д. С. Духовской<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет  
Санкт-Петербург, 199034, Россия

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

<sup>3</sup> Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,  
государственный научный центр, Санкт-Петербург, 199397, Россия

<sup>4</sup> 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, ddukhovskoy@fsu.edu

Изменчивость местоположения областей максимального развития глубокой конвекции при малом их размере создаёт трудности при выявлении межгодовой изменчивости интенсивности конвекции по разреженным натурным данным. В настоящей работе межгодовая изменчивость максимальной глубины конвекции получена на основе наиболее полного массива данных ARMOR, в котором совместно используются *in situ* и спутниковые данные. Глубины конвекции, полученные по ARMOR, использованы для тестирования эффективности двух индексов: аномалии уровня моря по данным спутниковой альтиметрии и интегральной плотности воды в областях наиболее частого развития глубокой конвекции. Первый индекс, улавливая некоторые детали межгодовой изменчивости, показал невысокую корреляцию с межгодовой изменчивостью интенсивности глубокой конвекции. Второй индекс, напротив, показал высокую корреляцию с межгодовой изменчивостью глубокой конвекции во всех трёх морях. Выявлена асинхронность изменчивости глубин конвекции в морях Лабрадор, Ирмингера и Гренландском. В морях Лабрадор и Ирмингера в интенсивности конвекции выделяются квазисемилетние цикличности.

**Ключевые слова:** глубокая конвекция, массивы с ассимиляцией спутниковых данных, альтиметрия, плотность воды, Гренландское море, море Лабрадор, море Ирмингера

Одобрена к печати: 16.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-191-201

### Введение

Интенсивность глубокой конвекции, как правило, оценивается как максимальная глубина перемешанного слоя (Нагурный, Попов, 1985; Fröb et al., 2016; Greenland Sea Project..., 1990; Holte et al., 2017; Malmberg, 1983; Pickart et al., 2003). Однако в связи небольшими размерами конвективных областей (от 20 до 100 км в диаметре) и изменением их местоположения от года к году (Ковалевский, 2002; Greenland Sea Project..., 1990; Yashayaev, 2007) в отдельные годы области максимальной конвекции могут просеиваться сквозь достаточно редкую сеть наблюдений. Кроме того, размытость вертикальных градиентов характеристик на больших глубинах делает проблематичным точное определение глубины перемешанного слоя. Поэтому результаты определения глубины конвекции по наблюдениям максимальной глубины перемешанного слоя у разных авторов порой существенно различаются (Башмачников и др., 2018).

Внутри областей глубокой конвекции («конвективных труб») образуются ещё более мелкие ячейки наиболее интенсивного развития конвекции диметром 100 м – 1 км (Johannessen et al., 2005; Marshall, Schott, 1999). Неустойчивость формирующихся при развитии глубокой конвекции хетонных структур с циклонической завихренностью у поверхности и антициклонической — на глубине генерирует на границе областей «конвективных труб» вихри размером в 2–10 раз меньше радиуса деформации Россби (1–5 км) (Ковалевский, 2002; Johannessen et al., 2005; Marshall, Schott, 1999). Малые размеры формируемых структур не позволяют достаточно точно воспроизводить динамику областей глубокой конвекции, а соответственно, и объёмы формируемых вод, даже в современных вихреразрешающих моделях (Dukhovskoy et al., 2016). Поэтому данные наблюдений при всех их недостатках на настоящий момент остаются главным источником информации о межгодовой изменчивости интенсивности конвекции.

Указанные сложности привели к поискам косвенных оценок изменчивости интенсивности развития глубокой конвекции — индексов конвекции. В качестве индексов конвекции предлагались средние по центральной части акватории значения потенциальной температуры воды на глубинах более 2000 м (Алексеев и др., 2001; Meincke et al., 1992), концентрации трития и CFC11 (Bönisch et al., 1997; Rhein, 1996; Schlosser et al., 1991), насыщенность воды кислородом и значения потенциальной завихренности (Гладышев и др., 2016; de Jong et al., 2012) и др. Как следует из анализа результатов этих исследований, достаточно большая консервативность параметров, осреднённых по значительному объёму, не позволяет получить представление об изменчивости характеристик конвекции на временных масштабах менее десятка лет (Алексеев и др., 2001), а накладывающаяся долгопериодная изменчивость параметров (60 и более лет) вносит существенные погрешности в климатические тренды оцениваемой изменчивости глубокой конвекции по сравнительно коротким рядам наблюдений.

Недавно была показана принципиальная возможность определения межгодовой изменчивости интенсивности глубокой конвекции при помощи альтиметров (Gelderloos et al., 2013; Nettmann et al., 2009). Метод опирается на представление о стерическом понижении уровня моря при развитии конвекции как результате увеличения интегральной плотности столба воды. В настоящей работе приводится подробный анализ межгодовой изменчивости глубины конвекции на базе наиболее полных массивов данных натуральных наблюдений, в том числе полученных с привлечением спутниковой информации, а также исследуется возможность изучения межгодовой изменчивости глубины конвекции по данным спутниковой альтиметрии.

## Материалы и методы

В качестве основных массивов натуральных данных были взяты массивы вертикальных профилей температуры и солёности *in situ* EN4 Hadley Center data base (1993–2016 гг., <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/en4/>) и массив ARMOR (1993–2016 гг., <http://marine.copernicus.eu/>). В массиве ARMOR вертикальные профили температуры и солёности представлены в ячейках сетки  $1/4 \times 1/4^\circ$ , на стандартных океанографических горизонтах и с месячной дискретностью (Guinehut et al., 2012). Глубина верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) выделялась тремя различными способами посредством анализа профилей условной плотности по работам: (de Boyer Montegut et al., 2004; Kara et al., 2000) и Духовского Д.С. (Духовской, 2017, личное сообщение). Подробное описание массива и методов приводится в работе (Башмачников и др., 2018).

Массивы абсолютной динамической топографии уровня моря были скачаны из архива спутниковой альтиметрии AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data, <http://avis0.altimetry.fr/>), где результаты интерполяции данных с нескольких спутников представлены на сетке с пространственным разрешением  $1/4 \times 1/4^\circ$  и временной дискретностью 7 сут (1993–2016). Вычисление аномалий уровня моря в областях наиболее частого развития глубокой конвекции (рис. 1, см. с. 193) проводилось по методике (Gelderloos et al., 2013): недельные данные AVISO осреднялись до месячных, удалялся среднесезонный

ход и трехлетнее скользящее среднее (локальный тренд), после чего определялось минимальное значение полученных аномалий уровня моря в холодный период (январь – апрель) каждого года.

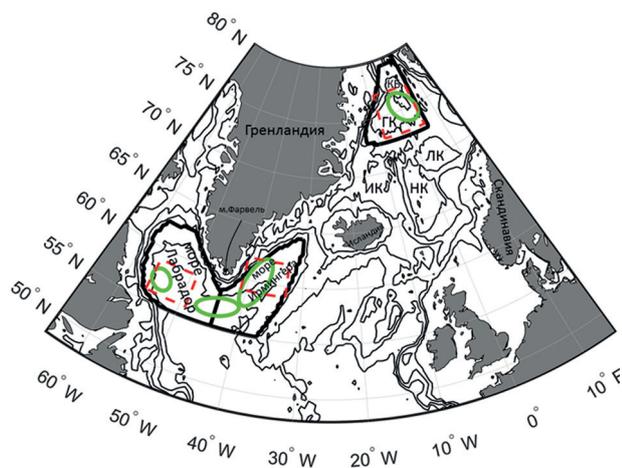


Рис. 1. Батиметрия (тонкие контуры) Северной Атлантики и Северо-Европейского бассейна. Районы морей Лабрадор, Ирмингера и Гренландского, где возможно развитие глубокой конвекции, ограничены чёрными линиями. Области, где конвекция происходит наиболее часто, отмечены зелёными эллипсами (см. Башмачников и др., 2018). Районы, используемые для вычисления аномалий уровня моря, ограничены красным пунктиром. КБ — котловина Борей, ГК — Гренландская котловина, ИК — Исландская котловина, НК — Норвежская котловина, ЛК — Лофотенская котловина

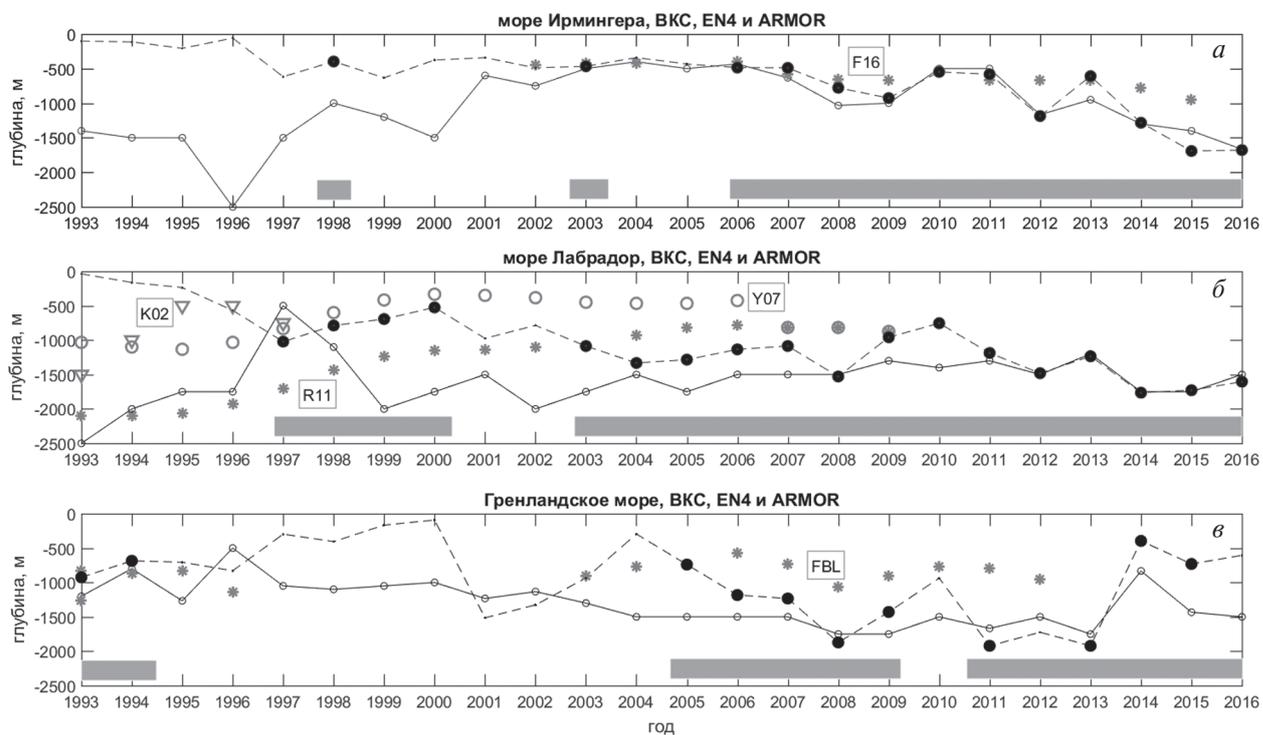


Рис. 2. Максимальная глубина перемешанного слоя с ноября 2017 г. по октябрь 2018 г. по данным EN4 (пунктир; чёрными кружками и серыми прямоугольниками над осями отмечены годы, когда количество профилей превышало 40) и ARMOR (сплошная линия) в морях Ирмингера (а), Лабрадор (б) и Гренландском (в). Маркерами показаны данные предыдущих исследований (F16 — (Fröb et al., 2016); K02 — (Khaliwala et al., 2002); Y07 — (Yashayaev, 2007); R11 — (Rhein et al., 2011); FBL — (Budeus et al., 1998; Fischer et al., 1995; Latarius, Quadfasel, 2016). Авторы работ (Khaliwala et al., 2002; Rhein et al., 2011) приводят не глубину конвекции, а характеристики лабдорской водной массы, и эти результаты представлены в относительной шкале значений

Межгодовые изменчивости максимальных глубин ВКС для трёх районов исследования по данным EN4 и ARMOR показаны на *рис. 2а–в* (см. с. 193). Наибольшие отличия в максимальной глубине ВКС отмечались в периоды малого количества наблюдений. Коэффициенты корреляции между разницей глубин ВКС ( $Z_{EN4} - Z_{ARMOR}$ ) и количеством наблюдений составляют от  $-0,55$  до  $-0,65$ . Если рассматривать только годы с более чем 40 профилями за зимний период, то средняя разница между максимальными глубинами ВКС по EN4 и ARMOR составила в среднем от 100 до 300 м. Корреляция между рядами увеличивалась от 0,01 до 0,83 (море Ирмингера), от 0,22 до 0,48 (море Лабрадор) и от 0,60 до 0,75 (Гренландское море). Межгодовой ход глубин конвекции по ARMOR (см. *рис. 2а–в*) показал неплохое совпадение с данными других источников: как с работами, использующими подмножество базы EN4, но другие методики выделения глубины ВКС (Budeus et al., 1998; Fischer et al., 1995; Fröb et al., 2016; Latarius, Quadfasel, 2016), так и с работами, использующими индексы конвекции. Последние получены по температуре глубинных вод (Алексеев и др., 2001), в результате комплексного экспертного анализа характеристик промежуточного слоя (Ronski, Budeus, 2005), по толщинам промежуточного слоя между фиксированными изопикнами (Yashayev, 2007), по изменению характеристик лабradorской водной массы (Khatiwala et al., 2002), по возрасту лабradorской водной массы (Rhein et al., 2011). Так, ослабление конвекции с 2002 по 2004 г. и резкое усиление в 2008 г. в море Лабрадор (Yashayev, Loder, 2009) хорошо отражены в результатах нашего анализа по массиву ARMOR, но не по EN4 (см. *рис. 2б*). Таким образом, общий ход глубины конвекции по ARMOR хорошо воспроизводит тенденции даже при малом количестве наблюдений. Эти результаты далее используются как наиболее репрезентативные.

## Результаты

Следуя методике (Gelderloos et al., 2013), предложенной для анализа изменчивости глубины конвекции по данным альтиметрии, вычислялись аномалии уровня моря в зимний период в центральных областях морей Ирмингера ( $59-62^\circ$  с. ш.,  $33-41^\circ$  з. д.), Лабрадор ( $56-59^\circ$  с. ш.,  $49-56^\circ$  з. д.) и Гренландского ( $73-77^\circ$  с. ш.,  $8^\circ$  з. д. –  $5^\circ$  в. д.). Временной ход полученных значений нормированных аномалий уровня моря при трёхлетнем скользящем осреднении показан на *рис. 3* (см. с. 195) совместно с нормированными аномалиями глубины конвекции и интегральной плотности воды в слое 100–2000 м. Нормировка проводилась стандартным способом — вычитанием среднего и делением на стандартное отклонение. Общий ход аномалий уровня достаточно хорошо повторяет ход межгодовой изменчивости глубины конвекции по данным ARMOR, однако в отдельные годы имеются существенные различия, снижающие корреляцию. Лучше всего глубина конвекции коррелирует с альтиметрическими данными в морях Ирмингера и Лабрадор (см. *рис. 3а, б*), где коэффициент корреляции составляет 0,5 для рядов, сглаженных скользящим средним с шириной окна 3 года, и 0,5–0,6 — с шириной окна 5 лет (*таблица*). В Гренландском море (см. *рис. 3в, таблицу*) коэффициенты корреляции незначимы даже при сглаживании скользящим средним с шириной окна 3 и 5 лет. При изменении границ областей коэффициенты корреляции изменялись существенно. В таблице приведены максимальные коэффициенты корреляции, которые получены по областям, одновременно являющимся областями наиболее частого развития конвекции.

Аномалии уровня в исследуемых морях, в числе прочих процессов, формируются изменчивостью интегральной плотности столба воды (стерической составляющей) и интенсивности циклонической циркуляции (геострофической составляющей). Интегральная плотность столба воды была рассчитана по тем же центральным областям исследуемых морей, что и аномалии уровня. Интегрирование проводилось в диапазоне глубин от 100 м (под сезонным пикноклином) до максимальной глубины зимней конвекции — 2000 м (моря Лабрадор и Гренландское) и 1500 м (море Ирмингера), после чего данные осреднялись с января по май. Анализ показал слабую зависимость результатов от области интегрирования и периода осреднения (в пределах промежутка времени наиболее вероятного развития конвекции — с января по апрель (Башмачников и др., 2018)). Как исходные ряды, так и ряды при трёхлетнем осреднении во

всех морях показывают высокие коэффициенты корреляции глубины конвекции и интегральной плотности воды, достигающие 0,6–0,9 (см. таблицу). Увеличение плотности с 1995 по 2010 г. в центральной части Гренландского моря (см. рис. 3в) ранее отмечалось в работе (Somavilla et al., 2013), где использовались базы натуральных данных ICES и Pangaеа.

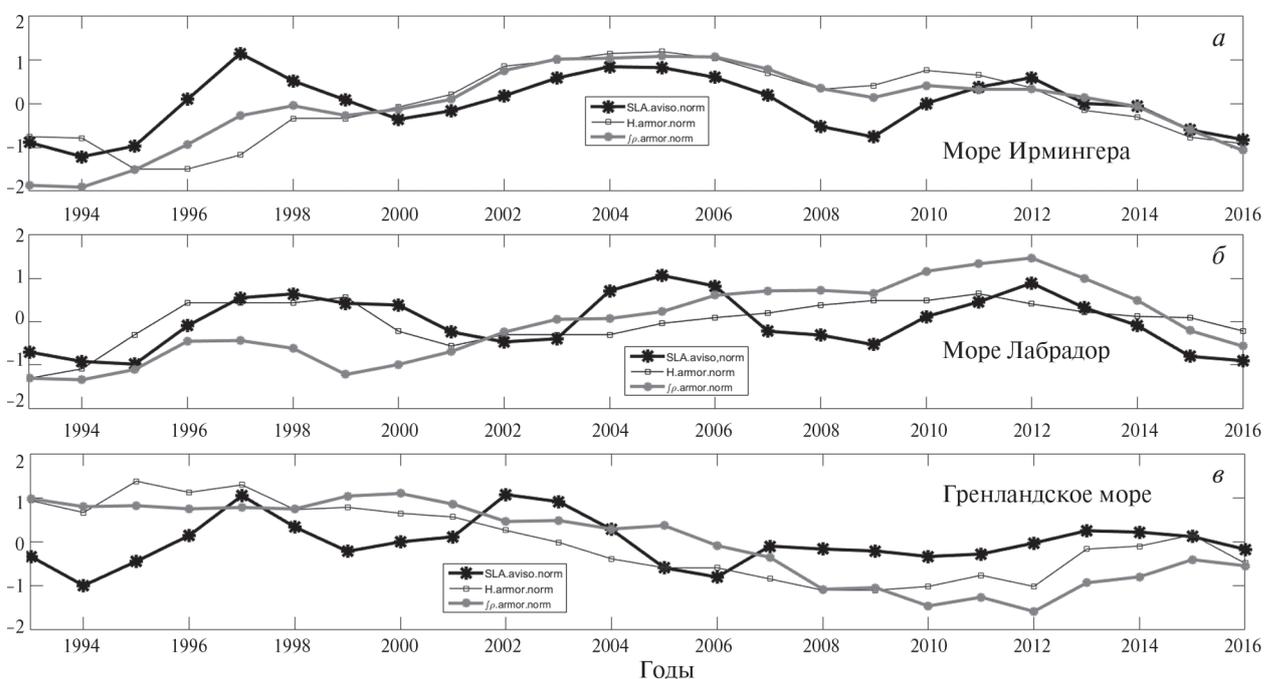


Рис. 3. Временной ход нормированных значений аномалий уровня моря в районах конвекции, рассчитанных по альтиметрическим данным (жирные чёрные линии со звёздочками), нормированной глубины конвекции по данным ARMOR (тонкие чёрные линии с квадратиками) и интегральной плотности воды по данным ARMOR (жирные серые линии с кружочками) в морях Ирмингера (а), Лабрадор (б) и Гренландском (в). Приведены данные при трёхлетнем скользящем усреднении. Для лучшей визуализации нормированная интегральная плотность воды взята с обратным знаком

Коэффициенты корреляции между нормированными рядами максимальной глубины конвекции и колебаний уровня, максимальной глубины конвекции и интегральной плотности воды. Полужирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции (при отсутствии сглаживания  $\geq 0,42$ )

Море	Нет сглаживания	3-летнее сглаживание	5-летнее сглаживание
Аномалия уровня моря — максимальная глубина конвекции			
Гренландское	0,29	0,29	0,32
Лабрадор	0,14	<b>0,48</b>	0,46
Ирмингера	0,32	<b>0,48</b>	<b>0,59</b>
Интегральная плотность воды — максимальная глубина конвекции			
Гренландское	<b>0,74</b>	<b>0,84</b>	<b>0,86</b>
Лабрадор	<b>0,63</b>	<b>0,76</b>	<b>0,78</b>
Ирмингера	<b>0,74</b>	<b>0,87</b>	<b>0,97</b>

## Обсуждение

Сравнение межгодовой изменчивости глубины конвекции, рассчитанной по массиву ARMOR, с аномалиями уровня моря, полученными по данным спутниковой альтиметрии, продемонстрировало неоднозначность связи между этими параметрами. Ранее в работе (Gelderloos et al., 2013) была показана согласованность межгодовой изменчивости глубины конвекции на корабле погоды Браво в море Лабрадор (1967–1973) и предвычисленных

стерических колебаний уровня моря. Опираясь на литературные источники, основанные на довольно ограниченных массивах наблюдений, авторы исследования провели качественное сравнение полученных результатов с изменчивостью аномалий уровня моря по данным спутниковой альтиметрии (1993–2009), подтвердив наличие определённой связи между этими параметрами. При этом было отмечено, что альтиметрия не всегда достаточно хорошо выявляет межгодовую изменчивость.

Также мы протестировали предложенную методику на наиболее репрезентативном в настоящий момент массиве данных комбинированных натуральных и спутниковых наблюдений ARMOR. Как показали результаты, несмотря на то, что колебания уровня отражают общий ход изменения глубины конвекции в морях Лабрадор и Ирмингера (см. *рис. 3а, б*), корреляции между рядами находятся на уровне значимости. Корреляции уровня моря с глубиной конвекции в Гренландском море были стабильно ниже уровня значимости (см. *рис. 3в*). В сглаженном ходе альтиметрического уровня моря довольно хорошо видны квазисемилетние цикличности во всех трёх морях (см. *рис. 3*). Эти же цикличности проявляются в изменении глубины конвекции в море Лабрадор, в меньшей степени — в море Ирмингера, но отсутствуют в Гренландском море.

Стерические колебания непосредственно связаны с вертикальными и горизонтальными потоками тепла/пресной воды в бассейны. Эти же процессы одновременно формируют условия для развития конвекции, и можно ожидать прямой связи между параметрами (что и было показано в работе (Gelderloos et al., 2013) на примере станции Браво). Усиление циклонической циркуляции способствует подъёму купола холодных вод к поверхности, уменьшая интегральное теплосодержание верхнего слоя, что тоже способствует развитию конвекции. Однако колебания уровня моря также слагаются из ряда факторов, которые напрямую не связаны с интенсивностью конвекции. Так, вклад поля ветра (в том числе конвергенции Экмановских потоков), волновых процессов (амплитуда колебаний может составлять несколько сантиметров (Volkov et al., 2013)), особенностей водообмена с соседними бассейнами могут по-разному влиять на интенсивность конвекции и на уровень моря. Последний эффект особенно важен для Гренландского моря, сообщаемого с соседними акваториями через достаточно узкие проливы. Другая причина низких корреляций в Гренландском море может быть технической, например, связанной с уменьшением точности альтиметрических наблюдений в районе Гренландского шельфа и прилегающих районах при наличии льда (Мионов, 2004).

В качестве альтернативного индекса интенсивности конвекции была предложена интегральная плотность воды в районах наиболее частого развития конвекции. Ранее опыт расчёта стерических аномалий уровня по комбинированным данным спутников GRACE и спутниковой альтиметрии (Белоненко, Федоров, 2018) показал неплохое соответствие с изменчивостью глубины конвекции. Индекс, основанный на интегральной плотности воды, оценивается проще и более надёжно, чем стерические колебания по данным GRACE, где есть множество пропусков в данных.

При достаточно стабильной плотности глубинных слоёв интенсивность конвекции, прежде всего, определяется плотностью приповерхностных вод, а в результате конвекции увеличивается объём купола более плотных промежуточных вод. Поэтому индекс, основанный на интегральной плотности промежуточных вод, более чувствителен к межгодовой изменчивости интенсивности конвекции, чем ранее используемые индексы средних гидрофизических характеристик в больших объёмах придонных вод (Алексеев и др., 2001; Khatiwala et al., 2002; Rhein et al., 2011).

## Выводы

В работе были протестированы индексы глубокой конвекции: аномалии уровня моря и аномалии интегральной плотности воды, рассчитанные в выделенных областях наиболее частого развития глубокой конвекции. Было показано, что аномалии альтиметрического уровня

довольно слабо коррелируют с интенсивностью конвекции, а аномалии интегральной плотности воды хорошо описывают межгодовую изменчивость максимальной глубины конвекции во всех исследуемых морях. Использование аномалий плотности, которые распространяются от локализованных областей конвекции по акватории морей после закрытия конвективных ячеек (см., например, работу (Marshall, Schott, 1999)), даёт возможность фиксировать изменчивость интенсивности глубокой конвекции даже по сравнительно редкой сетке наблюдений.

Результаты анализа изменчивости глубокой конвекции с 1993 г. показали, что максимальная за холодный период глубина конвекции в морях Лабрадор, Ирмингера и Гренландском меняется асинхронно (см. *рис. 3*). Выявленные на достаточно коротком ряду наблюдений тенденции в изменении глубин конвекции могут быть частью более долгопериодных циклов. В морях Лабрадор и Ирмингера в межгодовой изменчивости глубины конвекции также выражены квазисемилетние циклы.

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

## Литература

1. *Алексеев Г. В., Йоханнесен О. М., Ковалевский Д. В.* О развитии конвективных движений под воздействием локальных возмущений плотности на поверхности моря // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 3. С. 368–377.
2. *Башмачников И. Л., Федоров А. М., Весман А. В., Белоненко Т. В., Колдунов А. В., Духовской Д. С.* Термохалинная конвекция в субполярных морях Северной Атлантики и Северо-Европейского бассейна СЛО по спутниковым и натурным данным. Часть 1: локализация областей конвекции // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 184–194.
3. *Белоненко Т. В., Федоров А. М.* Стерические колебания уровня и глубокая конвекция в Лабрадорском море и море Ирмингера // Исследования Земли из космоса. 2018. № 3. С. 56–69.
4. *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.
5. *Ковалевский Д. В.* Анализ и моделирование глубокой конвекции в Гренландском море: дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб., 2002. 230 с.
6. *Миронов Е. У.* Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз. СПб.: АНИИ, 2004. 320 с.
7. *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.
8. *Bönisch G., Blindheim J., Bullister J. L., Schlosser P., Wallace D. W.* Long-term trends of temperature, salinity, density, and transient tracers in the central Greenland Sea // J. Geophysical Research. C: Oceans. 1997. V. 102. No. C8. P. 18553–18571.
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. 18 513–18 527.
10. *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. V. 109. P. C12003.
11. *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.
12. *Dukhovskoy D. S., Myers P. G., Platov G., Timmermans M. L., Curry B., Proshutinsky A., Bamber J. L., Chassignet E., Hu X., Lee C. M., Somavilla R.* Greenland freshwater pathways in the sub-Arctic Seas from model experiments with passive tracers // J. Geophysical Research. C: Oceans. 2016. V. 121. No. 1. P. 877–907.
13. *Fischer J., Schott F., Visbeck M.* Greenland Sea convection monitoring // Nordic Seas Symp. 1995. P. 61–64.
14. *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. No. 13244. P. 1–8. DOI: 10.1038/ncomms13244.

15. 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.
16. Greenland Sea Project — a venture toward improved understanding of the ocean’s role in climate // EOS Transactions. AGU. 1990. V. 71(24). P. 750–756. DOI: 10.1029/90EO00208.
17. Guinehut S., Dhompas 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.
18. Herrmann M., Bouffard J., Beranger K. Monitoring open-ocean deep convection from space // Geophysical Research Letters. 2009. V. 36. No. L03. DOI: 10.1029/2008GL036422.
19. 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.
20. Johannessen O.M., Lygre K., Eldevik T. Convective chimneys and plumes in the Northern Greenland Sea // The Nordic Seas: An Integrated Perspective / eds. H. Drange, T.M. Dokken, T. Furevik, R. Gerdes, W. Berger. AGU, 2005. P. 251–272.
21. Kara A.B., Rochford P.A., Hurlburt H.E. An optimal definition for ocean mixed layer depth // J. Geophysical Research. C: Oceans. 2000. V. 105. P. 16803–16821.
22. Khatiwala S., Schlosser P., Visbeck M. Rates and mechanisms of water mass transformation in the Labrador Sea as inferred from tracer observations // J. Physical Oceanography. 2002. V. 32. No. 2. P. 666–686.
23. Latarius K., Quadfasel D. Water mass transformation in the deep basins of the Nordic Seas: Analyses of heat and freshwater budgets // Deep Sea Research. Pt. I. 2016. V. 114. P. 23–42.
24. 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.
25. Marshall J., Schott F. Open-ocean convection: Observations, theory, and models // Reviews of Geophysics. 1999. V. 37. No. 1. P. 1–64.
26. Meincke J., Jonsson S., Swift J.H. Variability of convective conditions in the Greenland Sea // ICES Marine Science Symp. 1992. V. 195. P. 32–39.
27. Pickart R.S., Straneo F., Moore G.W.K. Is Labrador Sea Water formed in the Irminger basin? // Deep Sea Research. Pt. I. 2003. V. 50. P. 23–52. DOI: 10.1016/S0967-0637(02)00134-6.
28. Rhein M. Convection in the Greenland Sea, 1982–1993 // J. Geophysical Research. C: Oceans. 1996. V. 101. No. C8. P. 18183–18192.
29. Rhein M., Kieke D., Hüttl-Kabus S., Roessler A., Mertens C., Meissner R., Klein B., Boning C.W., Yashayaev I. Deep water formation, the subpolar gyre, and the meridional overturning circulation in the subpolar North Atlantic // Deep Sea Research. Pt. II. 2011. V. 58. No. 17. P. 1819–1832.
30. Ronski S., Budeus G. Time series of winter convection in the Greenland Sea // J. Geophysical Research. C: Oceans. 2005. V. 110. No. C04015. DOI: 10.1029/2004JC002318.
31. Schlosser P., Bonisch G., Rhein M., Bayer R. Reduction of deepwater formation in the Greenland Sea during the 1980s: Evidence from tracer data // Science. 1991. V. 251. No. 4997. P. 1054–1056.
32. Somavilla R., Schauer U., Budeus G. Increasing amount of Arctic Ocean deep waters in the Greenland Sea // Geophysical Research Letters. 2013. V. 40. No. 16. P. 4361–4366.
33. Volkov D.L., Belonenko T.V., Foux V.R. Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin — a sub-Arctic hot spot of ocean variability // Geophysical Research Letters. 2013. V. 40. No. 4. P. 738–743.
34. Yashayaev I. Hydrographic changes in the Labrador Sea, 1960–2005 // Progress in Oceanography. 2007. V. 73. P. 242–276.
35. Yashayaev I., Loder J.W. Enhanced production of Labrador Sea Water in 2008 // Geophysical Research Letters. 2009. V. 36. P. L0160. DOI: 10.1029/2008GL036162.

## Thermohaline convection in the subpolar seas of the North Atlantic from satellite and in situ observations. Part 2: indices of intensity of deep convection

I. L. Bashmachnikov<sup>1,2</sup>, A. M. Fedorov<sup>1,2</sup>, A. V. Vesman<sup>1,2,3</sup>,  
T. V. Belonenko<sup>1</sup>, D. S. Dukhovskoy<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia

<sup>2</sup> Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre  
Saint Petersburg 199034, Russia

<sup>3</sup> State Research Center "Arctic and Antarctic Research Institute"  
Saint Petersburg 199397, Russia

<sup>4</sup> Center for Ocean-Atmospheric Prediction Studies of the 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, ddukhovskoy@fsu.edu

Variation in locations of the maximum development of deep convection in the subpolar seas, taking into account their small dimensions, represent difficulty in identifying its interannual variability from usually sparse in situ data. In this work, the interannual variability of the maximum convection depth, is obtained using one of the most complete datasets ARMOR, which combines in situ and satellite data. The convection depths, derived from ARMOR, are used for testing the efficiency of two indices of convection intensity: (1) sea-level anomalies from satellite altimetry and (2) the integral water density in the areas of the most frequent development of deep convection. The first index, capturing some details, shows low correlations with the interannual variability of the deep convection intensity. The second index shows high correlation with the deep convection intensity in the Greenland, Irminger and Labrador seas. Asynchronous variations in the deep convection intensity in the Labrador-Irminger seas and in the Greenland Sea are obtained. In the Labrador and in the Irminger seas, the quasi-seven-year variations in the convection intensity are identified.

**Keywords:** deep convection, assimilation of satellite data, altimetry, water density, the Greenland Sea, the Labrador Sea, the Irminger Sea

Accepted: 16.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-191-201

### References

1. Alekseev G. V., Johannessen O. M., Kovalevsky D. V., O razvitii konvektivnykh dvizhenii pod vozdeistviem lokal'nykh vozmushchenii plotnosti na poverkhnosti morya (On development of convective motions under the influence of local density perturbations on the sea surface), *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2001, Vol. 37, No. 3, pp. 368–377.
2. Bashmachnikov I. L., Fedorov A. M., Vesman A. V., Belonenko T. V., Koldunov V. A., Dukhovskoy D. C., Termokhalinnaya konvektsiya v subpolyarnykh moryakh Severnoi Atlantiki i Severo-Evropeiskogo basseina SLO po sputnikovym i naturnym dannym. Chast' 1: lokalizatsiya oblastei konveksii (Thermohaline convection in the Subpolar seas of the North Atlantic from satellite and in situ data. Part 1: localization of convection areas), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 184–194.
3. Belonenko T. V., Fedorov A. M., Stericheskie kolebaniya urovnya i glubokaya konvektsiya v Labradorskom more i more Irmingera (Steric sea-level fluctuations and deep convection in the Labrador and the Irminger seas), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 3, pp. 56–69.
4. 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.
5. Kovalevsky D. V., *Analiz i modelirovanie glubokoi konveksii v Grenlandskom more: diss. kand. fiz.-mat. nauk* (The analysis and modeling of deep convection in the Greenland sea, Cand. phys. and math. sci. thesis), Saint Petersburg, 2002, 230 p.

6. Mironov E. U., *Ledovye usloviya v Grenlandskom i Barentsevom moryakh i ikh dolgosrochnyi prognoz* (Ice conditions in the Greenland and the Barents seas and their long-term forecasts), Saint Petersburg: AARI, 2004, 320 p.
7. Nagurny A. P., Popov A. V., Intensive podnyatie glubinnykh i donnykh vod i ikh formirovanie na poverkhnosti v raione Grenlandskoi kotloviny (Intensive uplift of deep and bottom waters and their formation near the sea-surface in the Greenland basin), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1985, No. 7, pp. 70–75.
8. Bönisch G., Blindheim J., Bullister J. L., Schlosser P., Wallace D. W., Long-term trends of temperature, salinity, density, and transient tracers in the central Greenland Sea, *J. Geophysical Research. C: Oceans*, 1997, Vol. 102, No. C8, pp. 18553–18571.
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. 18 513–18 527.
10. 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, pp. C12003.
11. 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, Vol. 63, No. 1, pp. 36–51.
12. Dukhovskoy D. S., Myers P. G., Platov G., Timmermans M. L., Curry B., Proshutinsky A., Bamber J. L., Chassignet E., Hu X., Lee C. M., Somavilla R., Greenland freshwater pathways in the sub-Arctic Seas from model experiments with passive tracers, *J. Geophysical Research. C: Oceans*, 2016, Vol. 121, No. 1, pp. 877–907.
13. Fischer J., Schott F., Visbeck M., Greenland Sea convection monitoring, *Nordic Seas Symp.*, 1995, pp. 61–64.
14. 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, No. 13244, pp. 1–8, DOI: 10.1038/ncomms13244.
15. 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.
16. Greenland Sea Project — a venture toward improved understanding of the ocean’s role in climate, *EOS Transactions. AGU*, 1990, Vol. 71(24), pp. 750–756, DOI: 10.1029/90EO00208.
17. 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.
18. Herrmann M., Bouffard J., Beranger K., Monitoring open-ocean deep convection from space, *Geophysical Research Letters*, 2009, Vol. 36, No. L03, DOI: 10.1029/2008GL036422.
19. 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.
20. Johannessen O. M., Lygre K., Eldevik T., Convective chimneys and plumes in the Northern Greenland Sea, *The Nordic Seas: An Integrated Perspective*, H. Drange, T. M. Dokken, T. Furevik, R. Gerdes, W. Berger (eds.), AGU, 2005, pp. 251–272.
21. Kara A. B., Rochford P. A., Hurlburt H. E., An optimal definition for ocean mixed layer depth, *J. Geophysical Research. C: Oceans*, 2000, Vol. 105, pp. 16803–16821.
22. Khatiwala S., Schlosser P., Visbeck M., Rates and mechanisms of water mass transformation in the Labrador Sea as inferred from tracer observations, *J. Physical Oceanography*, 2002, Vol. 32, No. 2, pp. 666–686.
23. Latarius K., Quadfasel D., Water mass transformation in the deep basins of the Nordic Seas: Analyses of heat and freshwater budgets, *Deep Sea Research. Pt. I*, 2016, Vol. 114, pp. 23–42.
24. 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.
25. Marshall J., Schott F., Open-ocean convection: Observations, theory, and models, *Reviews of Geophysics*, 1999, Vol. 37, No. 1, pp. 1–64.
26. Meincke J., Jonsson S., Swift J. H., Variability of convective conditions in the Greenland Sea, *ICES Marine Science Symp.*, 1992, Vol. 195, pp. 32–39.
27. Pickart R. S., Straneo F., Moore G. W. K., Is Labrador Sea Water formed in the Irminger basin? *Deep Sea Research. Pt. I*, 2003, Vol. 50, pp. 23–52, DOI: 10.1016/S0967-0637(02)00134-6.
28. Rhein M., Convection in the Greenland Sea, 1982–1993, *J. Geophysical Research. C: Oceans*, 1996, Vol. 101, No. C8, pp. 18183–18192.
29. Rhein M., Kieke D., Hüttl-Kabus S., Roessler A., Mertens C., Meissner R., Klein B., Boning C. W., Yashayaev I., Deep water formation, the subpolar gyre, and the meridional overturning circulation in the subpolar North Atlantic, *Deep Sea Research. Pt. II*, 2011, Vol. 58, No. 17, pp. 1819–1832.

30. Ronski S., Budeus G., Time series of winter convection in the Greenland Sea, *J. Geophysical Research. C: Oceans*, 2005, Vol. 110, No. C04015, DOI: 10.1029/2004JC002318.
31. Schlosser P., Bonisch G., Rhein M., Bayer R., Reduction of deepwater formation in the Greenland Sea during the 1980s: Evidence from tracer data, *Science*, 1991, Vol. 251, No. 4997, pp. 1054–1056.
32. Somavilla R., Schauer U., Budeus G., Increasing amount of Arctic Ocean deep waters in the Greenland Sea, *Geophysical Research Letters*, 2013, Vol. 40, No. 16, pp. 4361–4366.
33. Volkov D. L., Belonenko T. V., Foux V. R., Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin — a sub-Arctic hot spot of ocean variability, *Geophysical Research Letters*, 2013, Vol. 40, No. 4, pp. 738–743.
34. Yashayaev I., Hydrographic changes in the Labrador Sea, 1960–2005, *Progress in Oceanography*, 2007, Vol. 73, pp. 242–276.
35. Yashayaev I., Loder J. W., Enhanced production of Labrador Sea Water in 2008, *Geophysical Research Letters*, 2009, Vol. 3, pp. L0160, DOI: 10.1029/2008GL036162.