

Межгодовая изменчивость теплосодержания и содержания пресной воды в куполе холодных вод моря Лабрадор*

Д. А. Яковлева¹, И. Л. Башмачников^{1, 2}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² Научный фонд «Международный центр по окружающей среде
и дистанционному зондированию им. Нансена»,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, 14-я линия В. О., 7

Для цитирования: Яковлева, Д. А., Башмачников, И. Л. (2019). Межгодовая изменчивость теплосодержания и содержания пресной воды в куполе холодных вод моря Лабрадор. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 64 (1), 136–158. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.108>

В работе исследуется межгодовая изменчивость теплосодержания и содержания пресной воды в море Лабрадор на основе массива ARMOR-3D (1993–2016 гг.), в котором скомбинированы натурные и спутниковые наблюдения. Расчеты показали значимые тенденции к увеличению теплосодержания и уменьшению содержания пресной воды в верхнем 500-метровом слое. С глубиной угловой коэффициент линии тренда характеристик уменьшается, что говорит о приповерхностном происхождении процессов, формирующих долгосрочную изменчивость изучаемых величин. В межгодовых масштабах теплосодержание и содержание пресной воды имеют отрицательную корреляцию при удаленных трендах, которая возможна и за счет усиления теплообмена с атмосферой, и за счет изменения интенсивности адвекции субтропических и/или полярных вод в море Лабрадор. В межгодовой изменчивости теплосодержания и содержания пресной воды выделены доминирующие циклы продолжительностью 2–4 года и 5–8 лет. Показана связь выделенной изменчивости термохалинных характеристик с индексом Северо-Атлантической осцилляции (NAOI). В частности, для 2- и 5–8-летних циклов получена высокая когерентность индекса с теплосодержанием. На 2-летних циклах выявлено запаздывание колебаний NAOI на четверть периода относительно колебаний теплосодержания, что интерпретируется как наличие обратного влияния температуры поверхностных вод моря Лабрадор на фазу/интенсивность Северо-Атлантической осцилляции. На 5–8-летних периодах также наблюдается когерентность колебаний теплосодержания/содержания пресной воды с колебаниями индекса Атлантической мультидекадной осцилляции (AMOI), характеризующего изменчивость средней температуры воды Северной Атлантики. AMOI практически синфазно меняется с теплосодержанием. После 2000-х гг. стала проявляться связь с AMOI и на 2–4-летних циклах, причем колебания AMOI несколько опережают колебания теплосодержания.

Ключевые слова: море Лабрадор, теплосодержание, содержание пресной воды, Северо-Атлантическая осцилляция, Атлантическая мультидекадная осцилляция.

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

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2019

Введение

Море Лабрадор — одно из субполярных морей Северной Атлантики, место взаимодействия холодных и распресненных полярных с теплыми и солеными субтропическими водами (рис. 1). Оно представляет собой один из немногих районов, в котором наблюдается глубокая зимняя конвекция (достигающая глубины 2000 м) и формируются глубинные водные массы Северной Атлантики. Распространяясь на юг, эти воды формируют значительную часть возвратного глубинного потока Атлантической меридиональной термохалинной циркуляции, являющейся одним из долгосрочных климатообразующих факторов (Buckley and Marshall, 2016).

Глубокая конвекция представляет собой перемешивание вод в результате гравитационной неустойчивости столба воды. В море Лабрадор она возникает при достаточно интенсивном осенне-зимнем охлаждении (термическая конвекция) и усиливается при осолонении приповерхностного слоя в ходе образования льда (соленостная конвекция). При относительно стабильных термохалинных характеристиках глубинных слоев изменение температуры и солености приповерхностного слоя за теплый период года определяет интенсивность стратификации вод к началу осенне-зимнего охлаждения, формируя условия для дальнейшего развития конвективного перемешивания.

Цель данного исследования — анализ характера сезонной и межгодовой изменчивости теплосодержания и содержания пресной воды в приповерхностных

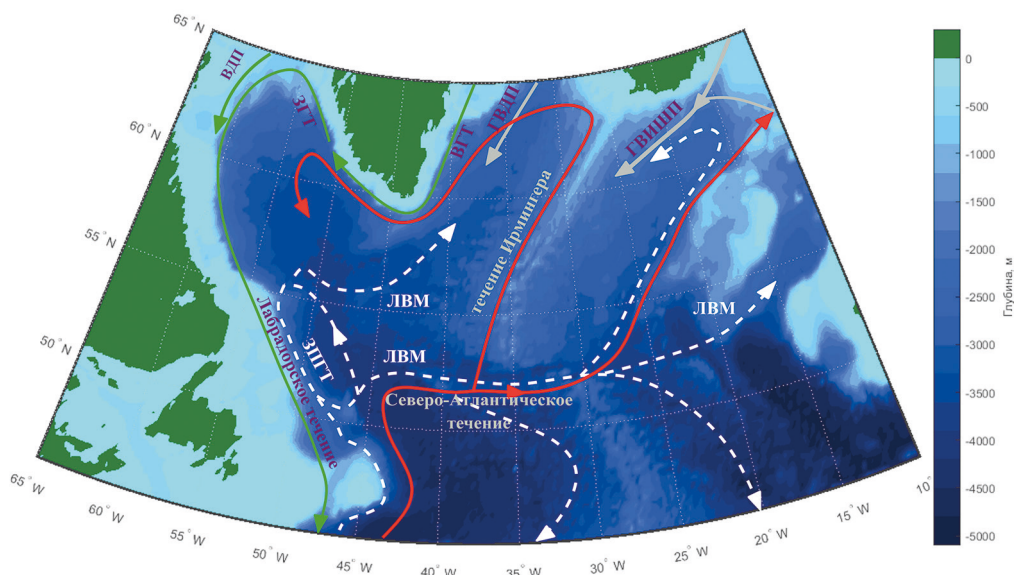


Рис. 1. Карта глубин исследуемого региона:

стрелки — основные течения (серые и белые — глубинные, красные и зеленые — поверхностные холодные и теплые течения соответственно); ВГТ — Восточно-Гренландское течение; ЗГТ — Западно-Гренландское течение; ВДП — воды, поступающие через Девисов пролив; ЛВМ — лабдорская водная масса (LSW — Labrador sea Water); ГВДП — глубинные воды Датского порога (DSOW — Danish Strait Overflow Water); ГВИШП — глубинные воды Исландско-Шетландского порога (ISOW — Island-Shetland Overflow Water); ЗПГТ — воды Западного прибрежного глубинного течения (DWBC — Deep Western Boundary Current) (в скобках даны общепринятые английские названия)

слоях моря Лабрадор и их связи с индексами атмосферной и океанической циркуляции. Изменчивость теплосодержания и содержания пресной воды в приповерхностных слоях моря Лабрадор формируется и за счет переноса вод с различной температурой и соленостью из соседних акваторий, и за счет тепло- и влагообмена с атмосферой.

Холодные распресненные арктические воды (с температурой менее 2 °С и соленостью 33–34) поступают в море Лабрадор из Северного Ледовитого океана через Девисов пролив и с Восточно-Гренландским течением. В последнем случае эти воды уже модифицированы за счет перемешивания с теплыми атлантическими водами в Датском проливе и в море Ирмингера. Восточно- и Западно-Гренландские течения имеют сложную структуру. Помимо модифицированных арктических вод эти течения также переносят модифицированные воды течения Ирмингера (с температурой более 4 °С и соленостью более 34,9). Воды течения Ирмингера прослеживаются в море Лабрадор на глубинах около 500 м и частично проникают в центральные части моря (Yashayaev, 2007). Это связывают с интенсивным вихревым переносом от юго-западного континентального склона о. Гренландия (Chanut et al., 2008). Воды Восточно-Гренландского течения, сливаясь с арктическими водами, поступающими из Девисова пролива, и с распресненными водами Гудзонова залива, образуют Лабрадорское течение. С юга незначительное количество субтропических Атлантических вод поступает в море Лабрадор за счет трансфронтального обмена через Северо-Атлантическое течение.

Горизонтальные потоки тепла и соли, а также вертикальный обмен теплом и пресной водой с атмосферой формирует основные характеристики и характер распределения приповерхностных водных масс в море Лабрадор. Верхние слои субполярного циклонического круговорота моря занимает субполярная приповерхностная водная масса (СПВМ, или SPMW — Subpolar Mode Water). Приповерхностная фракция СПВМ (100–200 м) характеризуется низкой соленостью 34,7–34,85 и температурой 2–4 °С. Она особенно выражена в западной и центральной частях моря. Нижняя фракция СПВМ (200–500 м) имеет повышенные значения солености 34,77–34,92 и температуры 3–5 °С, и особенно выражена в восточной и южной частях моря. Обе фракции формируются за счет смешения, в разных пропорциях, пресных и холодных вод Гренландского и Лабрадорского течений с более теплыми и солеными водами течения Ирмингера (McCartney and Talley, 1982; Khatiwala et al., 2002; Yashayaev, 2007; Brambilla et al., 2008; Rhein et al., 2011). Промежуточная и глубинная водные массы в море Лабрадор включают в себя «классическую» лабрадорскую водную массу (ЛВМ или CLSW — Classical Labrador Sea Water, или LSW — Labrador Sea Water) с температурой 2,95 °С и соленостью 34,86, и ее более легкую фракцию — верхнюю лабрадорскую водную массу (ВЛВМ, или ULSW — Upper Labrador Sea Water) с температурой 3,5 °С и соленостью 34,80. Предполагается, что ВЛВМ образуется в зоне интенсивной вихревой активности в юго-западной части моря Лабрадор (возможно, в Лабрадорском течении) и вовлекается в Западное прибрежное глубинное течение (Stramma et al., 2004; Yashayaev, 2007). Обе фракции лабрадорской водной массы формируются во время глубокой конвекции. Наиболее глубокие слои моря Лабрадор занимает североатлантическая глубинная водная масса (СГВМ, или NADW — North Atlantic Deep Water) с температурой 1,30–2,55 °С и соленостью 34,87–34,96. Она формируется в результате выноса и модификации

глубинных вод Гренландского моря через Датский и Фареро-Шетландский проливы (Khatiwala et al., 2002; Yashayaev, 2007; Yashayaev and Clarke, 2008; Rhein et al., 2011; Jenkins et al., 2015).

С 1960-х гг. в межгодовой изменчивости термохалинного режима моря Лабрадор в литературных источниках выделяют несколько периодов. Наиболее холодные и пресные глубинные воды отмечались в 1987–1994 гг. Это связано с суровыми зимами в данный период, во время которых наблюдалась интенсивная глубокая конвекция (Curry and McCartney, 1996, Yashayaev, 2007). Аномально теплые и соленые воды наблюдались в 1962–1971, 1977–1983 и 1994–2006 гг. (Yashayaev, 2007). После 1998–1999 гг. отмечалось снижение плотности лабрадорской водной массы, формирующейся в результате зимней конвекции. В эти годы вместо «классической» лабрадорской водной массы преимущественно формировалась более легкой верхний ее тип ВЛВМ (Yashayaev, 2007).

Интенсивность океанической адвекции тепла и соли, влияющих на формирование термохалинного режима в море Лабрадор, характеризуется индексами Арктической океанической осцилляции (Arctic Ocean Oscillation Index — АООИ) и индекс Атлантического мультideкадного колебания (АМОИ). Интенсивность адвекции холодных и пресных арктических вод в море можно охарактеризовать фазой индекса АООИ. Он рассчитывается как разность уровней моря между центральной частью антициклонического круговорота Бофорта и последней замкнутой линией тока вокруг формирующегося там купола холодных распресненных вод (Proshutinsky et al., 2015). При положительных значениях АООИ распресненная поверхностная вода, как и лед, накапливаются в канадской части Арктического бассейна. В период отрицательных значений индекса наблюдаются усиление циклонической циркуляции в центральной и евразийской частях Арктического бассейна и интенсификация сброса распресненных вод и льда через проливы Фрама/Датский и Дэвисов пролив. В межгодовой изменчивости индекса АООИ доминирует 10–14-летняя цикличность (Proshutinsky et al., 2015).

Температура вод, приносимых течением Ирмингера, связана с индексом АМОИ, представляющим собой среднюю аномалию температуры поверхности океана в северной Атлантике между 0 и 70° с. ш. (Drinkwater et al., 2014). АМОИ имеет выраженную цикличность с холодными и теплыми фазами, длительность которых составляет 10–20 и 60–80 лет, а разница температур между экстремумами достигает 1 °С. В период теплой фазы АМОИ также возрастают число и интенсивность тропических штормов, но в умеренных широтах число штормов слабо связано с фазами этого индекса. Его значение росло с 1990-х гг. до 2000 г., после чего оно начало уменьшаться (Yashayaev et al., 2015).

Характеристики приповерхностных вод во многом определяются атмосферной и океанической циркуляцией. Основная мода изменчивости характера и интенсивности общей циркуляции атмосферы в северной Атлантике — Северо-Атлантическое колебание (Hurrell and Deser, 2010). Оно характеризуется индексом Северо-Атлантической Осцилляции (NAOI — the North Atlantic Oscillation Index), который рассчитывается как разность давлений в Исландском минимуме и в Азорском максимуме. NAOI характеризует общую интенсивность западных ветров над Северной Атлантикой, а также положение оси струйного потока западных ветров и траекторий перемещающихся на север циклонов. При отрицательных значениях

NAOI, в зимний период, струйный поток западных ветров над западной частью Северной Атлантики отклоняется на север и проходит через море Лабрадор, тем самым принося в район исследования более теплые и влажные воздушные массы. В периоды положительных значений NAOI струйный поток проходит южнее моря Лабрадор и отклоняется к северу уже над Норвежским морем. В этот период над морем Лабрадор преобладают холодные и сухие арктические воздушные массы (Hurrell and Deser, 2010). NAOI имеет сезонный ход, усиливаясь в холодную половину года, при усилении Исландского минимума. В это время над морем Лабрадор возрастает циклоническая активность. Летом над юго-восточной частью моря Лабрадор может ощущаться некоторое влияние Азорского максимума, циклоны реже проходят через регион.

На существенную роль атмосферных процессов в формировании характеристик вод моря Лабрадор указывает наблюдающаяся связь между изменением характеристик формирующихся зимой глубинных лабрадорских вод и NAOI. Так, период 1962–1971 гг. (в течение которого было зафиксировано слабое конвективное перемешивание и незначительное обновление глубинных лабрадорских вод, все более теплых и соленых) характеризовался преимущественно отрицательными значениями NAOI. Наоборот, периоды 1972–1976 гг. и 1988–1994 гг. (когда воды моря Лабрадор были наиболее холодными и распресненными) характеризовались преимущественно положительными значениями NAOI (Yashayev, 2007). С 1990 по 2010 гг. индекс NAOI имел общую тенденцию к падению (Yashayev et al., 2015), что говорит об увеличении влияния воздушных масс умеренных широт на климат моря Лабрадор. В 2010–2015 гг. снижение NAOI сменилось на противоположную тенденцию (Yashayev et al., 2015). В межгодовой изменчивости индекса NAOI, достаточно хаотичной, проявляются квазидвухлетняя, квазичетырехлетняя, пяти-семилетняя, квазидвадцатилетняя цикличности (Pozo-Vazquez et al, 2000, Bashmachnikov et al., 2013).

Влияние Арктики на климат моря Лабрадор зависит от степени замкнутости тропосферной и стратосферной циркуляции в полярных районах. Эта замкнутость определяется по индексу Арктической осцилляции (АОИ), представляющему собой разность давлений воздуха в центральной Арктике и в области 37–45° с. ш., и характеризует интенсивность ведущей моды колебаний атмосферного давления всего Северного полушария. Когда АОИ уменьшается, то ослабляется полярный антициклонический вихрь над Арктикой и интенсифицируется обмен воздушными массами между Арктикой и умеренными широтами. В частности, при низких значениях АОИ над северо-западной частью моря Лабрадор наблюдается более холодная погода, а над юго-восточной — более теплая (Bingyi and Jia, 2002). АОИ хорошо коррелирует с NAOI, и Северо-Атлантическую осцилляцию часто называют региональным проявлением Арктической осцилляции. В межгодовой изменчивости индекса АОИ проявляются примерно те же цикличности, что и в NAOI: 2,5–3,5, 6–8 и 12–20 лет (Jevrejeva et al., 2003).

Материалы и методы

В работе исследовалась межгодовая изменчивость теплосодержания и содержания пресной воды в котловине моря Лабрадор, 55–63° с. ш. и 44–60° з. д. (рис. 2). Район охватывает область циклонического круговорота моря Лабрадор, включая

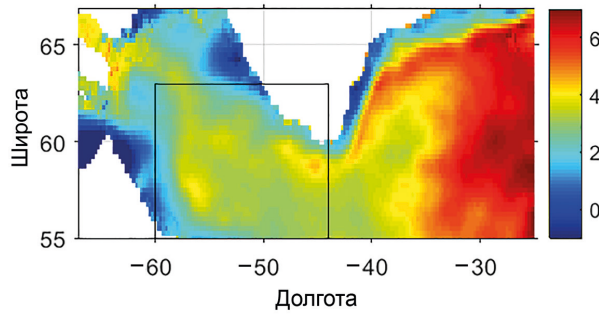


Рис. 2. Карта распределения температуры воды (°C) на глубине 100 м в марте 1996 г. по данным массива ARMOR. Прямоугольником обозначен район, по которому проводилось пространственное осреднение

область глубокой конвекции и формирования лабладорской водной массы (Фалина и др., 2017, Федоров и др., 2018).

Температура и соленость воды брались по данным массива комбинированных *in-situ* и спутниковых наблюдений ARMOR-3D¹ (рис. 2). В этом массиве четырехмерные поля термохалинных характеристик приводятся на регулярной сетке с горизонтальным разрешением $1/4^\circ$, на стандартных океанографических горизонтах и с разрешением во времени 1 месяц (Larnicol et al, 2006; Nardelli et al, 2012). Источниками данных являются:

- 1) профили температуры (T) и солености (S), полученные с буев ARGO, CTD-зондов, батитермографов ХВТ, метеобуев и других платформ (данные из базы наблюдений the World Ocean Data Base, а также других массивов);
- 2) аномалии уровня моря, полученные по данным спутниковой альтиметрии с пространственным разрешением $1/4^\circ$ (the SSALTO/DUACS center);
- 3) температура верхнего перемешанного слоя океана (ТПО) по данным спутниковых и натуральных наблюдений реанализа Reynolds с пространственным разрешением 1° .

Временной интервал массива ARMOR-3D ограничен снизу началом качественных наблюдений спутниковых альтиметров (т.е. 1993 г.).

Разработчики массива ARMOR-3D получили трехмерные поля температуры и солености в узлах регулярной сетки в два этапа. Во-первых, были найдены регрессионные зависимости температуры и солености на разных горизонтах от аномалий ТПО и уровня моря. Для этого использовались подспутниковые наблюдения температуры и солености *in situ*. Указанные зависимости использовались для построения «синтетических» профилей температуры и солености в каждой точке регулярной сетки до глубины 1500 м. Во-вторых, «синтетические» и определенные *in situ* вертикальные профили температуры и солености совместно интерполируются методом оптимальной интерполяции в точки регулярной сетки. При этом весовые коэффициенты каждого профиля обратно пропорциональны рассчитанным ошибкам определения термохалинных характеристик в профиле данного типа (для

¹ См. <http://marine.copernicus.eu/> (дата обращения 20.01.19).

профилей, полученных *in situ*, ошибки меньше, чем для «синтетических»), а также зависят от расстояния между профилем и узлом сетки. Преимущество данного массива перед результатами оптимальной интерполяции только с использованием полученных *in situ* вертикальных профилей в верхнем слое океана состоит в дополнительном привлечении спутниковой информации. Так, в работе (Larnicol et al., 2006) утверждается, что при использовании данного метода точность реконструкции полей температуры увеличивается в среднем на 25 %.

Для расчета теплосодержания верхнего слоя океана мы использовали стандартную формулу (Björk et al., 2001):

$$Q = \rho C_p (T - T_{ref}) dz,$$

где $\rho = 1027 \text{ кг/м}^3$ — плотность воды, $C_p = 4200 \text{ (Дж/кг}^\circ\text{C)}$ — удельная теплоемкость воды, T — температура, $^\circ\text{C}$; dz — толщина слоя, м. В качестве базовой температуры (T_{ref}) бралась температура замерзания морской воды, равная $-1,8^\circ\text{C}$.

Содержание пресной воды рассчитывалось по следующей формуле (Björk et al., 2001):

$$F = \frac{S_{ref} - S}{S_{ref}} dz,$$

где $S_{ref} = 35$, S — соленость воды в слое.

Ежемесячные значения NAOI и AMOI были загружены с сайтов NOAA². Индекс AOOI был загружен с сайта океанографического института Вудс-Холл³. Для последнего индекса приводятся только среднегодовые значения.

Результаты

В среднем по району исследования сезонная изменчивость температуры воды на поверхности моря (рис. 3, а) имеет выраженный максимум в августе, когда наблюдается максимальное количество приходящей солнечной радиации. На 100 м и глубже максимум температуры смещается по времени к ноябрю — декабрю и выражен слабо. Минимумы температуры на всех глубинах приходятся на март — апрель — период максимального развития глубокой конвекции (Федоров и др., 2018). Впрочем, на глубине 500 м температура продолжает едва заметно понижаться вплоть до июня. Амплитуда сезонных колебаний температуры на поверхности составляет $5,72^\circ\text{C}$, резко уменьшается до $1,48^\circ\text{C}$ на горизонте 100 м, и на горизонте 500 м составляет $0,3^\circ\text{C}$. Сезонные изменения солености воды (рис. 3, б) на поверхности имеют противоположный ход: максимум приходится на март, а минимум — на август. Этот ход согласуется с сезонной динамикой выноса пресной воды из Арктики (Serreze et al., 2006), которая, прежде всего, определяет динамику солености поверхности субполярных морей северной Атлантики (Peterson et al., 2006). На горизонте 200 м и глубже сезонный ход незначителен и практически синфазен сезонному ходу температуры, что связано с распреснением подповерхностных слоев

² См. <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/> (дата обращения 20.01.19) и <https://www.esrl.noaa.gov/> (дата обращения: 20.01.19).

³ См. (<http://www.whoi.edu/>) (дата обращения 20.01.19).

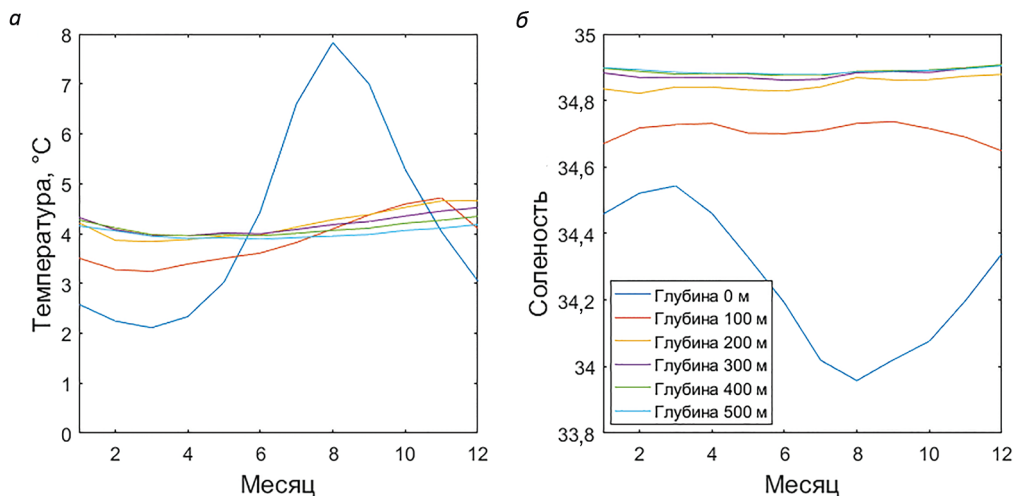


Рис. 3. Сезонный ход температуры воды (а) и солёности воды (б) на разных горизонтах

в результате глубокой конвекции (Holte et al., 2017). Амплитуда сезонной изменчивости на поверхности составляет 0,59, а на горизонте 500 м уменьшается до 0,03.

В среднем за год температура воды практически не меняется с глубиной (табл. 1). При этом летом вертикальные градиенты температуры и солёности свидетельствуют об устойчивой стратификации вод, зимой и весной наблюдается инверсия температуры и ослабление градиента солёности, что позволяет предположить регулярное развитие конвекции в верхнем 500-метровом слое. Среднеквадратическое отклонение убывает с глубиной как для температуры, так и для солёности, что характерно для формирования аномалий межгодовой изменчивости температуры и солёности на поверхности моря и дальнейшем их распространении вниз. Например, на поверхности (горизонте 0 м) наибольшая среднегодовая температура воды наблюдалась в 2010 г., что связано с аномально жарким летом, тогда как на горизонте 500 м максимум температуры воды сместился по времени на 2011 г. рис. 4, а. В то же время уменьшение температуры водыв период после 2011 г. на горизонте 500 м наблюдается во все сезоны, а на поверхности — в основном зимой. Подобная межгодовая изменчивость характерна для развития конвекции в результате выхолаживания приповерхностного слоя при аномально низких зимних температурах воздуха.

Графики межгодовой изменчивости температуры воды показывают общее повышение температуры во времени как в среднегодовом выражении, так и по всем четырем сезонам и на всех горизонтах в пределах верхнего 500-метрового слоя (рис. 4, а, и табл. 2). Линейный тренд составил 1,29°C за 24 года на поверхности моря, и 0,26°C — на горизонте 500 м. Наибольший рост температуры воды прослеживается на поверхности в июле — сентябре. Солёность также увеличивается во времени, за исключением зимних месяцев (см. рис. 4, б и табл. 2). Доверительные интервалы угла наклона (b_1) линейных трендов ($\hat{y} = b_1x + b_0$) оценивались как (Emery and Thomson, 2001):

$$b_1 \pm \frac{(S_y t_{95, N-1})}{(N-1)^{1/2} S_x},$$

где $t_{95, N-1}$ — значение распределения Стьюдента при уровне значимости 95 % и при $N - 1$ степенях свободы, где N — длина ряда;

$$s_y = \left[\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \right]^{(1/2)} ;$$

$$s_x = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right]^{(1/2)} ,$$

\bar{x} — среднее значение.

Таблица 1. Среднеклиматические значения температуры (Т, °С), и солености (S) воды в море Лабрадор и стандартные отклонения (std) характеристик рассчитанные после удаления линейного тренда.

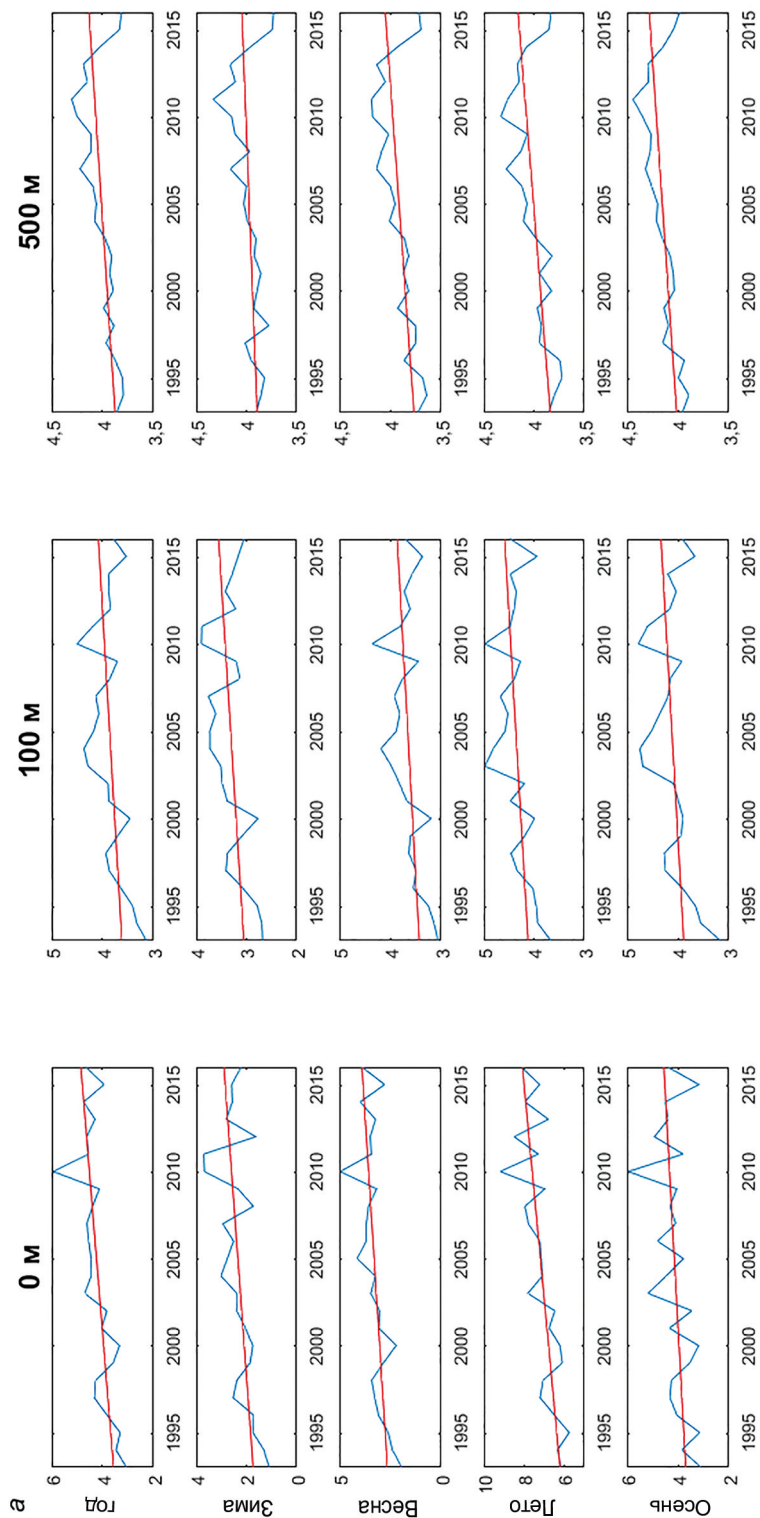
Горизонт, м	Параметр	Среднегодовое	Январь — март	Апрель — июнь	Июль — сентябрь	Октябрь — декабрь
0 м	T ± std	4,21 ± 0,55	2,31 ± 0,55	3,26 ± 0,52	7,14 ± 0,60	4,12 ± 0,64
	S ± std	34,26 ± 0,09	34,51 ± 0,08	34,18 ± 0,10	34,02 ± 0,14	34,33 ± 0,10
Горизонт, м		Среднегодовое	Февраль — апрель	Май — июль	Август — октябрь	Ноябрь — январь
100 м	T ± std	3,85 ± 0,30	3,30 ± 0,33	3,65 ± 0,28	4,35 ± 0,30	4,11 ± 0,37
	S ± std	34,71 ± 0,03	34,73 ± 0,03	34,07 ± 0,03	34,73 ± 0,04	34,67 ± 0,04
500 м	T ± std	4,01 ± 0,13	3,97 ± 0,14	3,91 ± 0,14	4,00 ± 0,14	4,15 ± 0,12
	S ± std	34,89 ± 0,01	34,89 ± 0,01	34,88 ± 0,01	34,89 ± 0,01	34,90 ± 0,01

Большинство трендов в температуре воды были значимы, тогда как тренды солености почти все оказались незначимы (табл. 2). Но одинаковый знак трендов на всех горизонтах и в большинство сезонов позволяет говорить об объективности тенденций роста солености, несмотря на малость трендов этого параметра по сравнению с его межгодовой изменчивостью.

Среднегодовые значения теплосодержания в верхнем 500-метровом слое (рис. 5, а), с 1993 по 2010 г. увеличились с $1,18 \cdot 10^{10}$ до $1,39 \cdot 10^{10}$ Дж·м⁻² (т. е. на 18 %), после чего началось его уменьшение. Линейный тренд теплосодержания за весь период наблюдений был положительным и значимым, а максимум квадратичного тренда достигался в 2006–2007 гг. В интегральном содержании пресной воды (рис. 5, б) наблюдается значимый отрицательный линейный тренд при минимуме квадратичного тренда в те же годы — 2006–2007. За период наблюдений максимум теплосодержания и минимум содержания пресной воды приходились на 2010 г. После удаления квадратичного тренда характеристики межгодовой изменчивости теплосодержания и содержания пресной воды по-прежнему показывают достаточно высокую отрицательную корреляцию (–0,56). Отрицательная корреляция характеристик возможна и за счет усиления теплообмена с атмосферой (например, при

дополнительном прогреве), и за счет изменения интенсивности адвекции субтропических и/или полярных вод в море Лабрадор. Тренды в NAOI (рис. 5, в) соответствуют трендам содержания пресной воды, а экстремумы часто соответствуют экстремумам содержания пресной воды (с тем же знаком) и теплосодержания (с противоположным знаком). Так, 2010 г. выделяется в NAOI, как период экстремально низких значений индекса. Это позволяет предположить, что причиной аномально теплой и соленой воды в море Лабрадор в этот год является смещению к западу оси юго-западного переноса в тропосфере, которое в период низких NAOI проходит через центральную и восточную части моря Лабрадор. Корреляция зимнего NAOI (январь — март) с теплосодержанием ($-0,64$) и с содержанием пресной воды ($0,46$) являются значимыми. Квадратичные и линейные тренды, аналогичные соответствующим трендам теплосодержания, наблюдаются и в океанических индексах AMOI и AOOI (рис. 5, г). Увеличение индекса AMOI говорит об общем увеличении температуры (и солености) поверхностных вод Северной Атлантики, а увеличение индекса AOOI — об уменьшении стока распресненных и холодных вод из Арктики. Это приводит к увеличению температуры и солености вод, приносимых в море Лабрадор, что соответствует наблюдаемым долгопериодным изменениям теплосодержания и содержания пресной воды (см. рис. 5). В то же время короткопериодная межгодовая изменчивость характеристик верхнего 500-метрового слоя моря Лабрадор слабо коррелирует с этими индексами. При удаленном квадратичном тренде коэффициенты корреляции связи теплосодержания и содержания пресной воды с AOOI составляют $0,16$ и $-0,04$ соответственно. Соответствующие коэффициенты корреляции связи этих характеристик с AMOI несколько выше ($0,38$ и $-0,42$), но также незначимы.

При выделении периодичностей по временным рядам природных параметров, как правило, стоит ожидать неустойчивости амплитуд и периодов доминирующих межгодовых цикличностей. В связи с этим вместо классического Фурье-анализа целесообразно использовать вейвлет-анализ, который позволяет учитывать нестационарность доминирующих цикличностей (Астафьева, 1996; Kumar and Foufoula-Georgiou, 1997). Проведенный вейвлет-анализ исходных рядов с месячной дискретностью показал (рис. 6), что и в теплосодержании, и в содержании пресной воды помимо сезонной изменчивости выделяются циклы продолжительностью 5–8 лет (рис. 6, а и б), а с 2000 г. проявляется также цикл продолжительностью 2–4 года. Интересно, что сезонная изменчивость содержания пресной воды уменьшается после 2000 г., а теплосодержания — наоборот, увеличивается. В ходе изменчивости NAOI, AMOI и AOOI (рис. 6, в—д) также выделяются циклы продолжительностью 2–4 года и 5–8 лет. Амплитуды 2–4-летних циклов (рис. 7) в теплосодержании и в содержании пресной воды увеличиваются с 2009 по 2011 г., одновременно с увеличением амплитуд NAOI и AMOI, тогда как у AOOI амплитуда увеличивается раньше — в 2004–2007 гг. При этом аналогичное, хотя и не столь синхронное увеличение амплитуд NAOI и AMOI в начале периода наблюдений не привело к увеличению амплитуд колебаний теплосодержания и содержания пресной воды в море Лабрадор. Это говорит о неустойчивости возможных связей между индексами и термохалинными характеристиками моря Лабрадор и может быть связано с изменением характера климатического режима северной Атлантики в начале 2000-х гг. (Бышев и др., 2011). Этот вопрос требует дополнительного исследования.



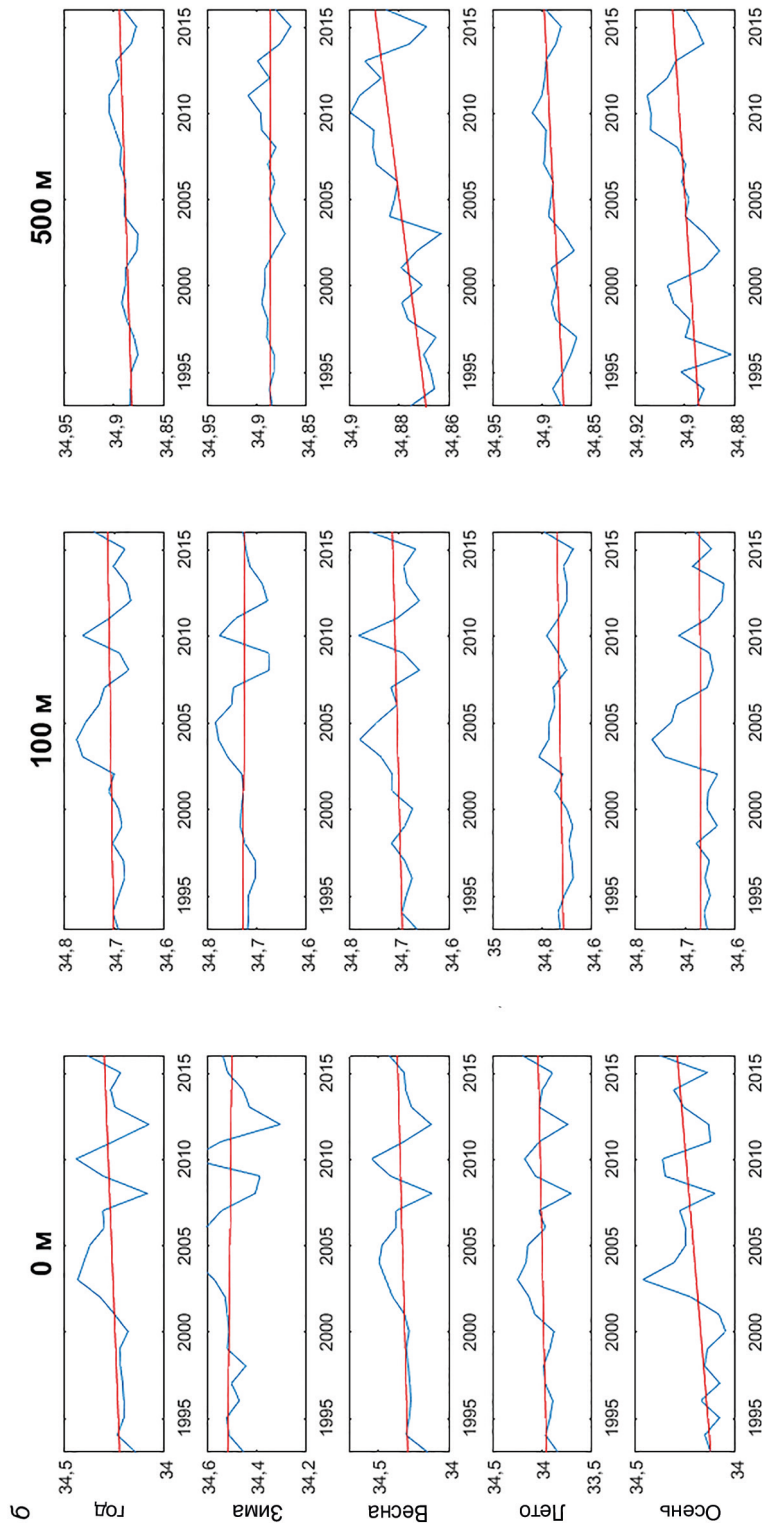


Рис. 4. Сезонная изменчивость температуры ($^{\circ}\text{C}$) (а) и солёности (б) на горизонтах 0, 100 и 500 м.

Зима: февраль — апрель (для горизонта 0 м — январь — март), весна: май — июль (для 0 м апрель — июнь), лето: август — октябрь (для 0 м июль — сентябрь), осень: ноябрь — январь (для 0 м октябрь — декабрь); синяя линия — среднегодовые значения, красная — тренд

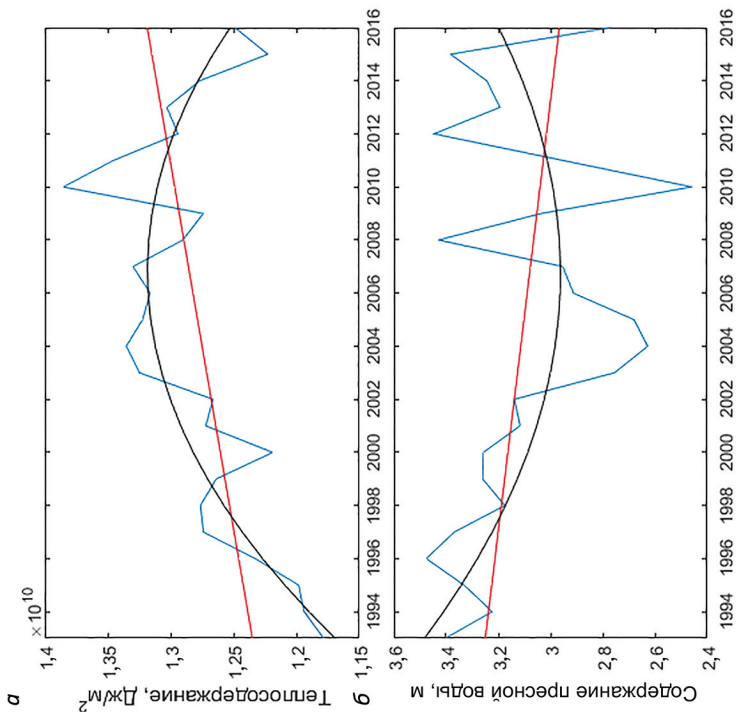
Таблица 2. Значения углового коэффициента линии тренда и пределы ее изменчивости (температура (Т) — °С/год · 10⁻³, соленость (S) — 1/год · 10⁻³)

Горизонт, м	Параметр	Среднегодовые	Январь — март	Апрель — июнь	Июль — сентябрь	Октябрь — декабрь
0	T	55,92 ± 29,42	50,57 ± 34,54	54,42 ± 32,72	81,35 ± 37,49	37,34 ± 39,95
	S	3,31 ± 5,88	-0,72 ± 5,15	3,11 ± 6,51	3,60 ± 8,45	7,23 ± 6,20
Горизонт, м		Среднегодовые	Февраль — апрель	Май — июль	Август — октябрь	Ноябрь — январь
100	T	20,10 ± 18,85	21,86 ± 20,46	18,78 ± 17,72	20,33 ± 18,66	19,43 ± 22,95
	S	0,51 ± 1,95	-0,17 ± 1,88	0,86 ± 2,13	1,19 ± 2,38	0,14 ± 2,30
500	T	11,13 ± 8,04	6,68 ± 8,69	12,27 ± 8,87	13,92 ± 8,95	11,66 ± 7,43
	S	0,54 ± 0,45	-0,04 ± 0,56	0,88 ± 0,51	0,86 ± 0,56	0,45 ± 0,47

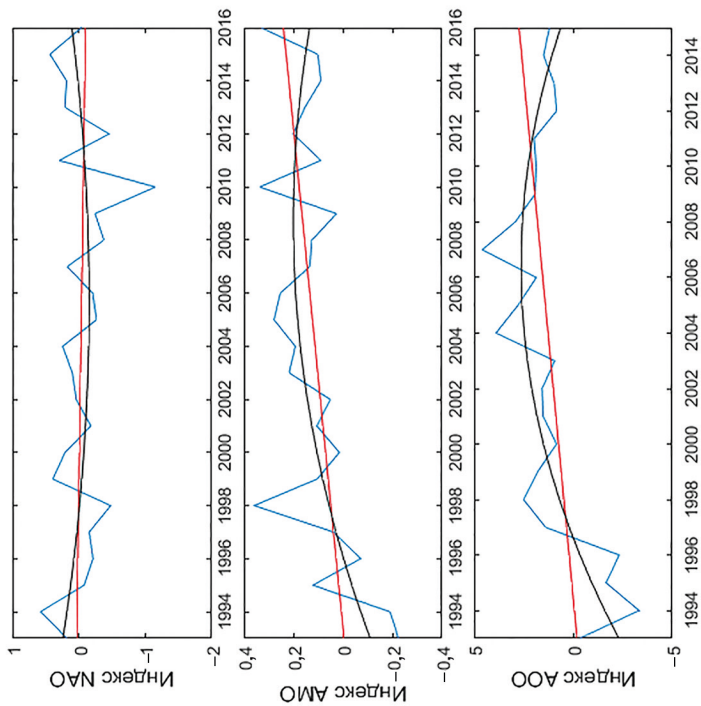
Кросс-вейвлет-анализ теплосодержания и NAOI (рис. 8, а) показывает высокую когерентность для циклов 2 года и 5–8 лет. Значимая когерентность на периодах сезонной изменчивости проявляется только в годы повышенных значений амплитуд сезонного хода NAOI. Практически на всех периодах наблюдается запаздывание колебаний NAOI на четверть периода по сравнению с колебаниями теплосодержания. Можно предположить, что как NAOI влияет на теплосодержание, так и теплосодержание в море Лабрадор опосредовано влияет на индекс NAOI (Gnaniuk et al., 2018). В содержании пресной воды также прослеживаются когерентность с NAOI, но только на 7–8 летних циклах с близкой к 0 разностью фаз. Связь теплосодержания/содержания пресной воды с AMOI прослеживается, прежде всего, на 5–8-летних периодах. Связь на 2–4-летних периодах стала проявляться к концу интервала наблюдений, когда выросли амплитуды циклических колебаний теплосодержания/содержания пресной воды (рис. 6 и 7). На 5–8-летних циклах AMOI практически синфазно меняется с теплосодержанием, а для циклов продолжительностью 2–4 года и сезонных циклов AMOI опережает теплосодержание примерно на 1/8 периода. Когерентность рассматриваемых характеристик океана с AOOI практически отсутствует.

Обсуждение и выводы

В данной работе сделан анализ изменения теплосодержания и содержания пресной воды в приповерхностных слоях моря Лабрадор по данным массива ARMOR-3D. Установлено, что в верхнем 500-метровом слое вод моря Лабрадор теплосодержание и содержание соли в целом увеличиваются с 1993 г., возможно, представляя собой часть цикличности большего периода (около 30 лет). Для показателей на более глубоких горизонтах угловые коэффициенты линии тренда уменьшаются. Это может свидетельствовать о значительной роли тепло/влагообмена океана и атмосферы, а также об изменчивости приповерхностной океанической



в



з

д

Рис. 5. Межгодовая изменчивость:

a — теплоемкость, *б* — содержание пресной воды, *в* — NAOI, *г* — AMOI, *д* — AOOI, *з* — среднегодовые значения, красная и черная — линейный и квадратичный тренд соответственно

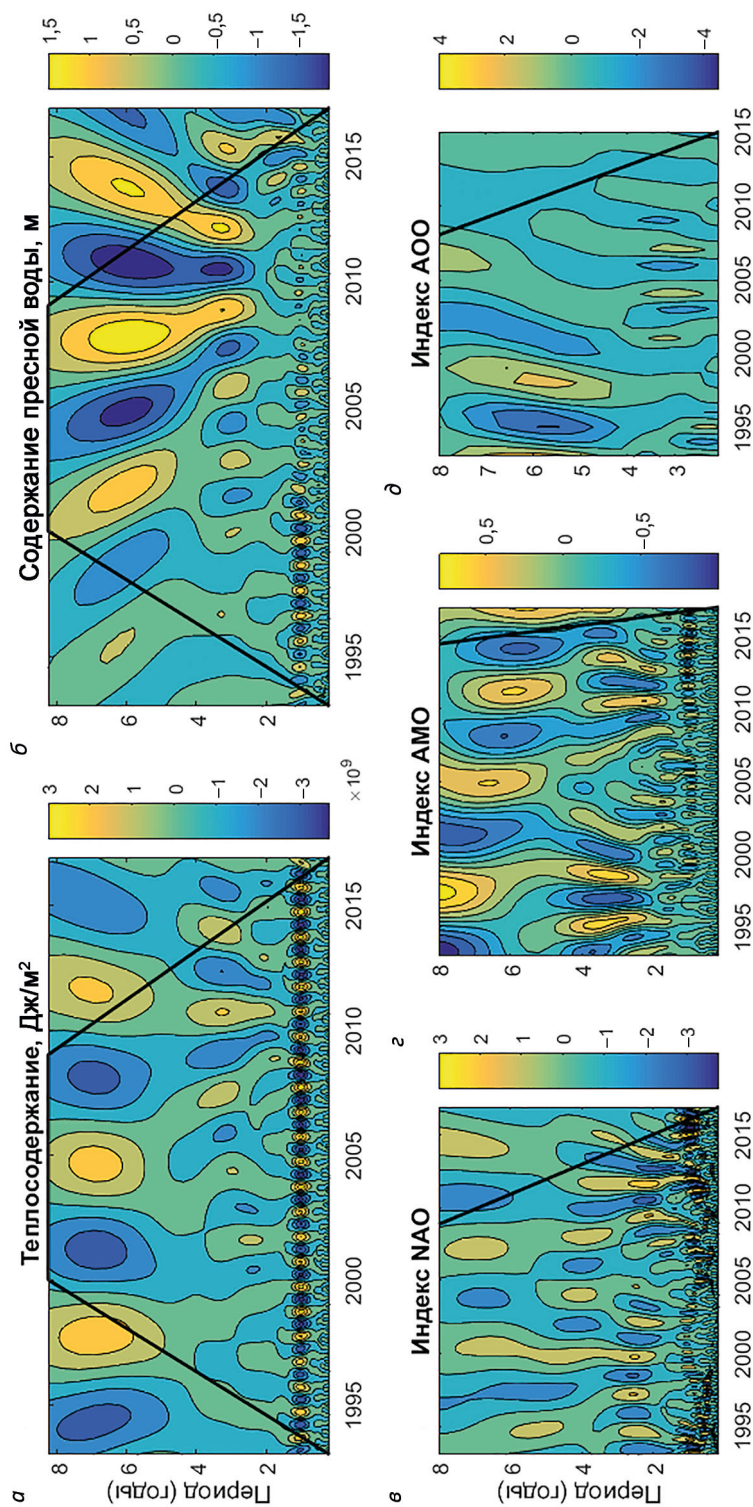


Рис. 6. Результаты вейвлет-анализа:

a — теплосодержания, *б* — содержания пресной воды, *в* — NAOI, *г* — AMOI, *д* — AOOI. На графиках *a* — *г* проанализированы ряды с исходной месячной дискретностью, на графике *д* — с исходной годовой дискретностью; черные линии — треугольники достоверности

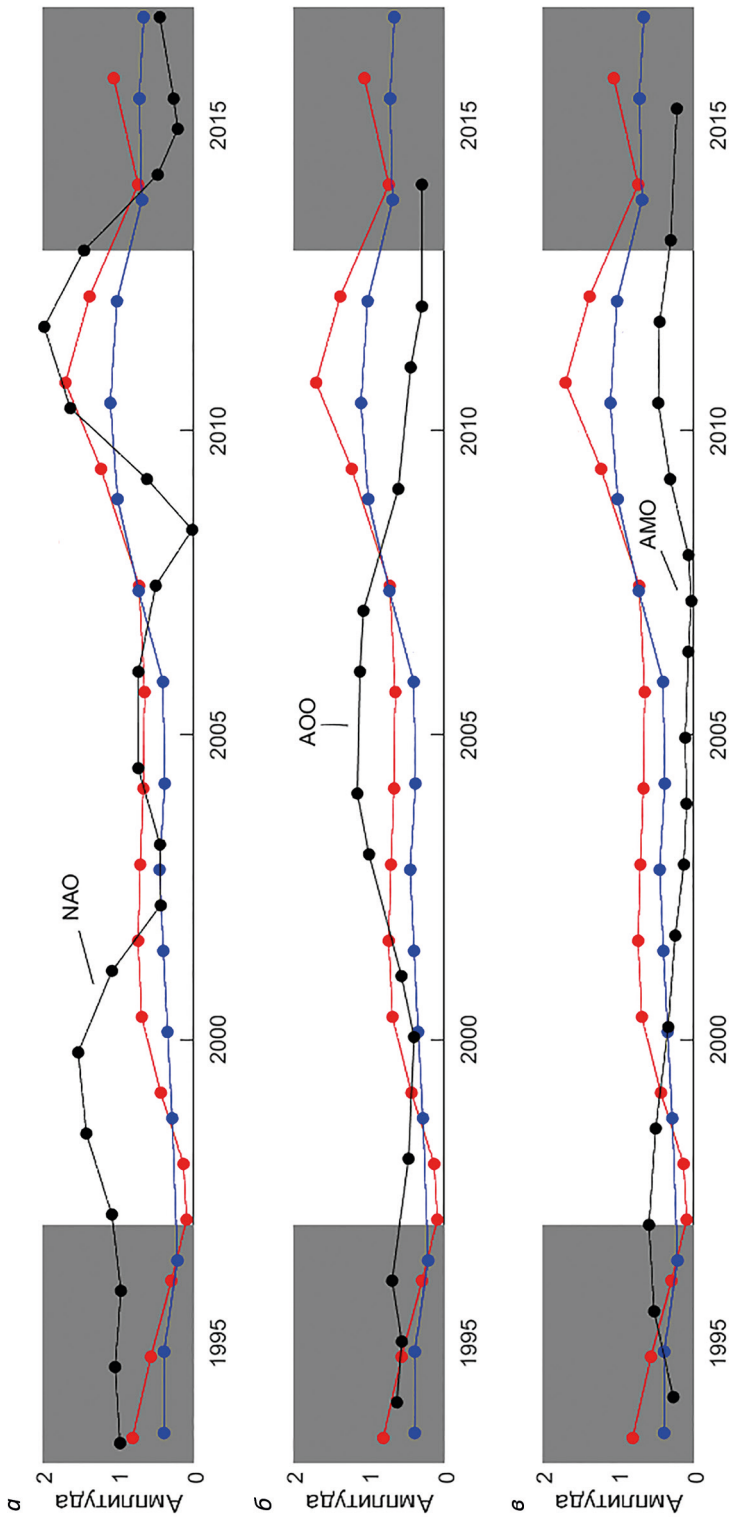


Рис. 7. Нормированные экстремумы модулей значений амплитуд для 2–4-летних циклов:

а — б — соответственно индексы NAOI, AOOI и AMOI; красная линия — теплосодержание; синяя — содержание пресной воды; серым обозначены периоды, выходящие за пределы треугольника достоверности

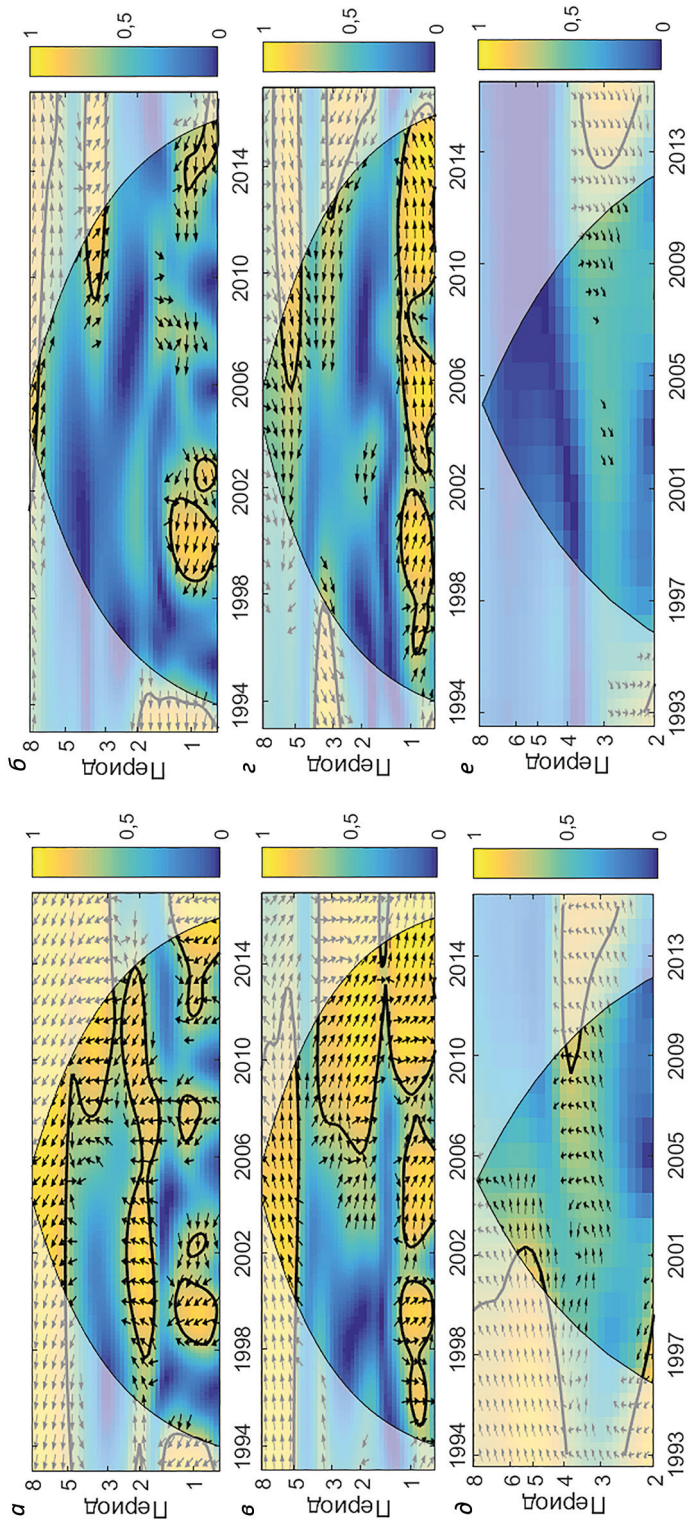


Рис. 8. Вейвлет-когерентности:

а — теплосодержания и NAO, б — содержания пресной воды и NAO, в — теплосодержания и AMO, г — содержания пресной воды и AMO, д — теплосодержания и AOO, е — содержания пресной воды и AOO

адвекции термохалинных характеристик, которую характеризуют наблюдаемые тренды теплосодержания и содержания пресной воды.

Выделенные нами тенденции (рис. 5, *a—b*) согласуются с расчетами характера изменчивости теплового (Barrier et al., 2015) и пресноводного (Serreze et al., 2006; Myers et al., 2007; Haine et al., 2015) балансов арктического и субарктического регионов, выполненных другими авторами. Согласно этим расчетам, изменение характера атмосферной циркуляции ведет к уменьшению теплоотдачи в атмосферу в море Лабрадор, а также региональной конвергенции океанических потоков тепла (Barrier et al., 2015). Параллельное увеличение индекса АМОИ к середине 2000-х гг. (и его дальнейшее снижение после 2007–2008 гг.) говорит об увеличении (и дальнейшем уменьшении) температуры и солёности субтропических вод, поступающих в море Лабрадор с течением Ирмингера и его продолжением. В пресноводном балансе региона значительное снижение пресного стока из Арктики с 1980–1990-х до 2000-х гг. (и за счет увеличения солёности полярных вод, и за счет уменьшения выноса льда) не компенсируется некоторым увеличением количества осадков в субполярных морях (Serreze et al., 2006; Myers et al., 2007; Haine et al., 2015), что приводит к наблюдаемому уменьшению содержания пресной воды в приповерхностных слоях моря. Совместно, эти процессы объясняют наблюдаемые внутrideкадные тенденции изменения теплосодержания и содержания пресной воды в верхнем 500-метровом слое (см. рис. 4 и 5).

С 1990 по 1995 гг. происходило интенсивное формирование «классической» ЛВМ, когда конвекция достигала глубин 2000–2500 м, в то время как в начале 2000-х гг. наблюдалось формирование только легкой фракции ВЛВМ, когда глубина конвекции не превышала 1000–1500 м (Yashayaev, 2007). Так как межгодовые колебания интегрального теплосодержания и содержания пресной воды в верхних слоях моря будут характеризовать изменение общего количества плавучести, которое необходимо «изъять» в зимний период, то можно ожидать связи интенсивности конвекции с изменчивостью исследуемых характеристик океана. Однако, в отличие от плавного хода показателей количества тепла и пресной воды в верхнем 500-метровом слое в начале 2000-х гг., интенсивность конвекции в этот период изменялась скачкообразно. Возможно, это связано с более резким изменением тепло- и влагообмена с атмосферой в зимний период развития конвекции.

На меньших интервалах времени, при удаленном тренде, высокая отрицательная корреляция теплосодержания и содержания пресной воды говорит о связанности этих характеристик также на масштабах их межгодовой изменчивости. На этих временных масштабах получены достаточно высокие корреляции обеих характеристик с индексом NAOI. Несколько меньшие корреляции содержания пресной воды с индексом NAOI можно объяснить тем, что локальное испарение и потоки пресной воды из Арктики связаны с индексом NAOI, а режим осадков слабо связан с этим индексом (Myers et al., 2007).

Вейвлет-анализ теплосодержания и пресной воды позволяет выделить два доминирующих межгодовых цикла:

- 1) продолжительностью 5–8 лет (в течение всего периода наблюдений),
- 2) продолжительностью 2–4 года (с 2000 г.).

Аналогичные циклы выделяются в индексе NAOI. Вейвлет-когерентность показала значимость связи для циклов продолжительностью 5–8 лет и 2 года. Это

подтверждает наличие связи изменчивости термохалинных характеристик моря Лабрадор с NAOI. Существенной связи межгодовой изменчивости термохалинных характеристик вод с индексами AMOI и AOOI не обнаружено.

Характер связи термохалинных характеристик верхнего слоя моря Лабрадор с NAOI может иметь двоякий характер. При положительном индексе NAOI струйный поток и основные шторма проходят к юго-западу от моря. При отрицательном индексе NAOI струйный поток западных ветров ослабевает и проходит над морем Лабрадор, принося туда теплый влажный воздух с юга; здесь увеличивается число штормов (Hurrell and Deser, 2010). Отдача тепла верхними слоями моря Лабрадор, в целом, уменьшается (Barrier et al., 2015), а количество осадков несколько увеличивается. Ослабление атмосферной циркуляции приводит к уменьшению интенсивности субтропического и субполярного океанических круговоротов. При этом адвекция океанического тепла и соли через срединно-океанический хребет Рейкьянес в море Ирмингера растет, а вынос холодной распресненной воды через Датский пролив уменьшается (Barrier et al., 2015). Суммарно эти процессы ведут к увеличению температуры и солености (уменьшению содержания пресной воды) поверхностных вод при отрицательном индексе NAOI, что проявляется в отрицательном (положительном) знаке коэффициентов корреляции связи индекса NAOI и теплосодержания (содержания пресной воды) верхнего слоя, а также во взаимном ходе линейных и квадратичных трендов.

Однако путем кросс-вейвлет-анализа выявлено, что изменчивость индекса NAOI запаздывает на 1/4 периода по сравнению с теплосодержанием и для 2-, и для 5–8-летних циклов. В работе (Gnaniuk et al., 2018) было показано, что уменьшение температуры моря Лабрадор может формировать структуру поля давления, похожую на положительную фазу NAOI. Вышесказанное позволяет выдвинуть гипотезу о наличии положительной связи температуры приповерхностных вод моря Лабрадор и структуры поля давления над Северной Атлантикой, которое осуществляется через формирование локальных аномалий потоков тепла и изменения характера меандрирования струйного субтропического потока западных ветров.

Литература

- Астафьева, Н. М., 1996. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. Успехи физических наук, 166(11), 1145–1170.
- Бышев, В. И., Нейман, В. Г., Романов, Ю. А., Серых, И. В., 2011. О фазовой изменчивости некоторых характеристик современного климата в регионе Северной Атлантики. Доклады Академии Наук 438(6). 817–822
- Фалина, А. С., Сарафанов, А. А., Добролюбов, С. А., Запотылько, В. С., Гладышев, С. В., 2017. Конвекция и стратификация вод на севере Атлантического океана по данным измерений зимой 2013/14 гг. Вестник Моск. ун-та 5(4), 45–54.
- Федоров, А. М., Башмачников И. Л., Белоненко Т. В., 2018. Локализация областей глубокой конвекции в морях Северо-Европейского бассейна, Лабрадор и Ирмингера, Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле 63(3), 354–362.
- Buckley, M. W., Marshall, J., 2016. Observations, inferences, and mechanisms of Atlantic Meridional Overturning Circulation variability: A review. Reviews of Geophysics 54, 5–63.
- Barrier, N., Deshayes, J., Treguier, A. M., Cassou, C., 2015. Heat budget in the North Atlantic subpolar gyre: Impacts of atmospheric weather regimes on the 1995 warming event. Progress in Oceanography 130, 75–90.

- Bashmachnikov, I., Belonenko, T. V., Koldunov, A. V.*, 2013. Intra-annual and interannual non-stationary cycles of chlorophyll concentration in the Northeast Atlantic. *Remote Sensing of Environment* 137, 55–68.
- Bingyi, W., Jia, W.*, 2002. Possible impacts of winter Arctic Oscillation on Siberian high, the East Asian winter monsoon and sea-ice extent. *Advances in Atmospheric Sciences* 19(2), 297–320.
- Björk, G., Gustafsson, B. G., Stigebrandt, A.*, 2001. Upper layer circulation of the Nordic seas as inferred from the spatial distribution of heat and freshwater content and potential energy. *Polar Research* 20(2), 161–168.
- Brambilla, E., Talley, L. D., Robbins, P. E.*, 2008. Subpolar Mode Water in the northeastern Atlantic: 2. Origin and transformation. *Journal of Geophysical Research* 113(C4). URL: <https://doi.org/10.1029/2006JC004063>.
- Chanut, J., Barnier, B., Large, W., Debreu, L., Penduff, T., Molines, J. M., Mathiot, P.*, 2008. Mesoscale eddies in the Labrador Sea and their contribution to convection and restratification. *Journal of Physical Oceanography* 38(8), 1617–1643.
- Curry, R. G., McCartney, M. S.*, 1996. Labrador sea water carries northern climate signal south. *Oceanus-Woods Hole Mass.* 39, 24–28.
- Drinkwater, K. F., Miles, M., Medhaug, I., Ottera, O. H., Kristiansen, T., Sundby, S., Gao, Y.*, 2014. The Atlantic Multidecadal Oscillation: Its manifestations and impacts with special emphasis on the Atlantic region north of 60 N. *Journal of Marine Systems* 133, 117–130.
- Emery, W. J., Thomson, R. E.*, 2001. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier. Amsterdam. 1–634.
- Gnatuik, N., Vihma, T., Bobylev, L.*, 2018. Inter-seasonal teleconnections between Earth surface temperature and near-surface air temperature. POLAR-2018 (A SCAR IASC Conference), 15–26.05.2018, Davos, Switzerland.
- Haine, T. W., Curry, B., Gerdes, R., Hansen, E., Karcher, M., Lee, C., Rudels, B., Spreen, G., de Steur, L., Stewart, K. D., Woodgate, R.*, 2015. Arctic freshwater export: status, mechanisms, and prospects. *Global and Planetary Change* 125, 13–35.
- Holte, J., Straneo, F.*, 2017. Seasonal overturning of the Labrador Sea as observed by Argo floats. *Journal of Physical Oceanography* 47(10), 2531–2543.
- Hurrell, J. W., Deser, C.*, 2010. North Atlantic climate variability: the role of the North Atlantic Oscillation. *Journal of Marine Systems* 79(3–4), 231–244.
- Jenkins, W. J., Smethie, W. M., Boyle, E. A., Cutter, G. A.*, 2015. Water mass analysis for the US GEOTRACES (GA03) North Atlantic sections. *Deep Sea Research II* 116, 6–20.
- Jevrejeva, S., Moore, J. C., Grinsted, A.*, 2003. Influence of the Arctic Oscillation and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: The wavelet approach. *Journal of Geophysical Research* 108(D21). URL: <https://doi.org/10.1029/2003JD003417>.
- Khatiwalala, S., Schlosser, P., Visbeck, M.*, 2002. Rates and mechanisms of water mass transformation in the Labrador Sea as inferred from tracer observations. *Journal of Physical Oceanography* 32(2), 666–686.
- Kumar, P., Foufoula-Georgiou, E.*, 1997. Wavelet analysis for geophysical applications. *Reviews of Geophysics* 35(4), 385–412.
- Larnicol, G., Guinehut, S., Rio, M. H., Drevillon, M., Faugere, Y., Nicolas, G.*, 2006. The global observed ocean products of the French Mercator project. *Proceedings of the Symposium on 15 Years of Progress in Radar Altimetry*, 13–18 March 2006, Venice, Italy.
- McCartney, M. S., Talley, L. D.*, 1982. The subpolar mode water of the North Atlantic Ocean. *Journal of Physical Oceanography* 12(11), 1169–1188.
- Myers, P. G., Josey, S. A., Wheler, B., Kulan, N.*, 2007. Interdecadal variability in Labrador Sea precipitation minus evaporation and salinity. *Progress in Oceanography* 73(3–4), 341–357.
- Nardelli, B., Guinehut, S., Pascual, A., Drillet, Y., Ruiz, S., Mulet, S.*, 2012. Towards high resolution mapping of 3-D mesoscale dynamics from observations. *Ocean Science* 8(5), 885–901.
- Peterson, B. J., McClelland, J., Curry, R., Holmes, R. M., Walsh, J. E., Aagaard, K.*, 2006. Trajectory shifts in the Arctic and subarctic freshwater cycle. *Science* 313(5790), 1061–1066.
- Pozo-Vazquez, D., Esteban-Parra, M. J., Rodrigo, F. S., Castro-Diez, Y.*, 2000. An analysis of the variability of the North Atlantic Oscillation in the time and the frequency domains. *International Journal of Climatology* 20, 1675–1692.
- Proshutinsky, A., Dukhovskoy, D., Timmermans, M. L., Krishfield, R., Bamber, J. L.*, 2015. Arctic circulation regimes. *Philosophical Transactions of Royal Society A* 373(2052), 20140160.

- Rhein, M., Kieke, D., Hüttl-Kabus, S., Roessler, A., Mertens, C., Meissner, R., Klein, B., Boning, C. W., Yashayaev, I., 2011. Deep water formation, the subpolar gyre, and the meridional overturning circulation in the subpolar North Atlantic. *Deep Sea Research II* 58(17), 1819–1832.
- Serreze, M. C., Barrett, A. P., Slater, A. G., Woodgate, R. A., Aagaard, K., Lammers, R. B., Steele, M., Moritz, R., Meredith, M., Lee, C. M., 2006. The large-scale freshwater cycle of the Arctic. *Journal of Geophysical Research* 111(C11). URL: <https://doi.org/10.1029/2005JC003424>
- Stramma, L., Kieke, D., Rhein, M., Schott, F., Yashayaev, I., Koltermann, K. P., 2004. Deep water changes at the western boundary of the subpolar North Atlantic during 1996 to 2001. *Deep Sea Research I* 51(8), 1033–1056.
- Yashayaev, I., 2007. Hydrographic changes in the Labrador Sea, 1960–2005. *Progress in Oceanography* 73, 242–276.
- Yashayaev, I., Clarke, A., 2008. Evolution of North Atlantic water masses inferred from Labrador Sea salinity series. *Oceanography* 21(1), 30–45.
- Yashayaev, I., Seidov, D., Demirov, E., 2015. A new collective view of oceanography of the Arctic and North Atlantic basins. *Progress in Oceanography* 132, 1–21.

Статья поступила в редакцию 7 августа 2018 г.
Статья рекомендована в печать 7 декабря 2018 г.

Контактная информация:

Яковлева Диана Андреевна — dianayak47@mail.ru
Башмачников Игорь Львович — igorb1969@mail.ru

Interannual variations of heat and freshwater contents in the cold water dome of the Labrador Sea

D. A. Iakovleva¹, I. L. Bashmachnikov^{1,2}

¹ Saint Petersburg State University,
7–9, Universitetskaya nab., Saint Petersburg, 199034, Russian Federation

² Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre,
7, 14th Line V.O., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

For citation: Iakovleva, D. A. Bashmachnikov I. L. (2019). Interannual variations of heat and freshwater contents in the cold water dome of the Labrador Sea. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 64 (1), 136–158. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.108> (In Russian)

In this paper, we investigate the interannual variability of heat content and freshwater content in the Labrador Sea using ARMOR-3D data-set (1993–2016), which combines in situ and satellite observations. Significant trends of increasing the heat content and of decreasing the freshwater content in the upper 500th layer were detected. With the depth the slope coefficients of the trends decrease, which suggests the upper ocean origin of the processes, forming the observed tendencies. On interannual scales (after removal of the trends), negative correlation between these characteristics were obtained, which can be formed by the intensification of the ocean-atmosphere heat/freshwater exchange, as well as by intensification of oceanic advection of polar and/or subtropical water in the Labrador Sea. The interannual variability in the heat and freshwater content is dominated by 2–4 years and 5–8 years cycles. Significant correlation of the heat/freshwater content with the North Atlantic Oscillation Index (NAOI) is obtained. For the 2-year and 5–8 year cycles, the high coherence between the heat content and the NAOI is detected. For the 2-year it is found a delay of NAOI by a quarter of the period relative to the heat content, interpreted as the reverse effect of the Labrador Sea water temperature on the

phase/intensity of NAOI. For 5–8-year cycles, the high coherence between the variations in the heat content and the Atlantic Multidecadal oscillation index (AMOI, characterizing the mean temperature of the North Atlantic) is detected with practically zero phase shift. After the beginning of 2000, the certain coherence with the AMOI was observed also for the 2–4-year cycles. At these time scales, AMOI leads the variations in the heat content in the sea.

Keywords: the Labrador Sea, heat content, freshwater content, the North Atlantic Oscillation, the Atlantic Multidecadal oscillation.

References

- Astafieva, N. M., 1996. Veivlet-analiz: osnovy teorii i primery primeneniia [Wavelet analysis: basic theory and some applications]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* 166(11), 1145–1170. (In Russian)
- Barrier, N., Deshayes, J., Treguier, A. M., Cassou, C., 2015. Heat budget in the North Atlantic subpolar gyre: Impacts of atmospheric weather regimes on the 1995 warming event. *Progress in Oceanography* 130, 75–90.
- Bashmachnikov, I., Belonenko, T. V., Koldunov, A. V., 2013. Intra-annual and interannual non-stationary cycles of chlorophyll concentration in the Northeast Atlantic. *Remote Sensing of Environment* 137, 55–68.
- Bingyi, W., Jia, W., 2002. Possible impacts of winter Arctic Oscillation on Siberian high, the East Asian winter monsoon and sea-ice extent. *Advances in Atmospheric Sciences* 19(2), 297–320.
- Björk, G., Gustafsson, B. G., Stigebrandt, A., 2001. Upper layer circulation of the Nordic seas as inferred from the spatial distribution of heat and freshwater content and potential energy. *Polar Research* 20(2), 161–168.
- Brambilla, E., Talley, L. D., Robbins, P. E., 2008. Subpolar Mode Water in the northeastern Atlantic: 2. Origin and transformation. *Journal of Geophysical Research* 113(C4). URL: <https://doi.org/10.1029/2006JC004063>.
- Buckley, M. W., Marshall, J., 2016. Observations, inferences, and mechanisms of Atlantic Meridional Overturning Circulation variability: A review. *Reviews of Geophysics* 54, 5–63.
- Buongiorno Nardelli, B., Guinehut, S., Pascual, A., Drillet, Y., Ruiz, S., Mulet, S., 2012. Towards high resolution mapping of 3-D mesoscale dynamics from observations. *Ocean Science* 8(5), 885–901.
- Byshev, V. I., Neiman, V. G., Romanov, Y. A., Serykh, I. V., 2011. O fazovoi izmenchivosti nekotorykh kharakteristik sovremennogo klimata v regione Severnoi Atlantiki. [Phase variability of some characteristics of the present-day climate in the northern Atlantic region]. *Doklady Earth Sciences* 438(6), 817–822. (In Russian)
- Chanut, J., Barnier, B., Large, W., Debreu, L., Penduff, T., Molines, J. M., Mathiot, P., 2008. Mesoscale eddies in the Labrador Sea and their contribution to convection and restratification. *Journal of Physical Oceanography* 38(8), 1617–1643.
- Curry, R. G., McCartney, M. S., 1996. Labrador sea water carries northern climate signal south. *Oceanus-Woods Hole Mass.* 39, 24–28.
- Drinkwater, K. F., Miles, M., Medhaug, I., Ottera, O. H., Kristiansen, T., Sundby, S., Gao, Y., 2014. The Atlantic Multidecadal Oscillation: Its manifestations and impacts with special emphasis on the Atlantic region north of 60 N. *Journal of Marine Systems* 133, 117–130.
- Emery, W. J., Thomson, R. E., 2001. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier, Amsterdam, 1–634.
- Falina, A. S., Sarafanov, A. A., Dobrolyubov, S. A., Zapotylo, V. S., Gladyshev, S. V., 2017. Konveksiia i stratifikatsiia vod na severe Atlanticheskogo okeana po dannym izmerenii zimoi 2013/14 gg. [Water convection and stratification in the Northern Atlantic data of *in situ* measurements in winter 2013/14]. *Vestnik Mosk. un-ta [Vestnik of Moscow University]* 4, 45–54. (In Russian)
- Fedorov, A. M., Bashmachnikov, I. L., Belonenko, T. V., 2018. Lokalizatsiia oblastei glubokoi konveksii v moriakh Severo-Evropeiskogo basseina, Labrador i Irmingera [Localization of areas of deep convection in the Nordic seas, the Labrador Sea and the Irminger Sea]. *Vestnik Sankt-Peterb. un-ta. Nauki o Zemle [Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences]*. 63(3). 354–362. (In Russian) URL: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.306>.

- Gnatuik, N., Vihma, T., Bobylev, L., 2018. Inter-seasonal teleconnections between Earth surface temperature and near-surface air temperature. POLAR-2018 (A SCAR IASC Conference), 15–26.05.2018, Davos, Switzerland.
- Haine, T. W., Curry, B., Gerdes, R., Hansen, E., Karcher, M., Lee, C., Rudels, B., Spreen, G., de Steur, L., Stewart, K. D., Woodgate, R., 2015. Arctic freshwater export: status, mechanisms, and prospects. *Global and Planetary Change* 125, 13–35.
- Holte, J., Straneo, F., 2017. Seasonal overturning of the Labrador Sea as observed by Argo floats. *Journal of Physical Oceanography* 47(10), 2531–2543.
- Hurrell, J. W., Deser, C., 2010. North Atlantic climate variability: the role of the North Atlantic Oscillation. *Journal of Marine Systems* 79(3–4), 231–244.
- Jenkins, W. J., Smethie, W. M., Boyle, E. A., Cutter, G. A., 2015. Water mass analysis for the US GEOTRACES (GA03) North Atlantic sections. *Deep Sea Research II* 116, 6–20.
- Jevrejeva, S., Moore, J. C., Grinsted, A., 2003. Influence of the Arctic Oscillation and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: The wavelet approach. *Journal of Geophysical Research* 108(D21). URL: <https://doi.org/10.1029/2003JD003417>.
- Khaliwala, S., Schlosser, P., Visbeck, M., 2002. Rates and mechanisms of water mass transformation in the Labrador Sea as inferred from tracer observations. *Journal of Physical Oceanography* 32(2), 666–686.
- Kumar, P., Foufoula-Georgiou, E., 1997. Wavelet analysis for geophysical applications. *Reviews of Geophysics* 35(4), 385–412.
- Larnicol, G., Guinehut, S., Rio, M. H., Drevillon, M., Faugere, Y., Nicolas, G., 2006. The global observed ocean products of the French Mercator project. Proceedings of the Symposium on 15 Years of Progress in Radar Altimetry, 13–18 March 2006. Venice, Italy.
- McCartney, M. S., Talley, L. D., 1982. The subpolar mode water of the North Atlantic Ocean. *Journal of Physical Oceanography* 12(11), 1169–1188.
- Myers, P. G., Josey, S. A., Wheler, B., Kulan, N., 2007. Interdecadal variability in Labrador Sea precipitation minus evaporation and salinity. *Progress in Oceanography* 73(3–4), 341–357.
- Peterson, B. J., McClelland, J., Curry, R., Holmes, R. M., Walsh, J. E., Aagaard, K., 2006. Trajectory shifts in the Arctic and subarctic freshwater cycle. *Science* 313(5790), 1061–1066.
- Pozo-Vazquez, D., Esteban-Parra, M. J., Rodrigo, F. S., Castro-Diez, Y., 2000. An analysis of the variability of the North Atlantic Oscillation in the time and the frequency domains. *International Journal of Climatology* 20, 1675–1692.
- Proshutinsky, A., Dukhovskoy, D., Timmermans, M. L., Krishfield, R., Bamber, J. L., 2015. Arctic circulation regimes. *Philosophical Transactions of Royal Society A* 373(2052), 20140160.
- Rhein, M., Kieke, D., Hüttl-Kabus, S., Roessler, A., Mertens, C., Meissner, R., Klein, B., Boning, C. W., Yashayaev, I., 2011. Deep water formation, the subpolar gyre, and the meridional overturning circulation in the subpolar North Atlantic. *Deep Sea Research II* 58(17), 1819–1832.
- Serreze, M. C., Barrett, A. P., Slater, A. G., Woodgate, R. A., Aagaard, K., Lammers, R. B., Steele, M., Moritz, R., Meredith, M., Lee, C. M., 2006. The large-scale freshwater cycle of the Arctic. *Journal of Geophysical Research* 111(C11). URL: <https://doi.org/10.1029/2005JC003424>.
- Stramma, L., Kieke, D., Rhein, M., Schott, F., Yashayaev, I., Koltermann, K. P., 2004. Deep water changes at the western boundary of the subpolar North Atlantic during 1996 to 2001. *Deep Sea Research I* 51(8), 1033–1056.
- Yashayaev, I., 2007. Hydrographic changes in the Labrador Sea, 1960–2005. *Progress in Oceanography* 73, 242–276.
- Yashayaev, I., Clarke, A., 2008. Evolution of North Atlantic water masses inferred from Labrador Sea salinity series. *Oceanography* 21(1), 30–45.
- Yashayaev, I., Seidov, D., Demirov, E., 2015. A new collective view of oceanography of the Arctic and North Atlantic basins. *Progress in Oceanography* 132, 1–21.

Received: August 7, 2018

Accepted: December 7, 2018

Author's information:

Diana A. Iakovleva — dianayak47@mail.ru

Igor L. Bashmachnikov — igorb1969@mail.ru