

Санкт-Петербургский государственный университет

**ФЕДОРОВ Александр Михайлович**

**Выпускная квалификационная работа**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛУБОКОЙ КОНВЕКЦИИ В СУБАРКТИЧЕСКОЙ  
АТЛАНТИКЕ**

Основная образовательная программа бакалавриата

«Гидрометеорология»

Профиль «Океанология»

Научный руководитель: д.г.н.

профессор БЕЛОНЕНКО Татьяна Васильевна

Рецензент: к.г.н.

доцент ГОРДЕЕВА Светлана Михайловна

Санкт-Петербург

2018

## **ОГЛАВЛЕНИЕ**

<b>1. ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>3</b>
<b>2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДУЕМОГО РАЙОНА.....</b>	<b>10</b>
<b>3. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ .....</b>	<b>12</b>
3.1 Альтиметрические данные .....	12
3.2 Данные GRACE .....	13
3.3 EN4.....	14
<b>4. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛУБОКОЙ КОНВЕКЦИИ В МОРЯХ ИРМИНГЕРА И ЛАБРАДОР .....</b>	<b>16</b>
4.1. Временная изменчивость глубины перемешанного слоя.....	16
4.2. Локализация областей глубокой конвекции по данным массива EN4 ...	19
4.3. Идентификация положения очагов конвекции по комбинированным спутниковым данным GRACE и альтиметрии.....	22
<b>5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>30</b>
<b>ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ФЕДОРОВА А.М. ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....</b>	<b>31</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ.....</b>	<b>34</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>37</b>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Циркуляция вод Мирового океана представлена не только поверхностными течениями, но и промежуточными и придонными. Глобальная циркуляция Мирового океана основана на перемещении соли и тепла, содержащихся в толще океана – термохалинной циркуляции, связанной с неравномерностью распределения этих характеристик в Мировом океане (Broecker, 1991). Основным звеном глобальной циркуляции Мирового океана является Меридиональная термохалинная циркуляция (МТЦ) Атлантического океана. МТЦ способствует перемещению вод из поверхностного деятельного слоя океана в промежуточные и глубинные слои и выступает основным механизмом транспорта тепла, пресной воды и углерода между океанскими бассейнами. Климатические модели показывают, что прошлые изменения в силе МТЦ были связаны с историческими вариациями климата. Дальнейшие исследования показывают, что МТЦ оказывает непосредственное воздействие на климат на временных масштабах, начиная с десятилетий до столетий (Latif et al., 2006). Глубокая конвекция является ключевым процессом, определяющим интенсивность МТЦ (Pérez et al., 2013). МТЦ в Атлантическом океане образуется при условии наличия областей масштабного опускания плотных, обогащённых кислородом поверхностных вод в придонные слои. Наиболее значимыми областями масштабного опускания вод в Атлантическом океане выступают моря Гренландское, Лабрадорское и Ирмингера на севере, и на юге область взаимодействия Антарктического Циркумполярного течения с водами Атлантического бассейна. Мониторинг и понимание изменчивости объемов и свойств водных масс, участвующих в процессах глубокой конвекции, необходим для более точного моделирования и прогнозирования будущих климатических изменений, что также позволило бы лучше оценить связь между глубокой конвекцией и интенсивностью Меридиональной термохалинной циркуляции в средних (Cunningham, 2007) и субполярных широтах (Mercier et al., 2015).

Что же такое процессы глубокой конвекции? Эти процессы происходят в зимний период благодаря сильному охлаждению поверхностных вод бассейна

вследствие переноса холодных воздушных масс с территории Канады по направлению к Гренландии. Когда плотность поверхностных вод становится больше плотности нижележащих слоев, происходит конвективное перемешивание, в результате которого образуется слабо стратифицированная холодная, богатая кислородом и менее соленая по сравнению с окружающими водами водная масса. Таким образом, главной причиной глубокой конвекции является отрицательный поток плавучести в верхних слоях океана, обусловленный интенсивной отдачей тепла из океана в атмосферу (Piron et al., 2017).

Для развития глубокой конвекции в океане необходимо, помимо наличия соответствующего атмосферного форсинга, также ослабление стратификации вод ниже сезонного термоклина (Marshall, Schott, 1999). Ослабленная стратификация может быть, как причиной, так и следствием предшествующих глубокой конвекции процессов (Зеленько, Реснянский, 2007).

В условиях меняющегося климата, необходимо определить факторы, которые являются индикаторами этих изменений. Мировой океан перераспределяет поступающую на поверхность Земли солнечную радиацию посредством переноса поверхностной циркуляцией вод. В последние годы достаточно успешно развиваются наблюдения за изменчивостью поверхностных течений, что частично связано с быстрым развитием дистанционных способов получения информации. Это позволяет учитывать вклад циркуляции в глобальные изменения современного климата. Однако, помимо поверхностных течений, не менее важную роль в распределении тепла играет и глубинная циркуляция. Изменчивость интенсивности процессов глубокой конвекции служит важным фактором для наблюдений за климатическими изменениями в северной части Атлантического океана, а также для территорий, находящихся под значительным влиянием воздушных масс, формирующихся на данной акватории – Европы и Северной Америки.

Отслеживать положение потока глубинных вод, а также мест погружения глубинных вод до последнего времени являлось очень сложной задачей, так как проведение контактных наблюдений в субполярных областях обусловлено большими затратами, особенно в зимний период, к тому же рассматриваемые в настоящей квалификационной работе моря Ирмингера и Лабрадорское не относятся к наиболее загруженным путям перемещения транспортных и торговых судов, что сужает спектр источников контактных измерений даже на поверхности. За все время инструментальных наблюдений наиболее полный ряд данных был получен только для последнего двадцатилетнего промежутка. Спутниковые данные, при помощи которых можно вести мониторинг положения областей конвекции и частоту проявления событий конвекции, также представлены весьма непродолжительным временным рядом: например, альтиметрические данные представлены с конца 1992 года, а гравиметрические данные – с середины 2002. Также хотелось бы отметить, что при помощи спутниковой информации не представляется возможным оценить глубину опускания вод при конвекции.

В настоящей выпускной квалификационной работе решаются следующие **задачи:**

- 1) Определение максимальных глубин конвекции в морях Лабрадор и Ирмингера, анализ внутригодовой и межгодовой изменчивости интенсивности конвективных процессов по данным контактных измерений
- 2) Анализ полученного пространственного распределения областей конвекции в морях Ирмингера и Лабрадор по данным контактных измерений, включающий в себя уточнение границ по сравнению с результатами предыдущих исследований на эту тему
- 3) Определение положения очагов глубокой конвекции по полям аномалий стericеских колебаний уровня Мирового океана

(полученным по спутниковым альтиметрическим и гравиметрическим данным)

- 4) Анализ межгодовой изменчивости глубокой конвекции на основе аномалий стерических колебаний

Решение указанных задач необходимо для достижения **цели данной выпускной квалификационной работы**: Описание межгодовой и внутригодовой изменчивости глубокой конвекции, определение местоположения очагов конвекции по данным контактных и спутниковых измерений.

Положение очагов конвекции в Северной Атлантике и Северо-Европейском бассейне Северного Ледовитого океана варьируется от года к году, но все-таки имеет определенную локализацию. В Лабрадорском море по различным оценкам расположение области глубокой конвекции соответствует области «Л» на рисунке 1 (Marshall and Schott, 1999; Lavender et al., 2002). В частности, Marshall and Schott (1999) по данным измерений судна погоды Bravo и Lavender et al. (2002), основываясь на данных более чем 200 буев нейтральной плавучести за 1996-1998 годы, указывают на восточную часть выделенной области, как области глубокой конвекции. Исследовательская группа (Lab Sea Group, 1998) также указывает восточную часть выделенной области. Показанный на рисунке 1 район выделяется по данным буев АРГО с 2000 по 2007 гг. (Våge et al., 2009).

В море Ирмингера область глубокой конвекции не так обширна (рис.1), и конвекция достигает меньших глубин (Гладышев и др., 2016). Область глубокой конвекции «И» была выделена по данным наблюдений максимальной глубины перемешивания в зимний период (Våge et al., 2009; Centurioni and Gould, 2004), а также по значениям потенциальной завихренности (de Jong et al., 2012, de Jong et al., 2016; Pickart et al., 2003b).

Расположение областей глубокой конвекции вблизи центральных областей циклонической циркуляции связано с подъемом изопикн и уменьшением

интегрального теплосодержания верхнего слоя океана в этих районах (Белоненко и др., 2018).

В этой работе под областями конвекции средней интенсивности мы будем подразумевать области, где глубина перемешанного слоя превышает 500 м, а глубокой конвекции – 1000 м. Критерии связаны с тем, что основной результат конвекции в районах исследования – это обновление водных масс (Морецкий, Попов, 1989; Yashayaev, 2007; de Jong et al., 2012; Jeansson et al., 2017). Если конвекция достигает 500 м, то обновляются промежуточная ирмингера и верхняя лабradorская водные массы, составляющие верхние фракции североатлантической глубинной водной массы, скорость движения которой на юг и характеризует интенсивность возвратного глубинного потока Атлантической МТЦ. Если же конвекция пробивает слой в 1000 м, то начинается обновление лабradorской (классической) водной массы – одной из основных (наряду с Гренландской) составляющих североатлантической глубинной водной массы.

Максимальные значения глубин перемешанного слоя в рассматриваемых морях отличаются значительной изменчивостью, и сильно варьируют от года к году. На глубину конвекции в море Лабрадор более 1000 метров указывается в работах (Lazier, 2002; Gelderloos et al., 2013; Yashayaev, 2007, Pickart et al., 2002; Holte et al. 2017, Yashayaev and Loder, 2009; Lilly, 1998; Yashayaev and Loder, 2016). Глубина перемешанного слоя в море Ирмингера редко превышает 1000 метров, чаще всего находясь в пределах 800 метров (Гладышев и др., 2016, de Jong et al., 2012; de Jong et al., 2016)

Первыми предложили использовать альтиметрические измерения для мониторинга глубокой конвекции в океане Herrmann et al. (2009). Их исследование для Средиземного моря, опирающееся на предположение, что спутниковая альтиметрия может успешно использоваться для обнаружения глубокой конвекции, обусловленной вертикальными потоками тяжелых соленых вод на глубину, и грубо указывать ее местоположение, использует некое

модельное прогностическое соотношение для нахождения линейной связи между глубокой конвекцией и локальными аномалиями уровня океана.

В дальнейшем гипотеза о возможности определения районов глубокой конвекции при помощи альтиметров рассматривалась другими исследователями, которые опираются на следующий физический механизм: столбы жидкости во время конвекции становятся тяжелее за счет увеличения плотности водяного столба, из-за чего уровень моря уменьшается. Так как изменение массы воды очень мало, то увеличение плотности в основном влияет на уменьшение объема, и при наличии только свободной границы на поверхности уменьшение объема приводит к уменьшению высоты поверхности моря, которое и можно обнаружить по данным альтиметрии.

Стерические колебания уровня океана происходят из-за вертикального расширения или сжатия морской воды, связанного с изменением её плотности  $\rho$  или удельного объема  $\alpha$  без изменения массы воды. Существуют различные подходы к оценке стерических колебаний уровня (Белоненко, Колдунов, 2006). Функция, описывающая изменения динамической высоты, определяющие стерические колебания, может рассматриваться как разложение в ряд Тейлора удельного объема  $\alpha(T, S, P)$  по малым отклонениям температуры, солёности и давления:  $T, S, P$  от средних  $\bar{T}, \bar{S}, \bar{P}$  (Провоторов, 2003):

$$\alpha(T, S, P) = \alpha(\bar{T}, \bar{S}, \bar{P}) + \left( \frac{\partial \alpha}{\partial T} \right)_{TSP} \Delta T + \left( \frac{\partial \alpha}{\partial S} \right)_{TSP} \Delta S + \left( \frac{\partial \alpha}{\partial P} \right)_{TSP} \Delta P + \dots$$

В предположении несжимаемости воды колебания удельного объема, характеризующие стерические колебания, постепенно затухая с глубиной, охватывая всю толщу, нижняя граница которой соответствует глубине залегания нулевой динамической поверхности, обусловлены, главным образом, изменчивостью температуры и в меньшей степени солёности деятельного слоя океана:



$$\alpha(T, S, P) - \alpha(\bar{T}, \bar{S}, \bar{P}) = \left( \frac{\partial \alpha}{\partial T} \right)_{TSP} \Delta T + \left( \frac{\partial \alpha}{\partial S} \right)_{TSP} \Delta S .$$

Методика оценки стерических колебаний с использованием комбинированных спутниковых альтиметрических и гравиметрических измерений изложена в работах Chambers (2006), Lombard et al. (2007), García et al. (2007). Применение этого метода для акватории Баренцева моря представлено в работе (Volkov et al., 2013).

Косвенным подтверждением этой гипотезы являются исследования Hakkinen и Rhines (2004, 2009), в которых ослабление Субполярного круговорота, напрямую связанное с уменьшением процессов глубокой конвекции, наблюдающееся в последние десятилетия (Зеленько, Реснянский, 2007; Белоненко и др., 2018; Федоров и др., 2017а,б,в), определяется повышением уровня в центре круговорота. Циркуляция в этих районах, как правило, является циклонической. Это приводит к изопикническому куполу, частично обнажающемуся в центре круговорота, ослаблению стратификации и уменьшению термоклина (Зеленько, Реснянский, 2007; de Jong et al., 2012). В Северной Атлантике наиболее известными районами конвекции являются Лабрадорское море и море Ирмингера, где происходит обновление Лабрадорской водной массы (Hakkinen, Rhines, 2004; Falina, 2007; de Jong et al., 2012; Гладышев и др., 2016), хотя глубокое конвективное перемешивание (выходящее за пределы сезонного термоклина) не происходит каждый год в этих местах. Gelderloos et al. (2013), анализируя по альтиметрическим данным уровень в море Лабрадора для зимних месяцев и сравнив спутниковые данные с имеющимися измерениями глубины перемешанного слоя, а также с данными разреза AR7W (Yashayaev and Loder, 2009), Gelderloos et al. (2013), получили подтверждение этой гипотезы для 1994, 1995, 2000 и 2008. Исключение составляет 2006 г., который также по их оценкам ошибочно идентифицировался как год глубокой зимней конвекции, что не подтверждается другими данными.

## **2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДУЕМОГО РАЙОНА**

Лабрадорское, Ирмингера моря омывают о. Гренландия с юга и востока (рис.1). Границы Лабрадорского моря выделяются достаточно просто: с запада оно ограничено Северной Америкой, в частности полуостровом Лабрадор, а также островом Ньюфаундленд, с востока расположен остров Гренландия. На севере Лабрадорское море соединяется с морем Баффина Девисовым проливом шириной 300-950 километров. Глубины Девисова пролива достигают нескольких тысяч метров. Южная граница выделяется не так явно, однако ей может выступать линия, соединяющая южную оконечность Гренландии и остров Ньюфаундленд. Через южную границу происходит свободный водообмен с открытым океаном, а также с морем Ирмингера. Котловина Лабрадорского моря не разделена подводными хребтами и глубины в море равномерно увеличиваются при продвижении от берегов к центральной части моря и к южной границе. Максимальная глубина более 4000 метров, а средняя – 1900.

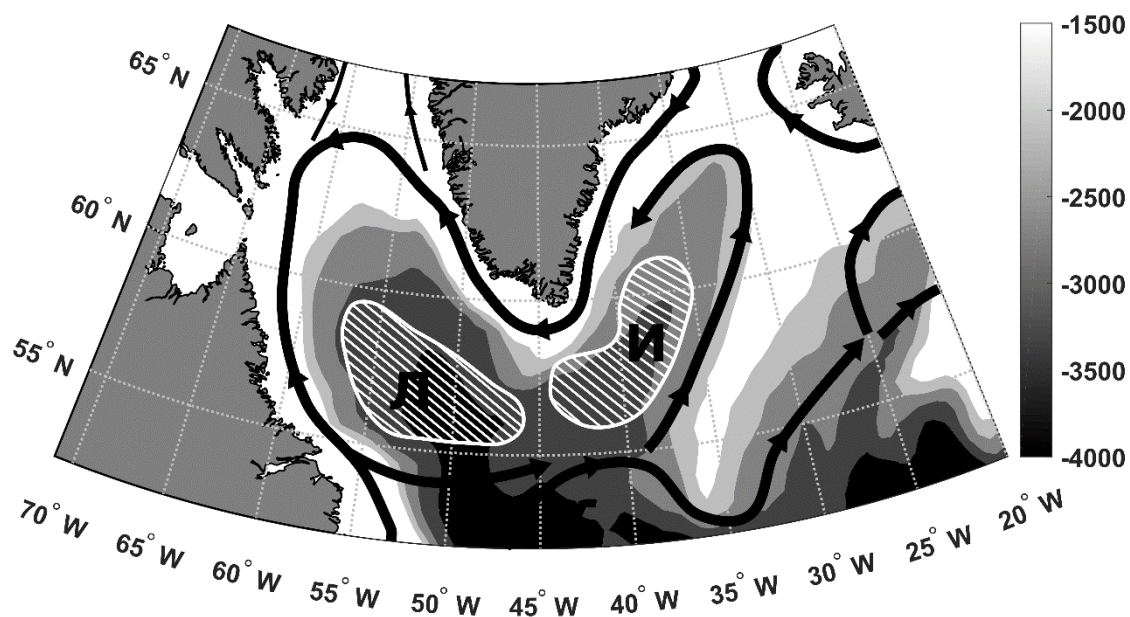
Море Ирмингера в свою очередь омывает Гренландию с запада, а на востоке его ограничивает океанический хребет Рейкьянес. Также на северо-востоке расположен остров Исландия, Между Исландией и Гренландией находится Датский пролив соединяющий Гренландское море и море Ирмингера. Датский пролив имеет ширину около 260 километров со средними глубинами 200-300 метров. На дне пролива находится самый большой из ныне известных подводных водопадов. Он перемещает воды с глубины 600 на глубину 4000 метров. Глубины, как и в море Лабрадор, равномерно увеличиваются от периферии к центру. Средние глубины около 1500 метров с максимумами более 3000 метров.

В Лабрадорском море сформирована циклоническая поверхностная циркуляция (рис.1), На востоке вдоль побережья Гренландии расположено теплое Западное-Гренландское течение со средними скоростями более 50 см/с.

На западе моря расположено холодное Лабрадорское течение, которое охватывает всю толщу вод с поверхности до дна, траектория перемещения вод ограничена относительно неглубокой (около 500 м.) материковой отмелью. Само течение выходит из Девисова пролива со средними скоростями не более 10 см/с. Максимальных скоростей около 40 см/с течение достигает уже после встречи с Западным-Гренландским на широте  $55^{\circ}$  с.ш. Лабрадорское течение состоит из отдельных потоков, никогда полностью не трансформирующихся в единую водную массу. Две основные строжневые струи Лабрадорского течения (Yashayaev and Loder, 2009) идут с различной скоростью вплоть до зоны конвергенции с Северо-Атлантическим течением (около  $42^{\circ}$ с.ш.,  $50^{\circ}$ з.д.), непосредственно к юго-западу от Ньюфаундленда, образуя северо-западный круговорот атлантической циркуляции.

Для моря Ирмингера также характерна циклоническая циркуляция (рис.1). С юго-востока вдоль хребта Рейкьянес расположено теплое течение Ирмингера, являющееся ответвлением Северного-Атлантического течения. Средние скорости не более 15 см/с. У побережья Гренландии проходит Восточное-Гренландское течение, которое выходит из Гренландского моря через Датский пролив со средними скоростями от 20 до 35 см/с.

Образование циклонической циркуляции в рассматриваемых морях связано с направлением действия силы Кориолиса в северном полушарии, которая отклоняет водяной поток вправо от направления движения. Таким образом, распространение вод вдоль естественного предела, будь то берег или подводный хребет, происходит именно из-за воздействия этой силы. Исходя из описанного механизма можно объяснить поворот Гренландского течения на южной оконечности Гренландии (Западное-Гренландское течение является продолжением Восточного-Гренландского).



*Рисунок 1 Район исследования, батиметрия и схема течений рассматриваемого региона (глубины менее 1500 метров не показаны). Заштрихованные области охватывают районы глубокой конвекции по обзору литературных источников: Л – в море Лабрадор, И – в море Ирмингера.*

### 3. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

#### 3.1. Альтиметрические данные

В работе использовались данные спутниковой альтиметрии архива AVISO (Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic data), расположенный в открытом доступе на сайте AVISO<sup>1</sup>. Измерения уровня океана за период 1993-2015 гг. представлены массивом абсолютной динамической топографии в точках сетки с пространственным разрешением 0,25° широты и

<sup>1</sup> <http://www.aviso.altimetry.fr/en/data.html>

долготы и временной дискретностью 7 суток, для расчета которых используются комбинированные данные нескольких альтиметров.

### 3.2. Данные GRACE

Спутники GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) проводят измерения аномалий гравитационного поля Земли, начиная с марта 2002 года; данные доступны на сайте Jet Propulsion Laboratory<sup>2</sup>. Использовался продукт Level-3 CSR (Center for Space Research at University of Texas) – среднемесячные значения гравитационных аномалий на регулярной сетке  $1^\circ \times 1^\circ$  за период 2003-2015 гг. Данные, в которых учтена поправка на «закон обратного барометра», представляют высоту столба жидкости в сантиметрах. Ряд данных имеет некоторые пропуски, связанные с различными причинами технического характера; подробная информация о пропущенных днях за весь период наблюдений представлена на официальном портале миссии GRACE<sup>3</sup>.

Так как альтиметрические и гравиметрические данные имеют разную пространственно-временную дискретность, на первом этапе посредством осреднения проводилось приведение данных к единой сетке – к дискретности массива GRACE. Поскольку значительный вклад в изменчивость уровня моря вносят сезонные колебания, из исходных массивов исключался сезонный ход. На втором этапе данные центрировались, и в дальнейшем анализировались их аномалии, а также аномалии без сезонной составляющей, которая вычиталась на первом этапе. Стерические колебания оценивались как разность аномалий альтиметрических и гравиметрических измерений. Для двух акваторий – моря Лабрадор и Ирмингера для каждого месяца 2003-2015 гг. построены карты пространственного распределения стерических колебаний с учетом и без учета сезонного хода.

---

<sup>2</sup> [ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/tellus/L3/ocean\\_mass/RL05](ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/tellus/L3/ocean_mass/RL05)

<sup>3</sup> <ftp://podaac.jpl.nasa.gov/allData/tellus/L3/docs/GraceMonths.html>

### 3.3. EN4

Для расчета глубины верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) в работе использовался массив натуральных измерений EN4<sup>4</sup>. Массив составлен на основе нескольких баз вертикальных профилей температуры и солёности, включая наиболее часто используемый массив World Ocean Database (WOD). Профили температуры и солёности массива EN4, проходят предварительный контроль для удаления недостоверных профилей и профилей-дублеров (Good et al., 2013). В работе рассматривается временной период 1950-2015 годов. Использовались только профили, достигающие глубины 1000 м и более.

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

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

где  $T_h = (T_r - 0,1)$  – температура воды на горизонте  $h$ . Верхний горизонт, на котором разность плотностей с реперным горизонтом превышала  $\Delta\sigma$ , считается глубиной ВКС.

---

<sup>4</sup> <http://hadobs.metoffice.com/en4/download-en4-0-2.html>

В методе Духовского (2017) нет заранее заданного критерия разности плотностей, а за глубину ВКС принимается глубина  $h$ , на которой значения локального градиента потенциальной плотности  $\left| \frac{d\sigma}{dz} \right|$  (здесь  $z$  – глубина) превышают  $n$  среднеквадратических отклонений градиента потенциальной плотности в слое глубин  $\pm 100$  м от глубины  $h$ :  $[(h-100), (h+100)]$ .

При наличии участков неустойчивой стратификации предварительно производилось искусственное перемешивание профилей плотности с целью выравнивания неустойчивостей, а мелкомасштабный шум в профилях плотности фильтровался методом скользящего среднего с шириной окна 10 м.

Так как оба метода определения глубины ВКС являются эмпирическими, для контроля корректности работы алгоритмов производился визуальный анализ результатов автоматического определения глубины ВКС. Для метода Kara et al. (2003) наилучшие результаты были получены при  $a=0.1^\circ\text{C}$ ; для метода Духовского (2017) наилучшие результаты были получены при  $n=2$  среднеквадратических отклонения. Для большинства профилей оба метода показали примерно одинаковые глубины ВКС, но в условиях слабого заглубленного скачка плотности метод Духовского (2017) позволял более точно определять эту глубину. Таким образом, метод Духовского (2017) был принят как основной для последующей работы с данными. Глубина конвекции определяется как максимальная глубина ВКС.

## **4. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛУБОКОЙ КОНВЕКЦИИ В МОРЯХ ИРМИНГЕРА И ЛАБРАДОР**

### **4.1. Временная изменчивость глубины верхнего квазиоднородного слоя (ВКС)**

Расчет мощности ВКС производился для определения характерных лет, в которые происходила глубокая конвекция большой интенсивности (1000 и более метров). Рисунок 2 показывает рассчитанные двумя способами Kara et al. (2003) (красным) и Духовской (2017) (синим) максимальную глубину ВКС в морях Лабрадор (а) и Ирмингера (б) для временного периода, доступного в массиве EN4. В целом по графикам видно, что значения полученные методом Духовского показывают более стабильные результаты в особенности в годы с малым количеством измерений (Рис 2в). Таким образом, в дальнейшем все упомянутые в работе значения максимальных глубин ВКС являются значениями полученными по методу Духовского.

Полученное распределение максимальных значений глубин ВКС позволяет оценить интенсивность конвективных процессов в рассматриваемых морях. Хорошо видно усиление конвекции в период 2000-2004 годов, а также в 2010-2015 годах. По результатам работы Yashayaev and Clarke (2008) в 2000 году отмечалось последнее образование промежуточной лабradorской водной массы. Глубина ВКС в море Ирмингера возрастает в последние годы – 2010-2015.

Исходя из поставленных в настоящей ВКР задач, наибольший интерес представляет временной промежуток соответствующий периоду используемых спутниковых измерений – 2003-2015 годы. Также в этот период было произведено максимальное количество контактных измерений (рис. 2в) как в море Лабрадор (синим), так и в море Ирмингера (красным). Таким образом, для репрезентативного периода рассчитанные максимальные глубины ВКС отличаются наибольшей достоверностью.



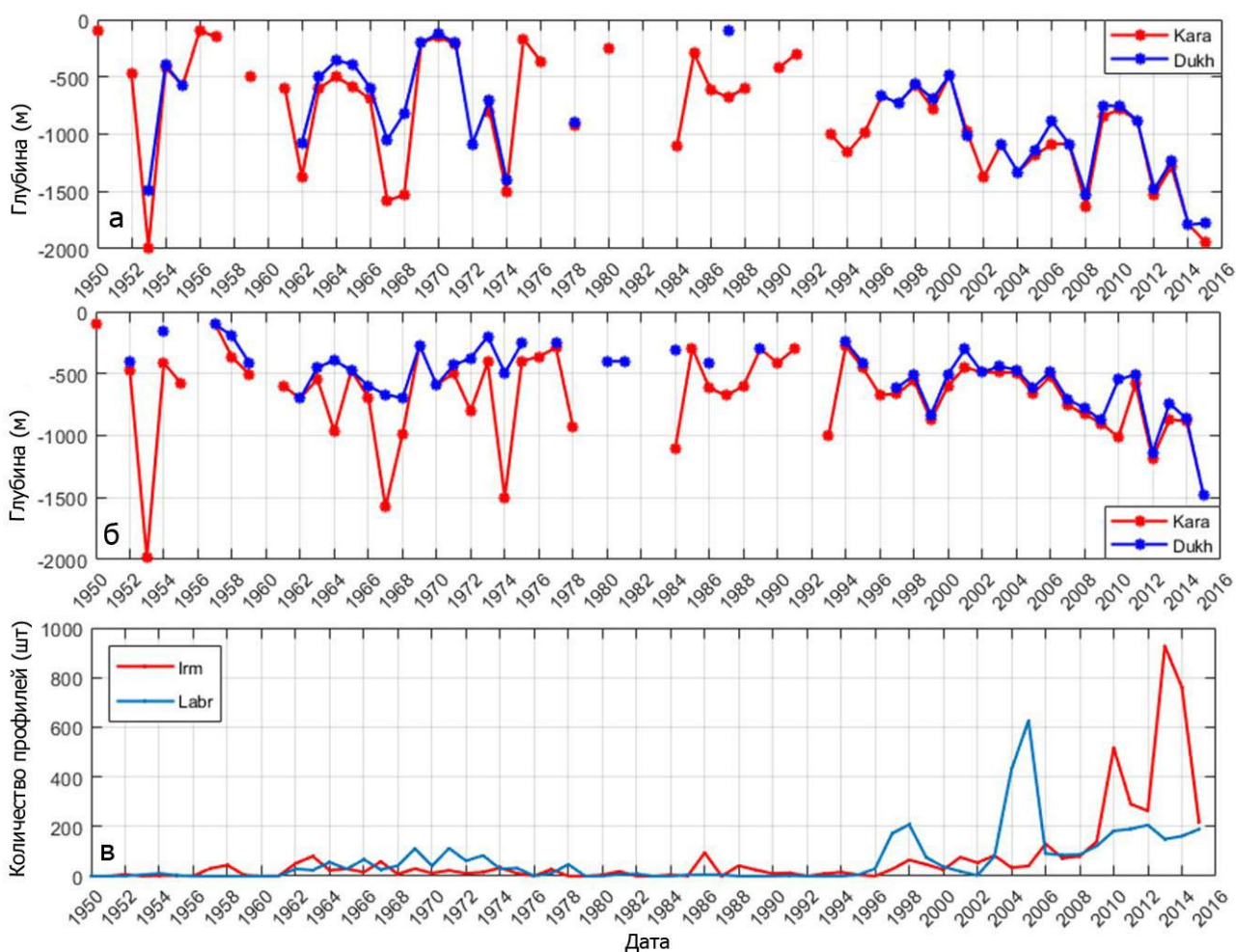


Рисунок 2 а, б – Временная изменчивость максимальных глубин ВКС, полученные по методу Духовского (2017) (синим) и методу Kara et al. (2003) (красным).

в – Общее количество профилей в море Лабрадор (синим) и море Ирмингера (красным)

Выделим годы с наиболее интенсивной конвекцией. Для моря Лабрадор (рис 2а) это 2004, 2008, 2013, 2014, 2015 в эти годы отмечалась конвекция большой интенсивности в интервале 1300-2000 метров. В море Ирмингера (рис 2б) конвективные процессы менее интенсивны и достаточно редко глубина ВКС превышает 1000 метров, однако это происходило в 2012 и 2015 годах. Также значительные глубины ВКС наблюдались в 2008, 2009 годах. В целом, для рассматриваемого периода (2003-2015) конвективные процессы большой и средней интенсивности происходили практически одновременно (за исключением 2004 и 2009 годов), поэтому в дальнейшем анализ положения очагов конвекции по спутниковым данным будет проводиться синхронно для 2 морей.

За 66 лет наблюдений, максимальные за холодный сезон глубины ВКС чаще всего наблюдались в море Лабрадор – в марте (19 раз, рис. 3а), в море Ирмингера – в марте (11 раз, рис. 3б). Однако в отдельные годы максимальные значения ВКС могут фиксироваться и в другие месяцы – с декабря по май. Полагаясь на это факт, зимним сезоном было решено считать январь – апрель, как наиболее вероятный период для фиксирования конвекции максимальной интенсивности.

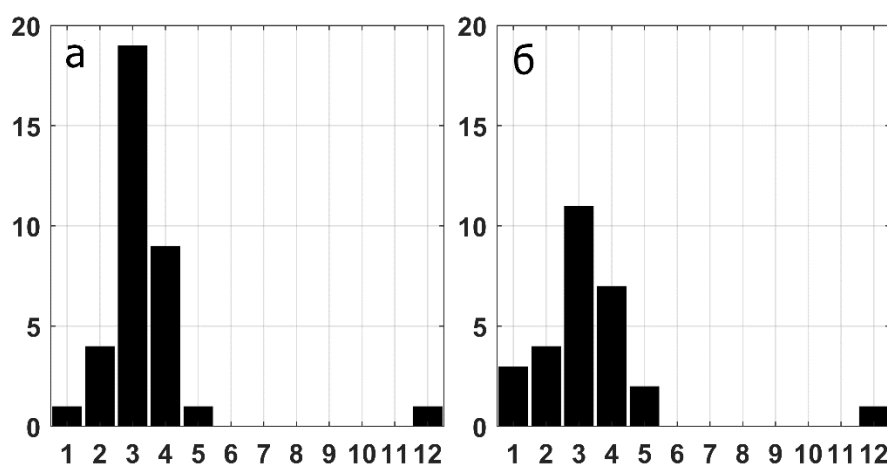


Рисунок 3 Распределение по месяцам числа максимальных глубин конвекции в морях, Лабрадор (а), Ирмингера (б)

Количество профилей с глубиной ВКС более 500 метров и более 1000 м (рис. 4) имеет схожую внутригодовую динамику, что и количество зафиксированных максимальных значений глубин ВКС в отдельные месяцы (рис. 3). Наибольшее количество профилей с ВКС, превышающих 500 метров, достигается в марте в обоих морях и составляет: 15% в море Лабрадор (рис. 4а) и 14% в море Ирмингера (рис. 4б). Наибольшее число профилей с глубиной ВКС более 1000 метров во всех трех морях за период 1950-2015 гг. наблюдается значительно реже и составляет: 5% в марте в море Лабрадор (рис. 4а) и 3% в марте в море Ирмингера (рис. 4б). Процент значений глубин ВКС более 500 и 1000 метров, лишний раз подтверждают выбор продолжительности зимнего периода для последующего анализа, как уже говорилось ранее конвективные процессы наибольшей интенсивности наблюдаются в январе-апреле.

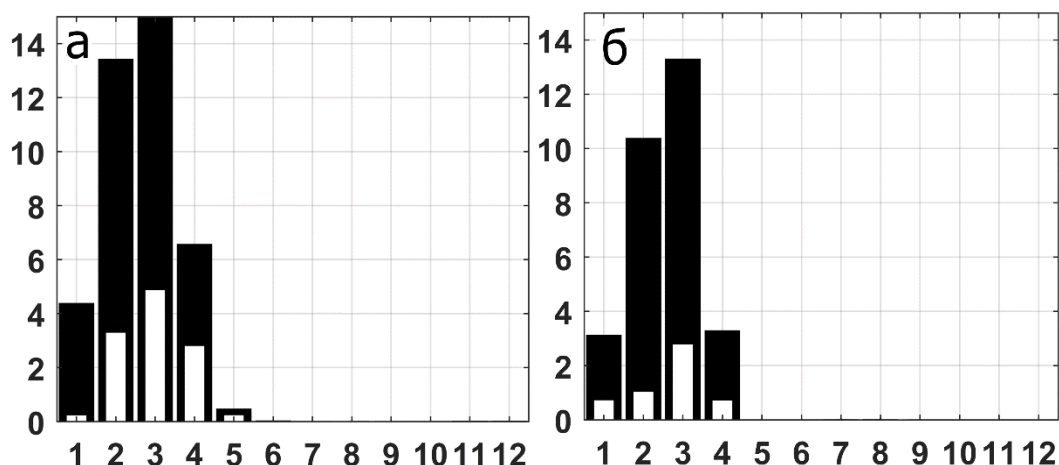


Рисунок 4 Количество профилей с глубиной ВКС более 500 м (черный цвет) в процентах к общему количеству профилей и с глубиной ВКС более 1000 м (белый) в процентах, к общему количеству профилей за период 1950-2015 в Лабрадорском (а) и Ирмингера (б) морях.

#### 4.2. Локализация областей глубокой конвекции по данным массива EN4

На рисунке 5 приведены пространственные распределения максимальной зафиксированной за весь период наблюдений в морях Ирмингера и Лабрадор глубины ВКС, сглаженные окном скользящего среднего со сторонами 25x25км. Глубины ВКС получены при использовании метода Духовской (2017) Положение областей наиболее глубокой конвекции (области зеленого и синего цвета), в целом, соответствует результатам других исследований (рис. 1). Полученные области с глубиной конвекции более 1000 м охватывают данные предыдущих наблюдений или модельных расчетов (Pickart et al., 2003a; Våge et al., 2009; de Jong et al., 2016; Holte et al., 2017). В море Лабрадор область конвекции с зафиксированными глубинами ВКС более 1500 м концентрируется в квадрате 57°с.ш. 55° з.д. Глубины конвекции более 1000 м (а в отдельных точках зафиксированы и глубины порядка 1500 м) охватывают всю область к югу от Гренландии от области максимальной конвекции в море Лабрадор до области ранее выделенной конвекции в море Ирмингера. Основная область находится между 56-59°с.ш. 50-57°з.д., сужаясь меридионально до 56-58 ° с.ш. на 40-50°

з.д., а в море Ирмингера поднимается до  $60^\circ$  с.ш. Данная область обеспечена наблюдениями недостаточно, в большинстве ячеек сетки количество профилей не превышает 10-20 (рис. 6в), но не менее 30% из них перемешиваются более чем на 500 метров (рис. 6а) и в некоторых точках до 10-15% выполненных профилей фиксируют глубину ВКС более 1000 м (рис. 6б). Море Лабрадор лучше обеспечено наблюдениями, здесь в большинстве точек более 25 измерений за весь период (рис. 6в). Практически в каждой точке выделенной области глубокой конвекции зафиксировано не менее 30% профилей с глубиной ВКС более 500 метров (рис. 6а). Глубины ВКС более 1000 м достигаются, в основном, в области, где отмечены максимальные глубины конвекции (около  $57.5^\circ$  с.ш.  $55^\circ$  з.д.), и охватывают 5-10% выполненных профилей.

В море Ирмингера наблюдений меньше, и только небольшое количество ячеек содержит более 5 профилей. В этом районе конвективные процессы менее интенсивны и редко превышают 1000 м (рис. 6б). Максимальная зафиксированная глубина ВКС наблюдается около  $59^\circ$  с.ш.  $40^\circ$  з.д. и составляет порядка 1000 м.

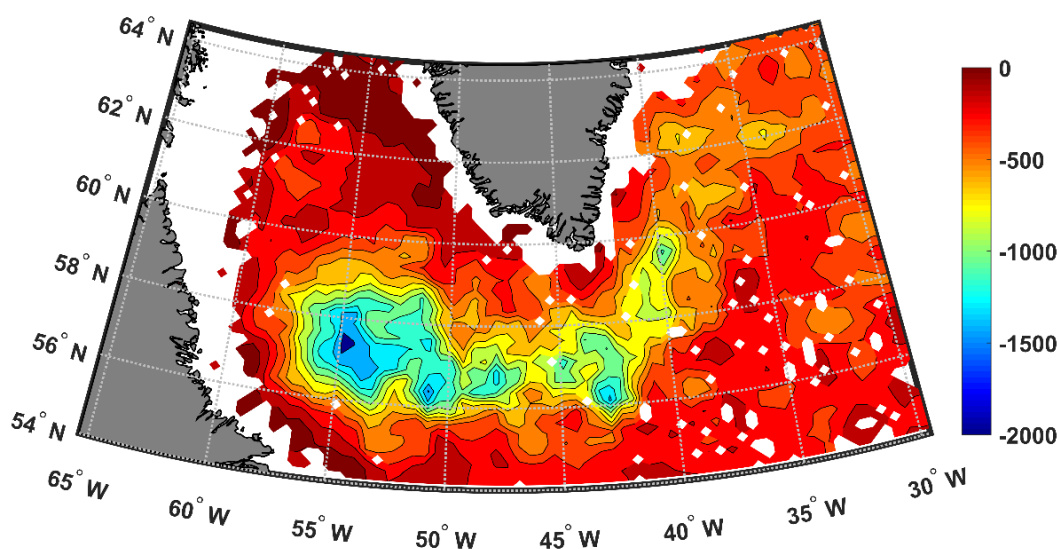


Рисунок 5 Пространственное распределение максимальной глубины ВКС в Лабрадорском и Ирмингера морях за 1993-2015. Разрешение 25x25 км.

В рассматриваемых морях распределение максимальных глубин ВКС представляет собой непрерывную область на южной периферии острова Гренландия, что не совсем соответствует общепринятым оценкам положения областей глубокой конвекции (рис. 1). Основываясь на полученных распределениях профилей с глубинами более 500 метров и 1000 метров (рис. 6 а, б), выделение такой области вполне обоснованно, так как достаточно интенсивная конвекция происходила в выделенной области неоднократно. Таким образом, с положением этой области будут сравниваться полученные поля распределения аномалий стericческих колебаний в разделе 4.3.

Полученное пространственное распределение позволяет рассматривать моря Ирмингера и Лабрадор как непрерывный регион образования плотных обогащенных кислородом водных масс, как говорилось ранее, интенсивная глубокая конвекция происходит в обоих морях также и в одни и те же промежутки времени. В большинстве последних публикаций район исследования рассматривается дискретно, то есть моря Лабрадор и Ирмингера выступают обособленными областями ГК. Результаты настоящей выпускной квалификационной работы относительно положения области максимальных значений ВКС позволяют рассматривать всю область (ограниченную на рисунке 5 изолинией желтого цвета -800 метров) южнее острова Гренландия как единый район интенсивной конвекции. Это результат является одним из наиболее значимых и позволяет объективно расширить предыдущие представления о локализации глубокой конвекции в морях Ирмингера и Лабрадор.

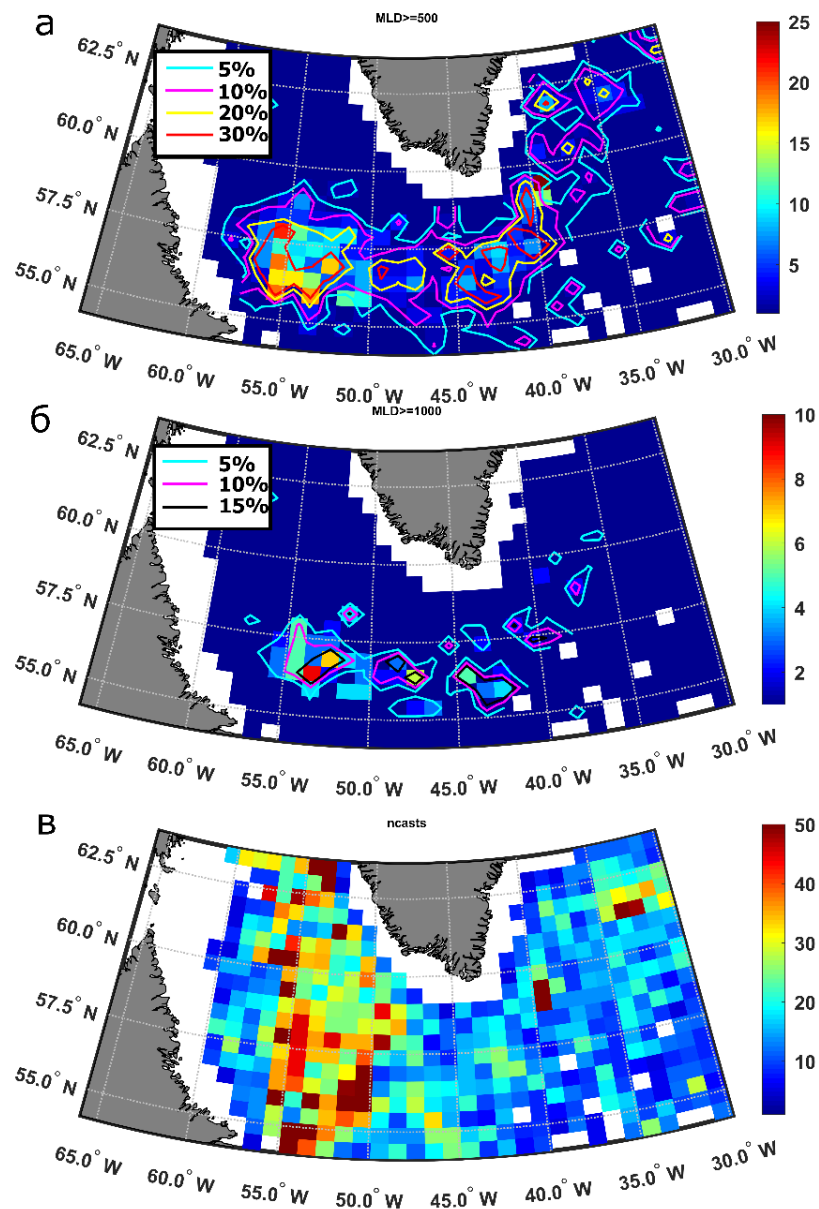


Рисунок 6 Распределение профилей в Лабрадорском и Ирмингера морях: а – с глубиной ВКС более 500 метров, б – с глубиной ВКС более 1000 метров, в – количество профилей за зимний сезон (1-4) 1950-2015. Разрешение 50 км в зональной и 60 км в меридиональной плоскостях. Изолинии на 5а и 5б показывают процент профилей с глубиной перемешивания более 500 и более 1000 метров относительно 5с.

#### 4.3. Идентификация положения очагов конвекции по комбинированным спутниковым данным GRACE и альтиметрии.

Уровень Мирового океана (УМО) является суммой двух составляющих:  
 $УМО = УМО_{\text{масс.}} + УМО_{\text{стер.}}$ , где  $УМО_{\text{масс.}}$  – уровень, связанный с массой высоты

столба жидкости, изменения которой происходят из-за процессов взаимодействия океана и атмосферы, притока пресной воды или таяния льда,  $УМО_{стер.}$  – уровень, обусловленный вкладом стерических колебаний. С развитием методов дистанционного зондирования океана появились новые возможности оценки этих составляющих. Гравиметрические измерения, осуществляемые со спутников GOCE или GRACE, характеризуют массу столба жидкости в морях и океанах, фиксируя изменение морской массы – колебания  $УМО_{масс.}$ , а над континентальными районами также дают прямые оценки изменения запасов воды (Chambers et al., 2006). Альтиметрические измерения, представленные в виде абсолютной динамической топографии, являются интегральной оценкой уровня океана относительно геоида ( $УМО$ ) (Fu, Le Traon, 2006). Точность альтиметрических и гравиметрических измерений несколько сантиметров (Fu, Le Traon, 2006). Большие перспективы имеют методы, использующие комбинацию этих измерений. Для тех периодов, когда данные существуют одновременно, комплексное использование данных альтиметрических и гравитационных измерений дает возможность непосредственно оценить стерические колебания уровня в различных бассейнах (Белоненко и Федоров, 2018).

Изображения 7, 8, 10 показывают пространственные распределения аномалий стерических колебаний с исключенным сезонным ходом. Серая линия показывает изобату 2000 метров. На юго-востоке рассматриваемой области прослеживается подводный хребет Рейкьянес, который выступает естественной границей моря Ирмингера, значения аномалий стерического уровня восточнее анализироваться не будут, изменчивость в данной области обусловлена процессами другой природы, отличной от генезиса отрицательных аномалий, образовавшихся вследствие процессов глубокой конвекции.

На рисунке 7 видно, что в обоих морях в зимние месяцы 2006 г. практически нет ограниченных областей с отрицательными значениями амплитуд стерических колебаний южнее  $57^{\circ}$  с.ш., за исключением прибрежных

областей, которые мы не рассматриваем из-за обилия льда, включая и вытянутую вдоль берега область в январе. Карты показывают значения стерических колебаний с исключенным сезонным ходом, что позволяет сконцентрироваться на особенностях пространственного распределения аномалий стерических колебаний. С уверенностью заявить о глубокой конвекции большой интенсивности в 2006 году нельзя, если обратиться к временному распределению максимальных глубин ВКС (рис. 2), то видно, что в обоих морях конвекция в 2006 году была менее интенсивна относительно предыдущего (2005) и следующего (2007) годов.

Достоверно установлено, что зимой 2008 г. в центральной и южной частях морей Лабрадор и Ирмингера наблюдалась глубокая конвекция (de Jong et al., 2016, Гладышев и др., 2016). На картах рисунка 8 видно, как формируются локальные области с отрицательными значениями амплитуд стерических колебаний, которые соответствуют зонам, где происходит глубокая конвекция. Причем, если в январе и феврале эти области незначительные, то уже в марте и апреле площадь этих областей существенно увеличивается. Таким образом, предлагаемая методика позволяет по картам аномалий стерических колебаний грубо определять области, подверженные глубокой конвекции. Области отрицательных значений на картах рисунка 8 являются областями, где происходила в 2008 г. глубокая конвекция. Эти области согласуются с картами высоких значений глубины перемешанного слоя, построенным по климатологическим данным (Våge et al., 2009), а также с полученным пространственным распределением максимальных глубин ВКС по данным контактных измерений (раздел 4.2.). Данное пространственное распределение (рис.8) кардинально отличается от того, что наблюдалось в 2006 году (рис7), здесь отмечаются обособленные области отрицательных аномалий, с резкими переходами от областей аномалий положительных или близких к нулю к отрицательным.



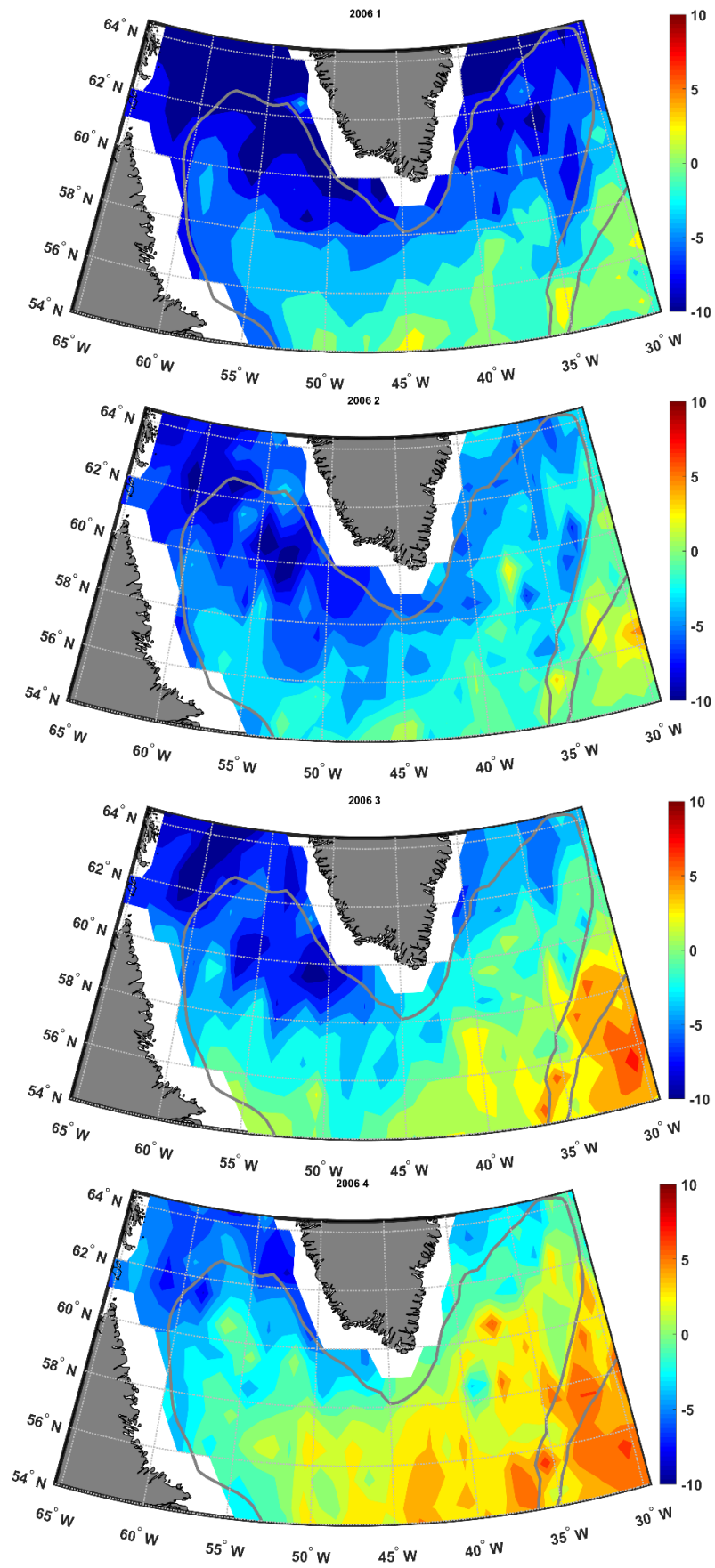


Рисунок 7. Пространственное распределение аномалий стерических колебаний с исключенным сезонным ходом для января-апреля 2006 года. Серая линия показывает изобату 2000 метров.

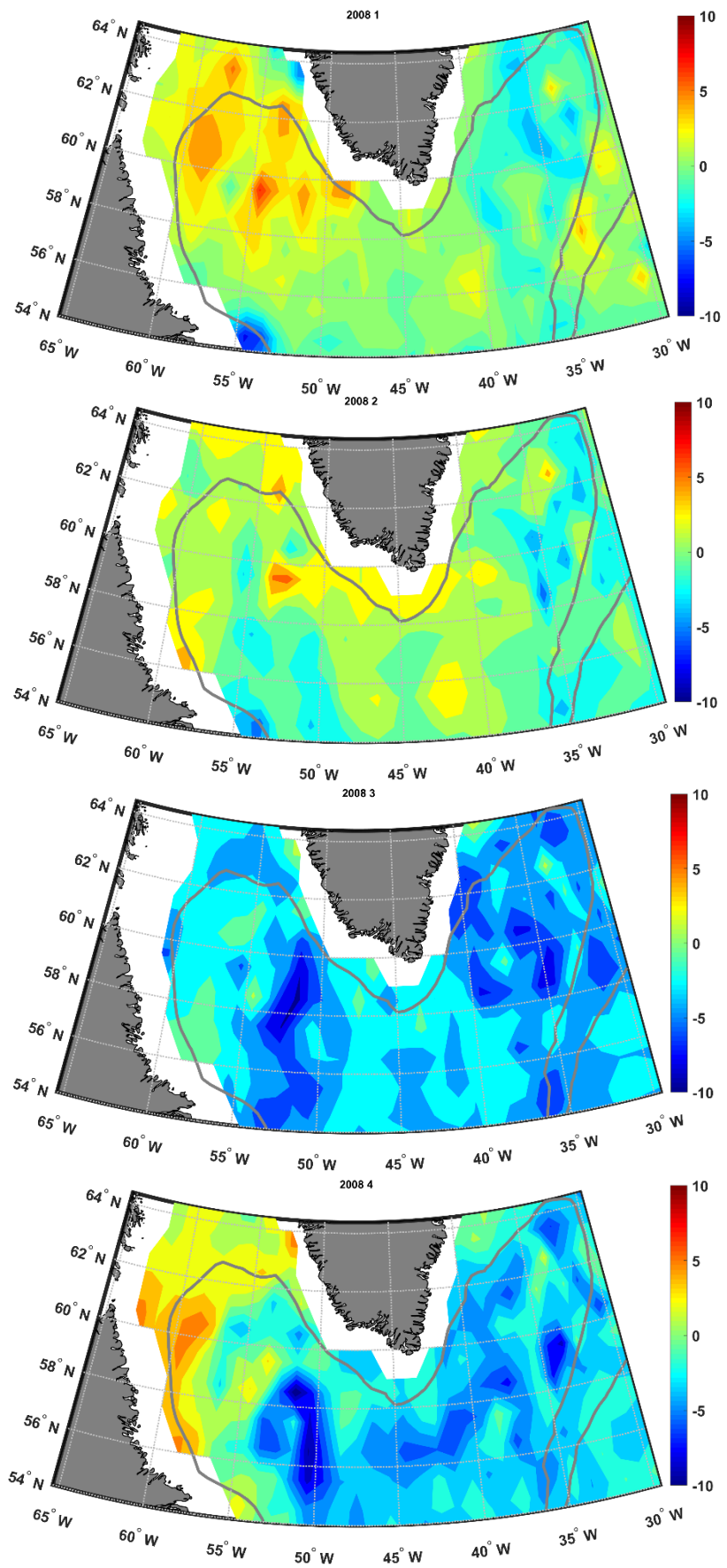


Рисунок 8. Пространственное распределение аномалий стерических колебаний с исключенным сезонным ходом для января-апреля 2008 года. Серая линия показывает изобату 2000 метров.

На основе рассчитанных полей аномалий стерических колебаний с исключенным сезонным ходом, посредством простого осреднения по пространству и времени, можно получить временное распределение среднегодовых значений аномалий стерического уровня (прерывистая линия, рис.9). Осреднялись только зимние месяцы (декабрь-апрель) для каждого года в целом по всей площади области: 54-62° с.ш.; 30-60°з.д.. Хорошо прослеживается выраженный тренд (пунктирная линия), составляющий 0,5 см/год. Наличие тренда прослеживается и на пространственных распределениях, если сравнить, например 2008 (рис. 8) и 2014 годы (рис.10), также эту особенность можно проследить и по распределениям стерических аномалий с исключенным сезонным ходом других лет (поля для 2009, 2012 и 2015 годов представлены в приложении А). Имея более продолжительный ряд данных, необходимо прибегнуть к процедуре детрендирования в каждой точке сетки для того, чтобы избежать неправильной интерпретации полученных результатов. Детрендированная кривая среднегодовых значений аномалий стерического уровня с исключенным сезонным ходом (сплошная линия, рис. 9), по экстремумам хорошо согласуется с временным распределением стерических аномалий (рис. 2), что подтверждает эффективность предложенной методики определения событий глубокой конвекции, а также грубой идентификации их положения. В целом, для рассматриваемого периода конвективные процессы близкой интенсивности отмечаются зимой 2008, 2009, а также зимой 2014 и 2015 годов, как и по результатам расчётов по контактными данным (рис. 2), так и по комбинированным спутниковым измерениям (рис. 9).

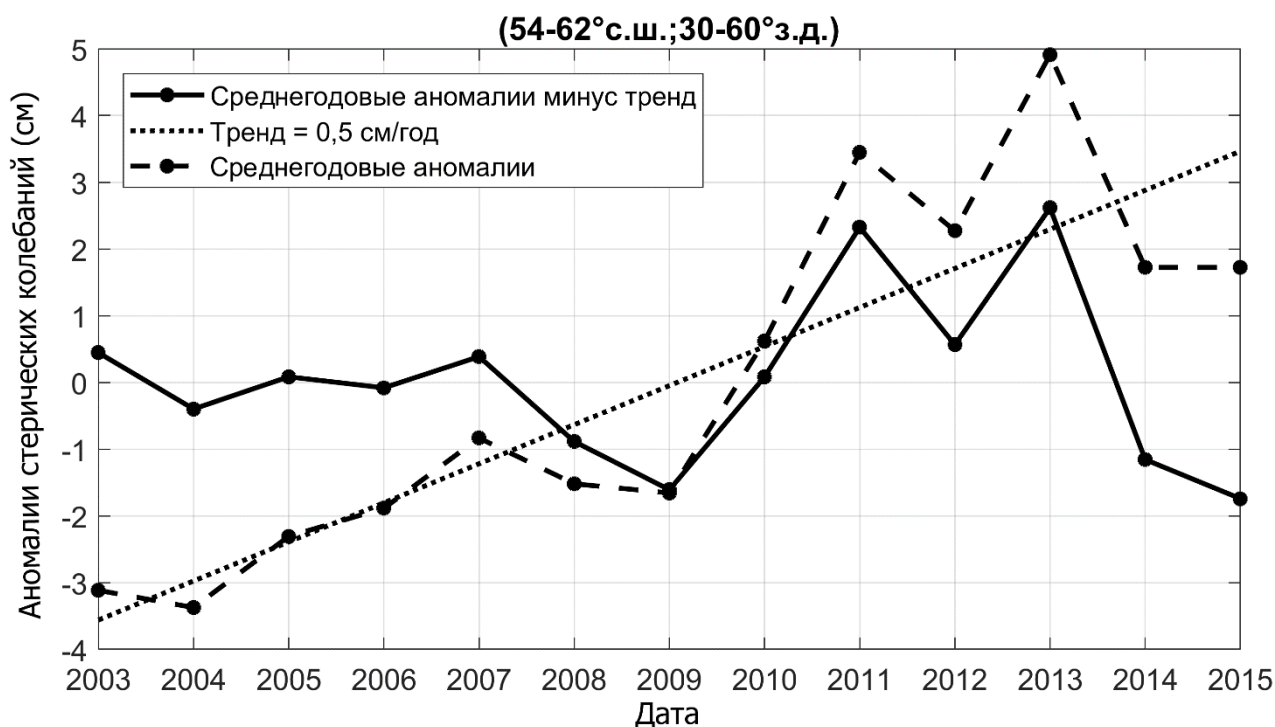
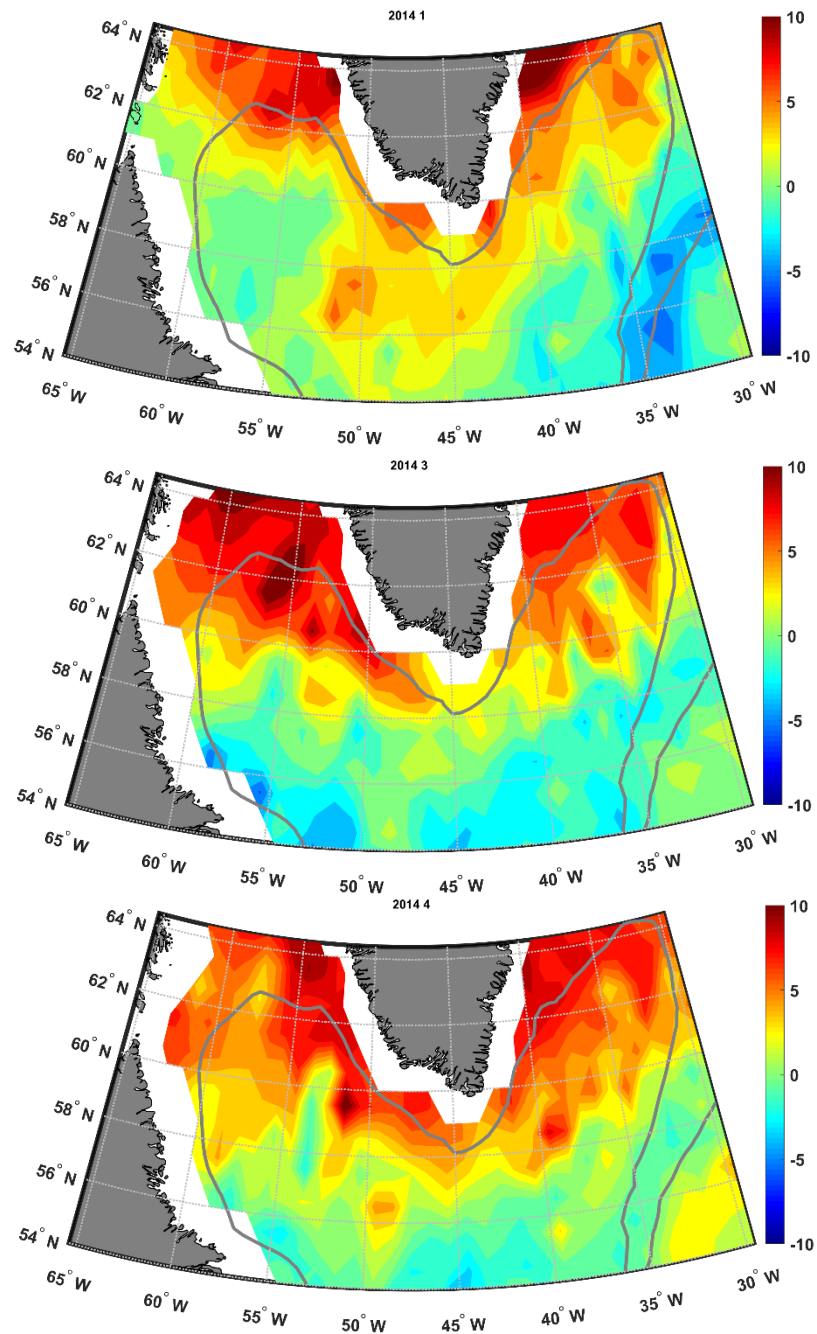


Рисунок 9. Временное распределение осредненных значений аномалий стерического уровня с исключенным сезонным ходом. На графике представлены среднегодовые значения аномалий для области (54-62° с.ш.; 30-60°з.д.)

Несмотря на выраженный положительный тренд, пространственное распределение аномалий для 2014 года (рис. 10) позволяет провести феноменологический анализ. Отрицательные аномалии отмечаются в выделенных ранее областях глубокой конвекции.

Использование комбинированных спутниковых данных несет в себе большой потенциал и позволяет анализировать как пространственную, так и временную изменчивость процессов, происходящих в Мировом океане, с высокой степенью достоверности и оперативности.



*Рисунок 10. Пространственное распределение аномалий стерических колебаний с исключенным сезонным ходом для января, марта, апреля 2014 года. (Февраль не представлен из-за отсутствия данных гравиметрических измерений по техническим причинам.) Серая линия показывает изобату 2000 метров.*

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей выпускной квалификационной работе, согласно поставленным целям, рассматривались вопросы определения положения областей конвекции по данным спутниковых и контактных измерений, а также описание межгодовой и внутригодовой изменчивости интенсивности конвективных процессов и были получены следующие результаты:

- 1) В море Лабрадор конвекция наибольшей интенсивности для периода 2003-2015 отмечалась в 2004, 2008, 2012, 2014, 2015, максимальные значения глубины ВКС в эти годы варьировались в интервале 1300-2000 метров.
- 2) Значения наибольшей глубины ВКС в море Ирмингера редко превышают 1000 метров. Это происходило в 2012 и 2015, также значения конвекции более 500 метров наблюдались в 2007-2009, 2010 годах.
- 3) Максимальные значения ВКС чаще всего наблюдались в обоих морях в марте. Также в этом месяце 5% профилей (от общего количества профилей в этом месяце за 1950-2015) перемешивались более 1000 метров и 15% и более 500 метров в море Лабрадор, а в море Ирмингера 3% и 13%, соответственно.
- 4) Пространственное положение очагов глубокой конвекции представляет собой непрерывную, вытянутую вдоль южной части Гренландии область ( $56-59^{\circ}$ с.ш.  $50-57^{\circ}$ з.д., сужаясь меридионально до  $56-58^{\circ}$  с.ш. на  $40-50^{\circ}$  з.д.), что значительно расширяет современные представления о ее размере.
- 5) Пространственные распределения аномалий стерических колебаний, полученные по комбинированным спутниковым измерениям, позволяют грубо оценить положение очагов конвекции, а также судить о межгодовой изменчивости интенсивности конвективных процессов.

Решаемые в выпускной квалификационной работе задачи полностью выполнены, а реализуемая цель успешно достигнута. Результаты квалификационной работы позволяют получить полное представление о межгодовой, внутригодовой и пространственной изменчивости глубокой конвекции, соответствуют заявленной актуальности и являются новыми.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ФЕДОРОВА А.М. ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

По результатам исследования, представленного в данной работе, имеется 6 публикаций, из которых 4 входят в список журналов РИНЦ и ВАК и 1 входит в список журналов Scopus:

*Статьи в журналах:*

1. Федоров А.М., Кубряков А.А., Белоненко Т.В. Многолетние изменения крупномасштабной циркуляции в Северной Атлантике на основе спутниковых альтиметрических измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2017а. Т. 14. № 7. С. 225–237. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-225-237.
2. Белоненко Т.В., Федоров А.М., Башмачников И.Л., Фукс В.Р. Тренды интенсивности течений в Лабрадорском море и море Ирмингера по спутниковым альтиметрическим данным // Исследование Земли из космоса, 2018. № 2 с. 3–12. DOI: 10.7868/S020596141802001X.
3. Белоненко Т.В., Федоров А.М. Стерические колебания уровня и глубокая конвекция в Лабрадорском море и море Ирмингера // Исследование Земли из космоса, 2018. № 3. С. 1–14.

*Тезисы докладов:*

4. Белоненко Т.В., Федоров А.М. Связь стерических колебаний уровня и глубокой конвекции в Лабрадорском море и море Ирмингера // Труды всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития (к 70-летию со дня рождения Л.Н. Карлина). СПб., 2017. С. 82-86.
5. Федоров А.М., Кубряков А.А., Белоненко Т.В. Крупномасштабная изменчивость течений в северном атлантическом океане по данным спутниковых альтиметрических измерений. // Комплексные исследования Мирового океана материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых. М., 2017б. С. 288-290.
6. Федоров А.М., Кубряков А.А., Белоненко Т.В., Башмачников И.Л. Изменчивость крупномасштабной циркуляции в Северной Атлантике по спутниковым данным. // Тезисы Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2017в. С. 303.

Основные результаты, составившие содержание данной работы, докладывались на российских и международных конференциях, в том числе на Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» ИКИ РАН (Москва, 2017), Всероссийской научной конференции молодых ученых «Комплексные исследования мирового океана – КИМО-2017» (Москва, 2017), Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития (к 70-летию со дня рождения Л.Н. Карлина)» (Санкт-Петербург, 2017), Международный семинар «STEPS (Students and Researchers Exchange Program in Sciences) Seminar» (Санкт-Петербург, 2018), Международной студенческой научно-практической конференции «Большой Географический фестиваль» (Санкт-Петербург, 2017, 2018)



В номинации «Конкурс молодых ученых» работа автора была отмечена поощрительной грамотой на конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» ИКИ РАН (Москва, 2017).

Автор принимал участие в конкурсе молодых ученых, проводимый Санкт-Петербургским отделением Института океанологии РАН, и получил Диплом III степени (3 место в конкурсе), а также в Открытой международной олимпиаде Санкт-Петербургского государственного университета среди студентов и молодых специалистов, и вошел в число победителей (Диплом I степени). Научные работы, представленные на конкурсе и олимпиаде, включали в себя материалы из настоящей выпускной квалификационной работы.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Приложение А: Пространственное распределение аномалий стерических колебаний уровня с исключенным сезонным ходом

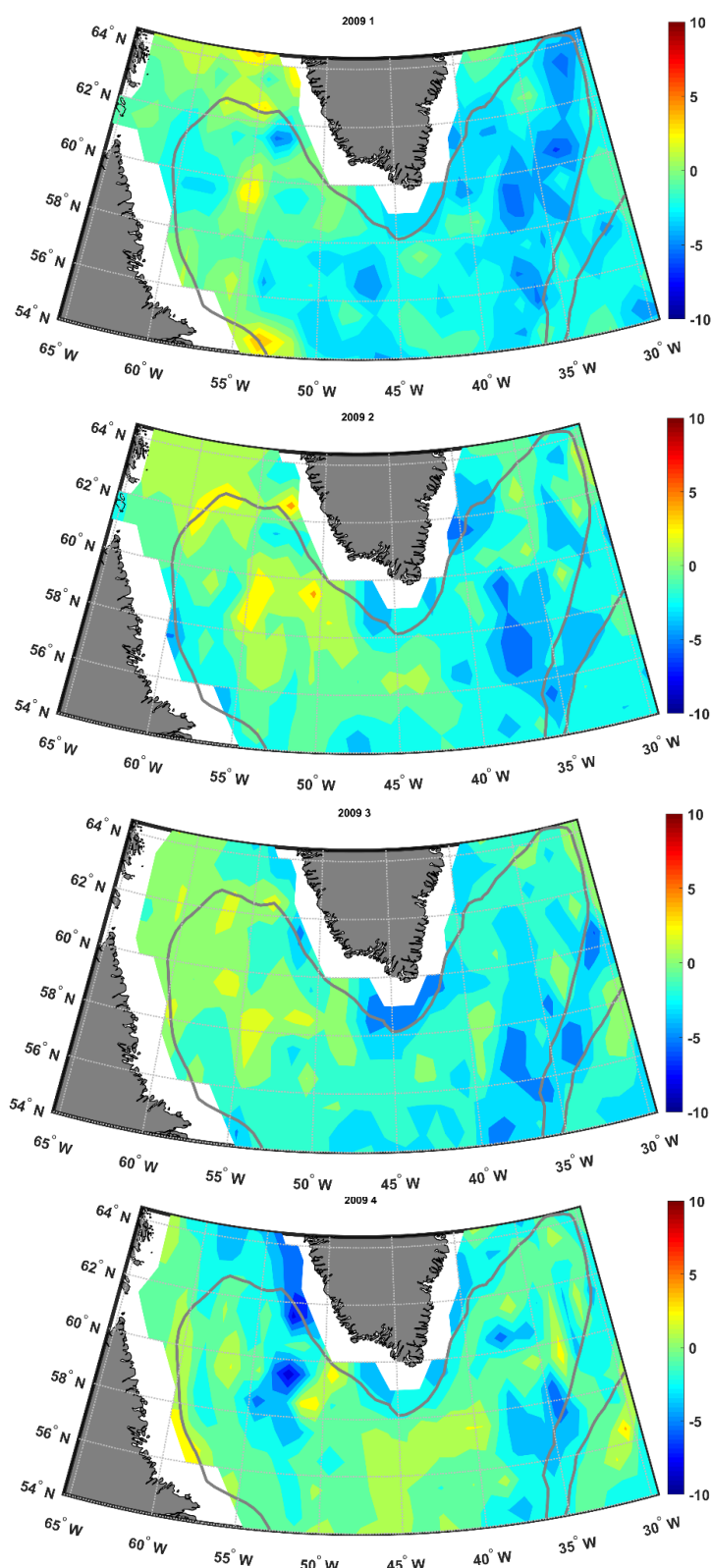


Рисунок 11. Пространственное распределение аномалий стерических колебаний с исключенным сезонным ходом для января-апреля 2009 года. Серая линия показывает изобату 2000 метров.

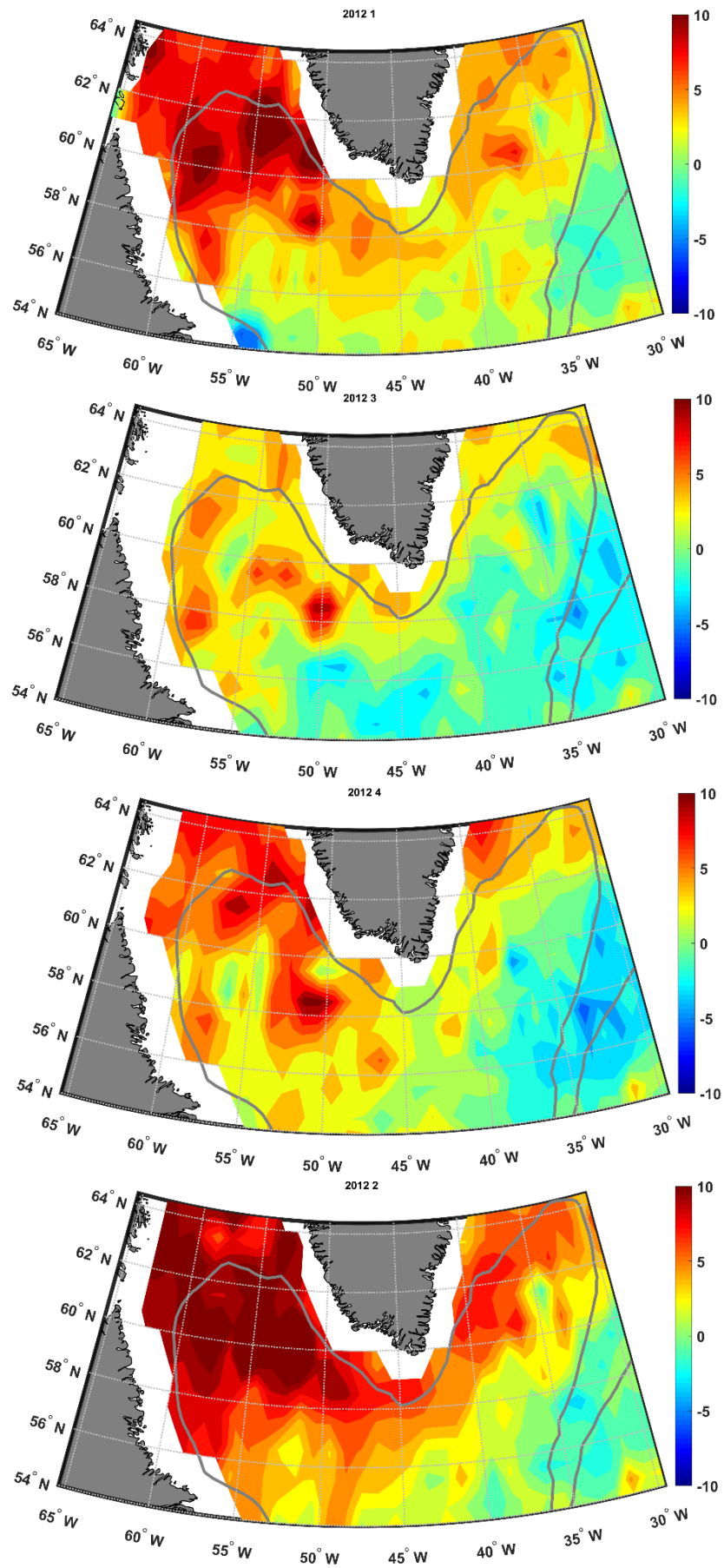
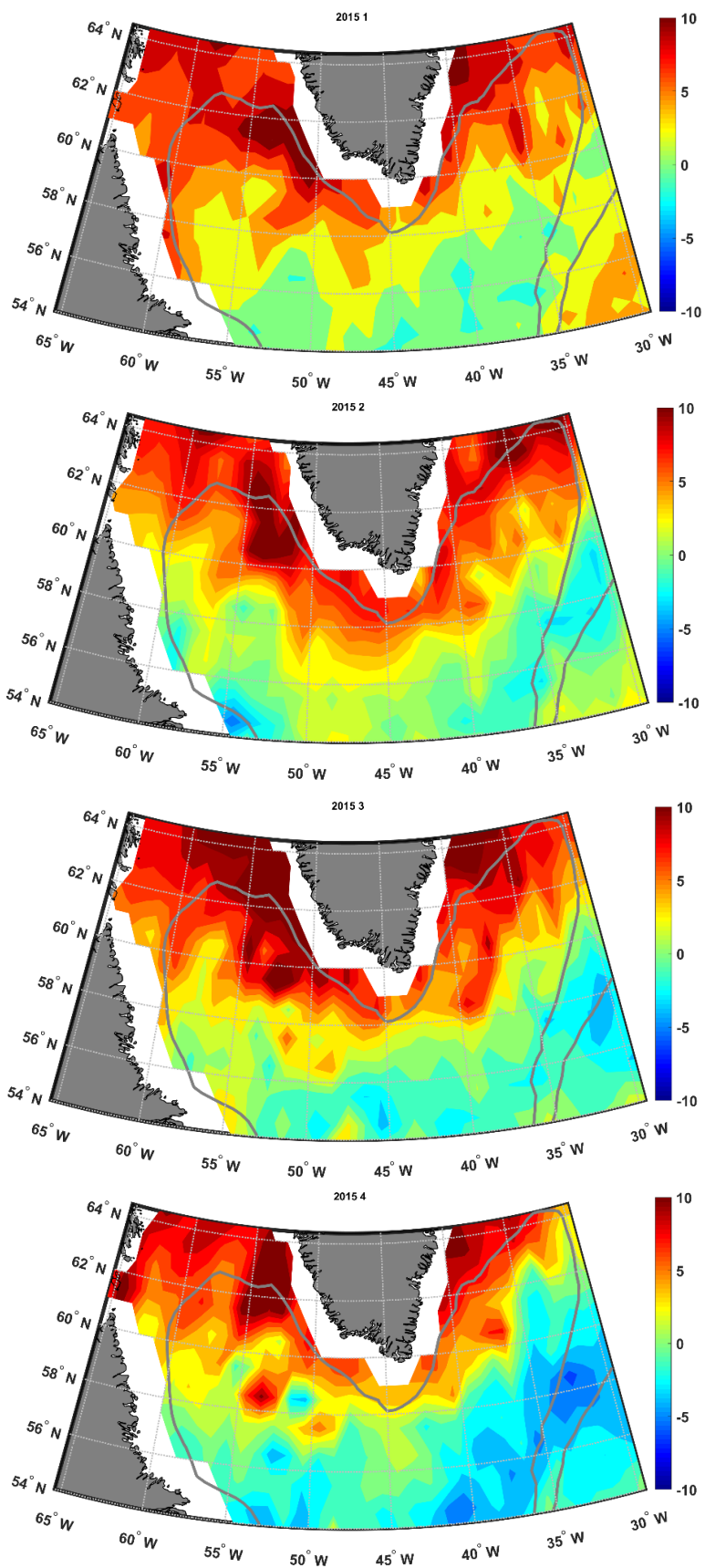


Рисунок 12. Пространственное распределение аномалий стерических колебаний с исключенным сезонным ходом для января-апреля 2012 года. Серая линия показывает изобату 2000 метров.



*Рисунок 13. Пространственное распределение аномалий стерических колебаний с исключенным сезонным ходом для января-апреля 2015 года. Серая линия показывает изобату 2000 метров.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Белоненко Т.В., Колдунов А.В. Стерические колебания уровня в северо-западной части Тихого океана // Вестник СПбГУ, 2006. Сер. 7. №. 3. С. 81-88.
- 2) Белоненко Т.В., Федоров А.М. Связь стерических колебаний уровня и глубокой конвекции в Лабрадорском море и море Ирмингера // Труды всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития (к 70-летию со дня рождения Л.Н. Карлина). СПб., 2017.С. 82-86.
- 3) Белоненко Т.В., Федоров А.М. Стерические колебания уровня и глубокая конвекция в Лабрадорском море и море Ирмингера // Исследование Земли из космоса, 2018. № 3. С. 1–14.
- 4) Белоненко Т.В., Федоров А.М., Башмачников И.Л., Фукс В.Р. Тренды интенсивности течений в Лабрадорском море и море Ирмингера по спутниковым альтиметрическим данным // Исследование Земли из космоса, 2018. № 2 с. 3–12. doi: 10.7868/S020596141802001X.
- 5) 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. doi: 10.7868/S0030157416030072.
- 6) Зеленко А.А., Реснянский Ю.Д. Глубокая конвекция в модели общей циркуляции океана: изменчивость на суточном, сезонном и межгодовом масштабах // Океанология, 2007. Т. 47. № 2. С. 211-224.
- 7) 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.
- 8) Провоторов П.П. Стерические колебания уровня моря // Колебания уровня в морях, СПб., 2003. С. 129-138.
- 9) Федоров А.М., Кубряков А.А., Белоненко Т.В. Крупномасштабная изменчивость течений в северном атлантическом океане по данным

спутниковых альтиметрических измерений. // Комплексные исследования Мирового океана материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых. М., 2017б. С. 288-290.

- 10) Федоров А.М., Кубряков А.А., Белоненко Т.В. Многолетние изменения крупномасштабной циркуляции в Северной Атлантике на основе спутниковых альтиметрических измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2017а. Т. 14. № 7. С. 225–237. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-225-237.
- 11) Федоров А.М., Кубряков А.А., Белоненко Т.В., Башмачников И.Л. Изменчивость крупномасштабной циркуляции в Северной Атлантике по спутниковым данным. // Тезисы Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2017в. С. 303.
- 12) Broecker W.S. The Great Ocean Conveyor // Oceanography, 1991. N. 4. pp.79-89.
- 13) Centurioni L.R., Gould W.J. Winter conditions in the Irminger Sea observed with profiling floats // Journal of Marine Research, 2004. Vol. 62. N. 3. pp. 313-336(24) <https://doi.org/10.1357/0022240041446209>
- 14) Chambers, D. P. Observing seasonal steric sea level variations with GRACE and satellite altimetry // J. Geophys. Res., 2006. Vol. 111. C03010. doi:10.1029/2005JC002914.
- 15) Cunningham S.A. Temporal variability of the Atlantic meridional overturning circulation at 26.5 N // Science, 2007. N. 317. pp. 935–937.
- 16) 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 // Geophys. Res. Lett., 2016. N. 43. pp. 1717–1734. doi:10.1002/2016GL069596.
- 17) 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: Oceanographic Research Papers, 2012. N. 63. pp. 36-51.

- 18) Falina A., Sarafanov A., Sokov A. Variability and renewal of Labrador Sea Water in the Irminger Basin in 1991–2004 // *J. Geophys. Res.*. 2007. Vol. 112. C01006. doi:10.1029/2005JC003348.
- 19) Fu L.L., Le Traon P.-Y. Satellite altimetry and ocean dynamics. *Comptes Rendus Geosciences*, 2006. Vol. 338. Issues 14-15. pp. 1063-1076 <http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2006.05.015>.
- 20) García D.; Ramillien G.; Lombard A.; Cazenave A. Steric Sea-level Variations Inferred from Combined Topex/Poseidon Altimetry and GRACE Gravimetry // *Pure & Applied Geophysics* . 2007. Vol. 164. Issue 4. pp. 721-731.
- 21) Gelderloos, R., Katsman C. A., and Våge K. Detecting Labrador Sea Water formation from space // *J. Geophys. Res. Oceans*, 2013. Vol. 118. pp. 2074–2086, doi:10.1002/jgrc.20176.
- 22) 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. Geophys. Res. Oceans*, 2013. Vol. 118. pp. 6704–6716. doi:10.1002/2013JC009067.
- 23) Hakkinen, S., and Rhines P.B. Decline of subpolar North Atlantic circulation during the 1990s // *Science*, 2004. Vol. 309. pp.555–559.
- 24) Hakkinen, S., and Rhines P.B. Shifting surface currents of the northern North Atlantic Ocean// *Journal of Geophysical Research*, 2009. Vol.114. C04005. doi:10.1029/2008JC004883
- 25) Herrmann, M., Bouffard J., and Béranger K. Monitoring open-ocean deep convection from space // *Geophys. Res. Lett.*, 2009. Vol. 36. L03606. doi:0.1029/2008GL036422.
- 26) Holte J., Talley L.D., Gilson J., Roemmich D. An Argo mixed layer climatology and database // *Geophys. Res. Lett.*, 2017. Vol. 44. pp. 5618–5626, doi:10.1002/2017GL073426.
- 27) Jeansson E., Olsen A., Jutterström S. Arctic Intermediate Water in the Nordic Seas, 1991–2009 // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2017. N. 128. pp. 82-97.



- 28) Kara A.B., Rochford P.A., Hurlburt H.E. Mixed layer depth variability over the global ocean // *J. Geophys. Res.*, 2003. Vol. 108. pp. 3079. doi:10.1029/2000JC000736, C3.
- 29) Lab Sea Group. The Labrador Sea Deep Convection Experiment // *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1998. Vol. 79, pp. 2033–2058.
- 30) Latif M., Boning C., Willebrand J., Biastoch A., Dengg J., Keenlyside N., Schweckendiek U., Madec G. Is the thermohaline circulation changing? // *J. Clim.*, 2006. Vol. 19(18), pp. 4631–4637. doi: 10.1175/JCLI3876.1.
- 31) Lavender K.L., Davis R.E., Owens W.B. Observations of Open-Ocean Deep Convection in the Labrador Sea from Subsurface Floats // *J. Phys. Oceanogr.*, 2002. Vol. 32, pp. 511–526, [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)032<0511:OOODC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032<0511:OOODC>2.0.CO;2).
- 32) Lazier J, Hendry R., Clarke A., Yashayaev I., Rhines P. Convection and restratification in the Labrador Sea, 1990–2000 // *Deep-Sea Research I*, 2002. Vol. 49, pp. 1819–1835.
- 33) Lilly J.M., Rhines P.B., Visbeck M., Davis R., Lazier J.R., Schott F., Farmer D. Observing Deep Convection in the Labrador Sea during Winter 1994/95 // *J. Phys. Oceanogr.*, 1999. N. 29, pp. 2065–2098. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<2065:ODCITL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<2065:ODCITL>2.0.CO;2)
- 34) Lombard A., Garcia D., Ramillien G., Cazenave A., Biancale R., Lemoine J.M., Flechtner F., Schmidt R., Ishii M.. Estimation of steric sea level variations from combined GRACE and Jason-1 data. // *Earth Planet Sci Lett.*, 2007, N. 254, pp. 194–202.
- 35) Marshall J., Schott F. Open-ocean convection: Observations, theory, and models // *Rev. Geophys.*, 1999. Vol. 37.N. 1. pp. 1–64.
- 36) Mercier H., Lherminier P., Sarafanov A., Gaillard F., Daniault N., Desbruyères D, Falina A., Ferron B., Huck T., Thierry V. Variability of the meridional overturning circulation at the Greenland–Portugal OVIDE section from 1993 to 2010 // *Prog. Oceanogr.* 2015. N. 132. pp. 250–261. doi:10.1016/j.pocean.2013.11.001.



- 37) Pérez F.F., Mercier H., Vazquez-Rodriguez M., Lherminier P., Velo A., Pardo P., Roson G., Rios A. Reconciling air-sea CO<sub>2</sub> fluxes and anthropogenic CO<sub>2</sub> budgets in a changing North Atlantic // *Nat. Geosci.*, 2013. N. 6. pp. 146–152. doi:10.1038/ngeo1680.
- 38) Pickart R.S., Spall M.A., Ribergaard M.H., Moore G.W.K., Milliff R F. Deep convection in the Irminger Sea forced by the Greenland tip jet // *Nature*, 2003a. Vol. 424. N. 152. pp. 6945.
- 39) Pickart R.S., Straneo F., Moore G. W. K. Is Labrador Sea Water formed in the Irminger basin? // *Deep Sea Res. I*, 2003b. N. 50. pp. 23–52. doi:10.1016/S0967-0637(02)00134-6.
- 40) Pickart R.S., Torres D.J., Clarke R.A. Hydrography of the Labrador Sea during active convection // *J. Phys. Oceanogr.*, 2002. N. 32, pp. 428–457.
- 41) Piron A., Thierry V., Mercier H. Caniaux G. Gyre-scale deep convection in the subpolar North Atlantic Ocean during winter 2014–2015 // *Geophys. Res. Lett.*, 2017. N. 44. pp. 1439–1447. doi:10.1002/2016GL071895.
- 42) Våge 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 // *Nat. Geosci.*, 2009. N. 2. pp. 67–72. doi:10.1038/ngeo382.
- 43) Volkov D.L., Landerer F.W., Kirillov S.A. The genesis of sea level variability in the Barents Sea // *Continental Shelf Res.*, 2013. N. 66. pp. 92-104. doi:10.1016/j.csr.2013.07.007.
- 44) Yashayaev I. Hydrographic changes in the Labrador Sea, 1960–2005 // *Prog. Oceanogr.*, 2007. N. 73. pp. 242–276.
- 45) Yashayaev I., Loder J. W. Enhanced production of Labrador Sea Water in 2008 // *Geophys. Res. Lett.*, 2009. Vol. 3, L0160. doi:10.1029/2008GL036162.
- 46) Yashayaev I., Loder J.W. Recurrent replenishment of Labrador Sea Water and associated decadal-scale variability // *J. Geophys. Res.: Oceans*, 2016. N. 121. pp. 8095–8114. doi:10.1002/2016JC012046.

47) Yashayaev, I, and Clarke A. Evolution of North Atlantic water masses inferred from Labrador sea salinity series // *Oceanography*, 2008. Vol. 21, N. 1. pp. 30–45.