

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

УДК 551.465
EDN: MOQPNJ

DOI: 10.29039/0233-7584-2023-1-21-30

Характеристики плотностных инверсий в Гренландском море в холодный сезон за 1993–2019 годы

А. С. Каледина^{1, ✉}, И. Л. Башмачников^{1, 2}

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

² Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена, Санкт-Петербург, Россия
✉ a.kaledina@spbu.ru

Поступила в редакцию 30.06.2022; одобрена после рецензирования 15.07.2022;
принята к публикации 08.11.2022.

Аннотация

Цель. Выявить пространственно-временную изменчивость характеристик плотностных инверсий и предложить механизмы их формирования в холодный сезон в Гренландском море за период 1993–2019 гг. для изучения механизмов развития конвекции в море – цель настоящей работы.

Методы и результаты. Используются данные натурных наблюдений температуры и солёности массива EN.4.2.1 (база данных *Met Office Hadley Centre*) за холодный сезон (ноябрь – апрель). По вертикальным профилям выявляются инверсии потенциальной плотности. Наибольшие средние за холодный сезон вертикальные мощности инверсий ~ 400 м зафиксированы в годы с максимальной конвекцией (2008, 2011, 2013), а наибольшая величина скачка плотности наблюдается в 1990-е гг. с наименьшей интенсивностью конвекции. Во всем регионе преобладает дестабилизация плотности с доминирующим вкладом солёности (~ 70% всех профилей с инверсиями), особенно выраженная в северо-восточной части исследуемого района. Профили с исключительно солёностной дестабилизацией составляют 40% от общего количества, с исключительно термической – только 13%, остальные инверсии имели смешанное происхождение. Вклад солёности в формирование инверсий в 2010-х больше по сравнению с серединой 1990-х гг. **Выводы.** Данными прямых наблюдений подтверждается ведущая роль зимнего роста солёности поверхностного слоя в формировании инверсий плотности воды, а, следовательно, и в развитии глубокой конвекции. Это может говорить о существенной роли потенциальной неустойчивости в развитии конвекции в регионе.

Ключевые слова: конвекция, Атлантический океан, Гренландское море, глубокая конвекция, плотностные инверсии, потенциальная неустойчивость

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке гранта СПбГУ № 93016972.

Для цитирования: Каледина А. С., Башмачников И. Л. Характеристики плотностных инверсий в Гренландском море в холодный сезон за 1993–2019 годы // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 1. С. 21–30. EDN MOQPNJ. doi:10.29039/0233-7584-2023-1-21-30

Characteristics of Density Inversions in the Greenland Sea during the Cold Seasons in 1993–2019

A. S. Kaledina¹, ✉, I. L. Bashmachnikov^{1, 2}

¹ St Petersburg University, Saint Petersburg, Russia

² Nansen Environmental and Remote Sensing Centre, Saint Petersburg, Russia

✉ a.kaledina@spbu.ru

Abstract

Purpose. The study aims at revealing spatial and temporal variability of the characteristics of density inversions in the Greenland Sea and at proposing the mechanisms of their formation during the cold seasons in 1993–2019. This helps further understanding the mechanisms which govern variation in the convection intensity in the sea.

Methods and Results. The in situ temperature and salinity taken from the EN.4.2.1 dataset (*Met Office Hadley Center* database) and casted during the cold season (November – April), are used in the study. The vertical profiles reveal a number of potential density inversions. The biggest vertical scale of a winter-mean inversion reached about 400 m and was recorded in the years of maximum convection intensity (2008, 2011 and 2013), and the largest value of density gradient was observed in the 1990s when convection was less intensive. Predominantly haline destabilization prevailed (about 70% of all the profiles with inversions) throughout the region; it was observed especially often in the northeastern part of the area under study. Exclusively haline destabilization accounts for 40% of all the profiles, exclusively thermal one – 13%, as for the rest of the profiles, both haline and thermal destabilizations are detected. In the 2010s, salinity contribution to the formation of inversions exceeded the one that had been observed in the mid 1990s.

Conclusions. The in situ data confirm the leading role of winter salinity increase in formation of the water density inversions in the upper ocean, and, consequently, in the development of deep convection. This may indicate a significant role of potential instability in the development of convection in the region.

Keywords: convection, Atlantic Ocean, Greenland Sea, deep convection, density inversions, potential instability

Acknowledgements: The study was funded by the St Petersburg University grant No. 93016972.

For citation: Kaledina, A.S. and Bashmachnikov, I.L., 2023. Characteristics of Density Inversions in the Greenland Sea during the Cold Seasons in 1993–2019. *Physical Oceanography*, 30(1), pp. 18–26. doi:10.29039/1573-160X-2023-1-18-26

Введение

Глубокая конвекция является важным элементом динамики Атлантической меридиональной океанической циркуляции (АМОЦ) и, как следствие, оказывает влияние на всю климатическую систему [1, 2]. Во многих исследованиях показана связь изменчивости интенсивности АМОЦ с изменчивостью интенсивности конвекции [3, 4]. При этом меняется и характер теплообмена океана и атмосферы в Северной Атлантике и прилегающей части Северного Ледовитого океана (СЛО) [5, 6].

В работе [7] были оценены основные механизмы контроля и изменчивости АМОЦ. Отмечается, что на десятилетних масштабах АМОЦ оказывает влияние на развитие глубокой конвекции в Гренландском море, а не наоборот. Это возможно в результате развития потенциальной неустойчивости столба воды [8] вследствие адвекции и последующего выхолаживания соленых и теплых атлантических вод в Гренландском море [9].

Вертикальное перемешивание в море, в том числе глубокая конвекция, может развиваться под воздействием сочетания различных внешних факторов. Разделяют термодинамические и динамические механизмы вертикального перемешивания [8], хотя часто они работают вместе.

К термодинамическим относят механизмы (связанные с возникновением гравитационной неустойчивости), при которых происходит увеличение плотности верхнего слоя воды по сравнению с нижележащим. Примерами такого перемешивания являются выхолаживание или осолонение водной поверхности при взаимодействии с атмосферой, двойная диффузия, термобарическая неустойчивость, потенциальная неустойчивость [8].

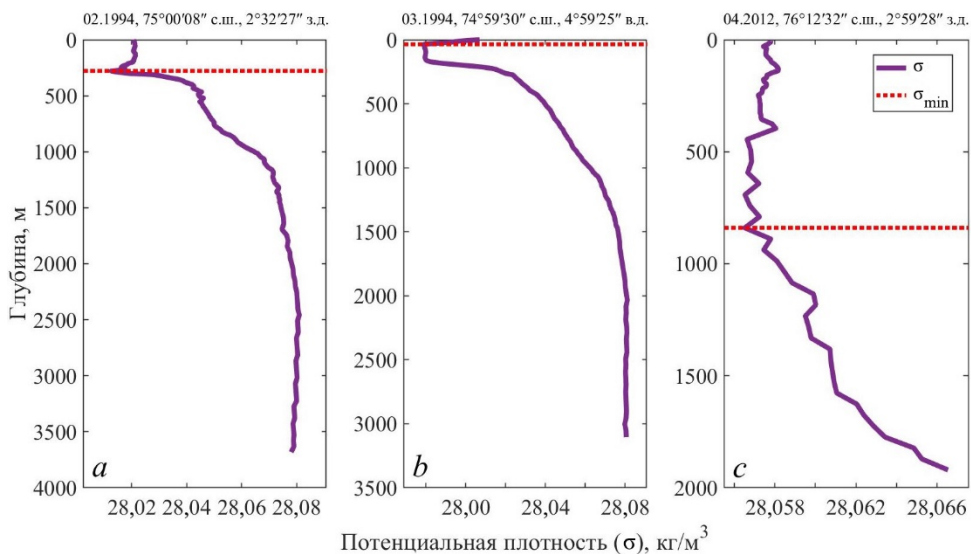
В результате циклонической циркуляции в центре Гренландской котловины происходит подъем холодных промежуточных вод к поверхности моря. При этом на глубинах менее 200 м образуются резкие градиенты температуры, солености и плотности воды, которые разрушаются во время интенсивной зимней конвекции [10]. Относительно небольшой мощностью верхнего слоя малой плотности и слабой стратифицированностью вод ниже пикноклина объясняется эпизодически наблюдаемая здесь большая (порой более 2000 м) глубина проникновения конвекции в течение холодного сезона.

Помимо циклонической циркуляции условия для развития глубокой конвекции открытого океана также формируются в период, предшествующий развитию конвекции [11]. Взаимодействие с атмосферой и океаническая адвекция за время теплого сезона могут как усиливать, так и ослаблять стратификацию слоя над куполом холодных вод к началу холодного периода, что при прочих равных условиях может приводить к усилению или ослаблению весенне-зимней конвекции [12, 13].

Наблюдаемый значительный рост интенсивности глубокой конвекции в Гренландском море с начала 2000-х гг. по сравнению с 1990-ми гг. [14] объясняется существенной интенсификацией адвекции соли с потоком рециркулирующих атлантических вод [9, 15]. Данные выводы были сделаны на основе наблюдаемой изменчивости балансов тепла и соли в верхнем слое центральной части Гренландского моря. В настоящей работе мы впервые рассматриваем изменчивость характеристик плотностных инверсий в Гренландском море на основе данных натуральных профилей температуры и солености. Анализ механизмов формирования этих инверсий в холодный сезон представляет собой базу для дальнейшего исследования причин наблюдаемой межгодовой изменчивости конвективных процессов.

Данные и методы

В работе использовались данные натуральных наблюдений температуры и солености массива *EN.4.2.1* базы данных *Met Office Hadley Centre*. Указанный массив включает в себя данные различных приборов вертикального профилирования океана. Основным источником является база данных *World Ocean Database*, которая дополняется данными буев-измерителей *Argo*, наблюдениями, собранными в ходе различных проектов и экспедиций (*ASBO*, *NPEO*, *NABOS*, *CABOS*), глобальной программы сбора профилей температуры и солености (*GTSP*). Данные проходят жесткий контроль качества, исключаются повторяющиеся профили [16].



Р и с. 1. Примеры профилей потенциальной плотности (σ) с инверсиями. Красным пунктиром обозначена глубина с минимальным значением плотности (σ_{\min})

Fig. 1. Examples of potential density (σ) profiles with inversions. Red dotted lines indicate the depths of the minimum density in the profiles (σ_{\min})

Под плотностной инверсией понимается уменьшение потенциальной плотности с глубиной (рис. 1). Для выделения профилей с инверсиями мы использовали разность значений потенциальной плотности на поверхности и на глубине минимальной плотности. Если разность этих значений превышала выбранный порог $0,001 \text{ кг/м}^3$, то считалось, что в профиле наблюдается инверсия. Далее профили проходили визуальный отбор, чтобы исключить ошибки алгоритма.

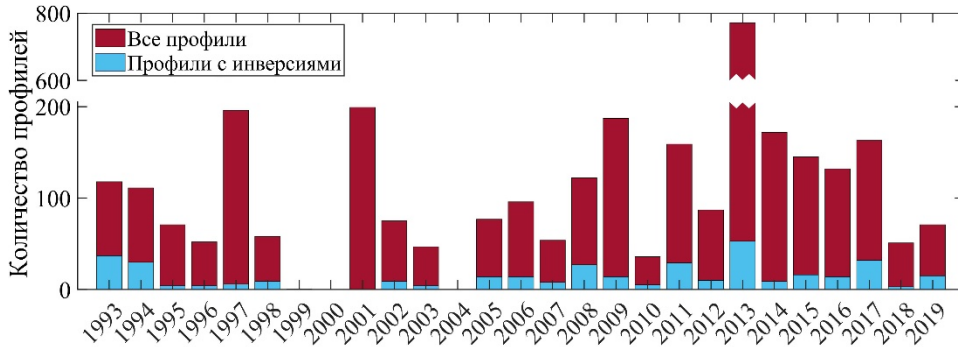
Результаты

В настоящей работе мы рассматриваем инверсии плотности как индикатор дальнейшего развития конвекции. Верхний перемешанный слой Гренландского моря начинает заглубляться в октябре – ноябре, активное развитие конвекции наблюдается в январе – апреле, а наибольшее количество случаев возникновения глубокой конвекции зафиксировано в апреле [17, 18]. Поэтому для анализа инверсий был выбран период с ноября по апрель.

Наибольшее количество профилей с инверсиями зарегистрировано в 2013 г., также выделяются 1993, 1994, 2008, 2011 и 2017 гг. Медианные значения по всему промежутку наблюдений составляют 96 профилей за холодный период и 14 профилей с инверсиями. Явный максимум количества выполненных профилей в 2013 г. (более 700, 23% от общего количества за все годы) связан с высокой частотой вертикального профилирования нескольких профилирующих буев в исследуемом районе.

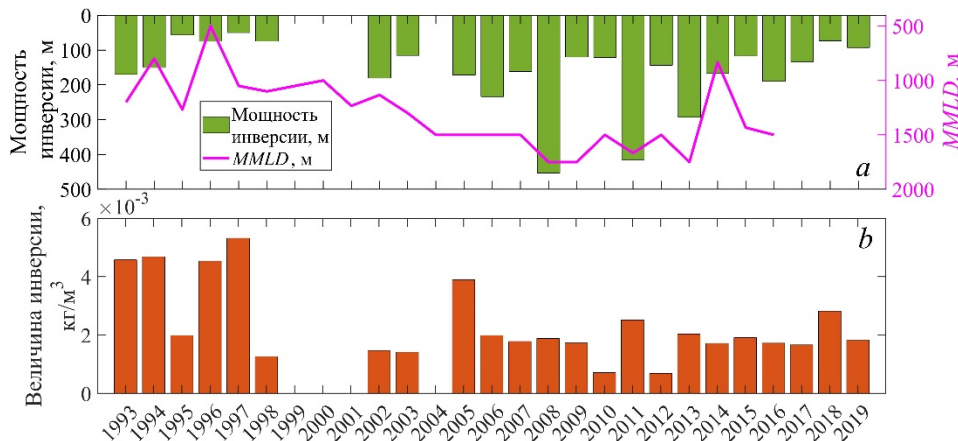
Так как прослеживается зависимость количества профилей с инверсиями от общего числа вертикальных зондирований (корреляция двух рядов дости-

гает 0,7 и является значимой для p -уровня $<0,01$), то имеет смысл рассматривать процентное количество профилей с инверсиями от общего количества профилей. Наибольшее количество профилей с инверсиями зафиксировано в 1993 г. (31%) и в 1994 г. (27%); сравнительно высокое количество инверсий также зафиксировано в 2008 г. (22%) и в 2011 г. (18%).



Р и с. 2. Межгодовая изменчивость количества всех выполненных профилей и профилей с инверсиями

F i g. 2. Interannual variability in the number of all the available profiles and those with inversions

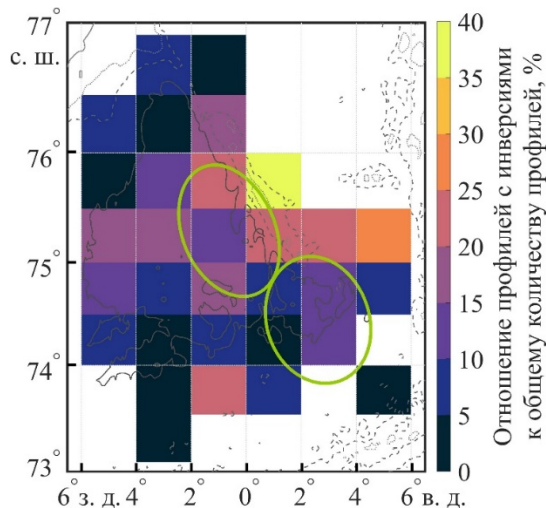


Р и с. 3. Межгодовая изменчивость вертикальной мощности инверсий – a и величины скачка плотности в инверсии – b . Значения $MMLD$ (максимальная за холодный сезон глубина перемешанного слоя) приводятся по данным работы [9]

F i g. 3. Interannual variability of vertical thickness of inversions – a and density jump in an inversion – b . The $MMLD$ (maximum mixed layer depth over the cold season) values are given according to [9]

За последние 30 лет наиболее интенсивная конвекция в Гренландском море наблюдалась с начала 2000-х гг. (рис. 3, a), а ее максимальные глубины зарегистрированы в 2008, 2009, 2011 и 2013 гг. [9]. В эти же годы, за исключением 2009 г., были зафиксированы наибольшие средние вертикальные мощности инверсий. Корреляция между средней за зиму мощностью инверсии и максимальной глубиной перемешанного слоя достигает 0,6 (p -уровень $<0,05$). Наибольшие значения скачка плотности в инверсиях наблюдались, наоборот,

в 1990-е гг. с малоинтенсивной конвекцией. Это, вероятно, объясняется меньшим запасом доступной потенциальной энергии для перемешивания в инверсиях сравнительно малой вертикальной мощности по сравнению с глубокими инверсиями с тем же значением скачка плотности.



Р и с. 4. Пространственное распределение процентного отношения профилей с инверсиями к общему количеству профилей в заданной сеточной области. Овалами обозначены области наиболее частого развития глубокой конвекции в Гренландском море. Учитывались только ячейки сетки, в которых общее число профилей с инверсиями превышало 30

Fig. 4. Gridded spatial distribution of the percentage of profiles with inversions relative to the total number of profiles. The ellipses indicate the areas of the most frequent development of deep convection in the Greenland Sea. Only the grid cells in which the overall number of the profiles with inversions exceeding 30, were taken into account

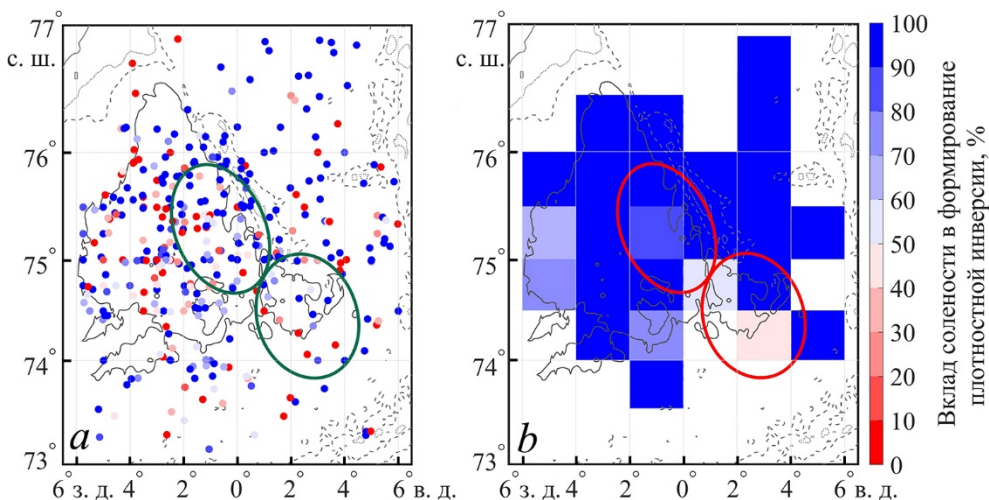
Область наибольшей повторяемости профилей с инверсиями расположена в глубоководной части на севере Гренландского моря. Меньше всего профилей зарегистрировано в южной (более устойчивая термическая стратификация) и северо-западной (ледяной покров и устойчивая соленостная стратификация) частях акватории.

Используя уравнение состояния морской воды

$$\sigma = \sigma_0 (-\alpha\Delta\theta + \beta\Delta S), \quad (1)$$

где σ – потенциальная плотность; σ_0 – референтная потенциальная плотность; α – коэффициент термического расширения морской воды; β – коэффициент соленостного сжатия морской воды; $\Delta\theta$ – разность потенциальной температуры на поверхности и на глубине минимальной потенциальной плотности; ΔS – разность солености на поверхности и на глубине минимальной потенциальной плотности, мы разделили плотностные инверсии на преимущественно термические (доминирует неустойчивость по $\alpha\Delta\theta$) и соленостные (доминирует неустойчивость по $\beta\Delta S$), что, соответственно, ведет в дальнейшем к развитию преимущественно термической или преимущественно соленостной конвекции. Профили как с преимущественно термическим, так и с преимущественно

солённым вкладом в неустойчивость практически равномерно покрывают всю акваторию (рис. 5, *a*). Профили с более чем 50%-ным вкладом солёности составляют 69% от общего количества профилей с инверсиями. При этом инверсии с почти 100%-ным вкладом солёности сосредоточены в северо-восточной части исследуемого региона.



Р и с. 5. Пространственное распределение профилей с инверсиями в Гренландском море – *a* и процентный вклад солёности в формирование плотностной инверсии – *b*. Овалами обозначены области наиболее частого развития глубокой конвекции в Гренландском море. Использовались только ячейки, где число профилей с инверсиями превышало 5

F i g. 5. Spatial distribution of the profiles with inversions in the Greenland Sea – *a* and salinity contribution to the formation of density inversion in % – *b*. The ellipses indicate the areas of the most frequent development of deep convection in the Greenland Sea. Only the cells where the number of profiles with inversions exceeding 5, were used

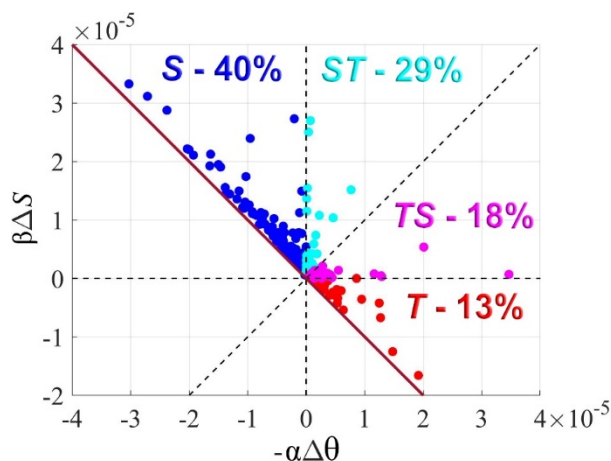
Численно вклад солёности (RS) в формирование плотностной инверсии определялся из соотношения

$$RS = \frac{\beta\Delta S}{(-\alpha\Delta\theta + \beta\Delta S)} 100\%. \quad (2)$$

Осреднение на регулярной сетке (рис. 5, *b*) показывает, что профили с преимущественно солённым вкладом доминируют практически во всей исследуемой акватории.

На диаграмме рассеяния (рис. 6) показана связь между вкладом солёности и температуры в плотностные инверсии. Значения параметров, находящиеся ниже и левее красной прямой $\beta\Delta S = \alpha\Delta\theta$, соответствуют стабильному вертикальному профилю плотности, а выше и справа находится область дестабилизации профилей плотности по одному из параметров или сразу по обоим. Положительные значения $\beta\Delta S$ и отрицательные $-\alpha\Delta\theta$ описывают дестабилизацию по солёности и стабилизацию по температуре – это солёностные инверсии; положительные $-\alpha\Delta\theta$ и отрицательные $\beta\Delta S$ – это термические инверсии; положительные $-\alpha\Delta\theta$ и $\beta\Delta S$ – смешанные инверсии, которые образуются за

счет дестабилизации как по температуре, так и по солености. Последние можно разделить на инверсии, в которых вклад солености превышает вклад по температуре и наоборот.



Р и с. 6. Диаграмма рассеяния термической и соленостной составляющих уравнения состояния морской воды в плотностных инверсиях. Синим цветом обозначены соленостные инверсии – *S* (теплые и соленые поверхностные воды), голубым – смешанные термические и соленостные с преобладанием дестабилизации по солености – *ST*, розовым – смешанные термические и соленостные с преобладанием дестабилизации по температуре – *TS* (холодные и соленые поверхностные воды), красным – термические инверсии – *T* (холодные и распресненные поверхностные воды)

F i g. 6. Scatterplot of thermal and haline components in the equation of seawater state in the density inversions. Haline inversions are indicated in blue – *S* (warm and saline surface waters), cyan indicates the mixed thermal and haline inversions with a predominance of haline destabilization – *ST*, magenta – the mixed thermal and haline inversions with a predominance of thermal destabilization – *TS* (cold and saline surface waters), and red – the thermal ones – *T* (cold and freshened surface water)

Число чисто соленостных инверсий составляет 40% от общего числа профилей, чисто термических 13%. Смешанных инверсий с преобладанием соленостной дестабилизации 29%, а с преобладанием термической дестабилизации 18%. Преобладание соленостной дестабилизации профилей согласуется с результатами работы [9], где утверждается, что соленость воды играет ведущую роль в межгодовой изменчивости плотности верхнего слоя Гренландского моря.

Выводы

Считается, что в океане инверсии плотности не проявляются в наблюдениях, потому что столб воды практически мгновенно перемешивается. Такая схема реализуется и в подавляющем большинстве гидродинамических моделей. Однако приводимые здесь данные наблюдений показывают, что в океане плотностные инверсии существуют и регулярно фиксируются приборами. Исследование инверсий позволяет охарактеризовать условия, которые предшествуют конвекции, и строить гипотезы об основных механизмах, приводящих

к конвективному перемешиванию, в том числе к развитию глубокой конвекции.

В нашей работе проводилось исследование инверсий в Гренландском море, которые разделялись на преимущественно термические и преимущественно соленостные.

В годы с более интенсивной глубокой конвекцией (2008, 2011, 2013) вертикальное развитие инверсий достигает глубин ~ 400 м. В эти годы средняя величина скачка плотности в инверсиях сравнительно небольшая, в отличие от 1993–1998 гг., когда мощности инверсий были невелики, но скачок плотности в них был наибольшим. Мы связываем это с зависимостью запаса потенциальной энергии, доступной для конвективного перемешивания, от вертикальной мощности инверсии.

При довольно равномерном распределении профилей с инверсиями по акватории было обнаружено явное доминирование преимущественно соленостных инверсий (почти 2/3 от их общего количества), причем 40% формировались исключительно за счет более высокой солености у поверхности моря и только 13% – исключительно за счет более низкой температуры у поверхности моря по сравнению с более глубокими слоями. Также было установлено, что роль соленостных аномалий верхнего слоя океана в формировании плотностных инверсий была больше в 2010-х гг. по сравнению с серединой 1990-х гг. Относительную роль различных физических механизмов формирования инверсий в верхнем слое Гренландского моря еще предстоит установить.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Broecker W. S. The Great Ocean Conveyor // *Oceanography*. 1991. Vol. 4, iss. 2. P. 79–89. doi:10.5670/oceanog.1991.07
2. Is the Thermohaline Circulation Changing? / M. Latif [et al.] // *Journal of Climate*. 2006. Vol. 19, iss. 18. P. 4631–4637. <https://doi.org/10.1175/JCLI3876.1>
3. Фалина А. С., Сарафанов А. А. О формировании нижнего звена меридиональной термохалинной циркуляции вод Северной Атлантики // *Доклады Академии наук*. 2015. Т. 461, № 6. С. 710–714. doi:10.7868/S0869565215120178
4. A sea change in our view of overturning in the subpolar North Atlantic / M. S. Loizer [et al.] // *Science*. 2019. Vol. 363, iss. 6426. P. 516–521. doi:10.1126/science.aau6592
5. Аверьянова Е. А., Полонский А. Б. Резкие климатические изменения в прошлом и их связь с режимами меридиональной циркуляции в Атлантическом океане // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. Т. 1. С. 20–53. doi:10.21513/2410-8758-2017-1-20-53
6. Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике / Г. В. Алексеев [и др.] // *Лед и снег*. 2017. Т. 57, № 3. С. 381–390. doi:10.15356/2076-6734-2017-3-381-390
7. Кузнецова Д. А., Башмачников И. Л. О механизмах изменчивости Атлантической меридиональной океанической циркуляции (АМОЦ) // *Океанология*. 2021. Т. 61, № 6. С. 843–855. doi:10.31857/S0030157421060071
8. Chu P. C. Geophysics of Deep Convection and Deep Water Formation in Oceans // *Deep Convection and Deep Water Formation in the Oceans* / Eds. P. C. Chu, J. C. Gascard. Elsevier, 1991. P. 3–16. (Elsevier Oceanography Series ; vol. 57). [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70057-6](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70057-6)
9. Mechanisms of interannual variability of deep convection in the Greenland Sea / I. L. Bashmachnikov [et al.] // *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2021. Vol. 174. 103557. P. 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2021.103557>

10. *Алексеев Г. В., Богородский П. В., Нагурный А. П.* Структура термохалинных полей в районе циклонической циркуляции и поднятия донных вод Гренландского моря // Структура и изменчивость крупномасштабных океанологических процессов и полей в Норвежской энергоактивной зоне / Под ред. Ю. В. Николаева, Г. В. Алексеева. Л. : Гидрометеоздат, 1989. С. 37–43.
11. *Killworth P. D.* Deep convection in the World Ocean // *Reviews of Geophysics*. 1983. Vol. 21, iss. 1. P. 1–26. <https://doi.org/10.1029/RG021i001p00001>
12. *Marshall J., Schott F.* Open-ocean convection: Observations, theory, and models // *Reviews of Geophysics*. 1999. Vol. 37, iss. 1. P. 1–64. <https://doi.org/10.1029/98RG02739>
13. The multi-year development of long-lived convective chimneys in the Greenland Sea / P. Wadhams [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2004. Vol. 31, iss. 6. L06306. <https://doi.org/10.1029/2003GL019017>
14. 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 [и др.] // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16, № 1. С. 191–201. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-191-201>
15. *Hofmann Z., von Appen W.-J., Wekerle C.* Seasonal and Mesoscale Variability of the Two Atlantic Water Recirculation Pathways in Fram Strait // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2021. Vol. 126, iss. 17. e2021JC017057. <https://doi.org/10.1029/2020JC017057>
16. *Good S. A., Martin M. J., Rayner N. A.* EN4: Quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013. Vol. 118, iss. 12. P. 6704–6716. <https://doi.org/10.1002/2013JC009067>
17. *Федоров А. М., Башмачников И. Л., Белоненко Т. В.* Локализация областей глубокой конвекции в морях Северо-Европейского бассейна, Лабрадор и Ирмингера // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. 2018. Т. 63, № 3. С. 345–362. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.306>
18. 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 [и др.] // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15, № 7. С. 184–194. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-7-184-194>

Об авторах:

Каледина Анастасия Сергеевна, лаборант-исследователь, кафедра океанологии, СПбГУ (199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9), **ORCID ID: 0000-0002-0778-2602**, **SPIN-код: 4147-3947**, a.kaledina@spbu.ru

Башмачников Игорь Львович, доцент, кафедра океанологии, СПбГУ (199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9), кандидат географических наук; директор, Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена (199034, Россия, г. Санкт-Петербург, 14-я линия Васильевского острова, д. 7), **ORCID ID: 0000-0002-1257-4197**, **WoS ResearcherID: B-2879-2012**, **Scopus Author ID: 8295005100**, i.bashmachnikov@spbu.ru