

## СВЯЗЬ ТЕРМОХАЛИННЫХ АНОМАЛИЙ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ АТЛАНТИКЕ И СЕВЕРО-ЕВРОПЕЙСКОМ БАССЕЙНЕ С КОЛЕБАНИЯМИ КЛИМАТА

*мл. науч. сотр. А.Е. ВЯЗИЛОВА, д-р геогр. наук Г.В. АЛЕКСЕЕВ,  
канд. геогр. наук А.В. СМИРНОВ*

*ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: vae@aari.ru, alexgv@aari.ru, avsmir@aari.ru*

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование изменений климата невозможно без изучения роли океана, в частности изменчивости характеристик водных масс, особенно в районах их формирования. Район субарктической Северной Атлантики считается отправной точкой для глобальной межokeанской циркуляции. Здесь процессы взаимодействия между океаном и атмосферой приводят к охлаждению воды, ее погружению вглубь в конвективных круговоротах Лабрадорского и Гренландского морей и к образованию новой глубинной воды для возвратной ветви атлантического меридионального круговорота.

Океанографические наблюдения в Лабрадорском, Гренландском и Норвежском морях показывают, что сигнал изменений из очагов зимней конвекции в этих морях распространяется в промежуточные и глубинные слои Атлантики (Dickson et al., 1996; Karstensen et al., 2005; Ronski, Budeus, 2005). Промежуточные и глубинные водные массы субполярного региона Северной Атлантики — Лабрадорская (ЛВ), Северо-восточная глубинная (СВГВ) и Северо-западная глубинная (СЗГВ) — образуют Северо-Атлантическое глубинное звено глобальной межokeанской циркуляции, которая выполняет важнейшую роль в меридиональном переносе тепла в океане.

В верхнем слое Северной Атлантики встречные потоки теплой и соленой атлантической воды и холодной опресненной полярной воды образуют субполярный круговорот (рис. 1). В Гренландском море теплая и соленая вода атлантического происхождения встречается с холодными и распресненными арктическими (полярными) водами и морскими льдами. При этом высокоширотное положение моря и близость ледяного щита Гренландии способствуют сильному выхолаживанию поверхности моря, сопровождающемуся как развитием глубокого конвективного перемешивания, так и усиленным ледообразованием на поверхности в зависимости от того, какие воды преобладают в верхнем слое в центральной части моря. В результате глубокой зимней конвекции формируются холодные промежуточные и глубинные воды, которые затем через Датский пролив перетекают в субполярную Северную Атлантику, где трансформируются в наиболее холодную и плотную водную массу — Северо-западную глубинную воду.

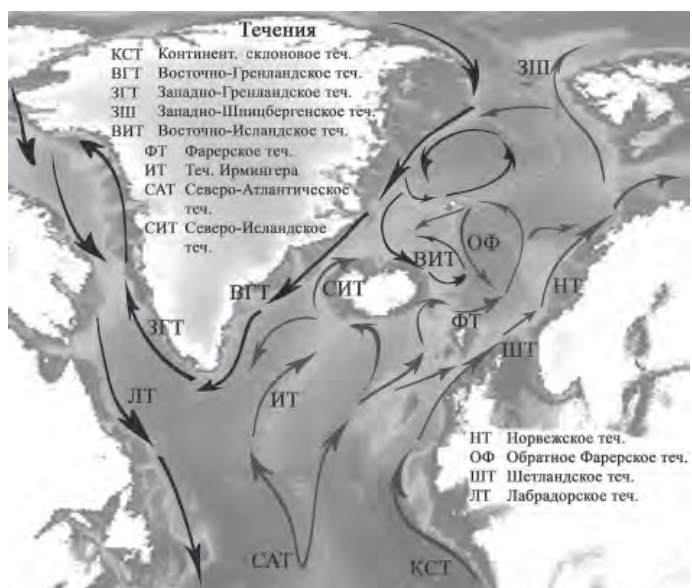


Рис. 1. Система течений в верхнем слое Северной Атлантики.

Анализ собранных за 1950–1990-е гг. данных наблюдений за температурой воды в центральной части Гренландского моря позволил проследить за изменениями в структуре водных масс, связанных с процессами глубокого перемешивания (Alekseev et al., 2001). Изменения температуры воды на глубине 2000 м в слое Гренландской глубинной воды, являющиеся индикатором интенсивности ее формирования, показали два периода повышения температуры в конце 1950-х и в 1980–1990-х гг. и два периода понижения в начале 1950-х и в конце 1960 — начале 1970-х гг. в результате глубокой конвекции. Наиболее значительное повышение температуры глубинной водной массы на  $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ослабление конвекции наблюдались в 1990-е гг. Последствием изменений в интенсивности образования глубинных вод стало ослабление термохалинной циркуляции, которое проявилось в ослаблении перелива глубинных вод в Северную Атлантику (Hansen et al., 2001). Изменения в интенсивности перелива вод через Датский и Фареро-Шетландский проливы, очевидные в последние несколько десятилетий, выделены в работе (Dickson, Brown, 1994) в качестве важного сигнала климатических изменений в океане. Следует отметить, что воды, перетекающие через порог Датского пролива из Гренландского моря, являются основной составляющей в формировании наиболее холодной и плотной водной массы в субполярной Атлантике — СЗГВ.

Формирование водных масс в Лабрадорском море также является важным источником обновления глубинных вод для Северной Атлантики. В отличие от воды, сформировавшейся в Гренландском круговороте, которая должна преодолеть Гренландско-Шетландский порог, чтобы попасть в Северную Атлантику, вода из Лабрадорского моря беспрепятственно распространяется в прилегающие районы Северной Атлантики с глубинным западно-пограничным течением (Johnson et al., 2005; Yashayaev et al., 2007; Yashayaev, 2007). Временные ряды температуры и солености свидетельствуют о выраженных многолетних изменениях характеристик Лабрадорской водной массы в районе ее формирования (Сарафанов, 2009; Dickson et al., 2002; Yashayaev, 2007; Lazier, 2002).

Климатические изменения, наблюдающиеся в различных районах субарктической Атлантики, взаимосвязаны между собой. Например, в работе (Dickson et al., 2003) выявлена взаимосвязь между температурой и соленостью на глубине 2000 м в Датском проливе и температурой, соленостью и плотностью воды в Лабрадорском море с запаздыванием в один год.

Результаты океанографических исследований показывают, что на изменчивость характеристик водных масс в субарктической Атлантике влияют процессы глубокой конвекции в приполярных акваториях, крупномасштабная термохалинная циркуляция и приток пресной воды из Арктики (Алексеев и др., 1989; Алексеев и др., 1995; Алексеев, Кораблев, 1994; Сарафанов и др., 2009; Dickson et al., 1996; Griffies, Bryan, 1997; Myers, 2005). Важным фактором, влияющим на климатические изменения в субарктической Атлантике и на вышеуказанные процессы, согласно выводам целого ряда исследований (Dickson, 2003; Getzlaff et al., 2005; Houghton, Visbeck, 2002; Wu, Gordon, 2002), считается Североатлантическое колебание (САК), количественная мера которого выражается в виде индекса САК (Hurrell, 2003).

Комплекс различных наблюдений показывает, что в годы с интенсивными положительными значениями индекса САК увеличивается экспорт морского льда из Арктического бассейна, прежде всего через пролив Фрама. Рекордный поток льда через пролив был отмечен в 1994–1995 гг. Хотя взаимосвязь между указанными величинами для длительного периода наблюдений не доказана, можно отметить, что увеличение значений индекса САК начиная с 1976 г. сопровождалось увеличением годового поступления льда в Гренландское море на 200 км<sup>3</sup> (Dickson et al., 2000).

С изменениями индекса САК согласуются изменения интенсивности западного переноса в нижних слоях атмосферы субарктической Атлантики, которые оказывают решающее влияние на интенсивность конвекции и циркуляцию в верхних слоях океана. Согласно выводам авторов исследований (Yashayaev et al., 2007), именно с ростом индекса САК, например, связано усиление конвекции в Лабрадорском море в 1960–1990 гг., которое сопровождалось значительным охлаждением и распреснением Лабрадорской водной массы, а также значительным увеличением зональной протяженности Субполярного круговорота. Смещение Субполярного фронта к востоку сопровождалось уменьшением адвекции субтропических вод на север, вследствие чего наблюдалось охлаждение и распреснение поверхностных и промежуточных водных масс (Lozier, Stewart, 2008).

Согласно выводам Сарафанова (Сарафанов, 2013) с уменьшением индекса САК с середины 1990-х гг. связано уменьшение зональной протяженности Субполярного круговорота, потепление и осолонение поверхностных и промежуточных вод не только в Лабрадорском море, но и, как следствие, увеличение притока теплых и соленых вод в восточном бассейне на глубинах до 1200 м, приток атлантических вод в Норвежское и Гренландское моря, где формируются атлантические глубинные воды. Положительные аномалии температуры и солености подповерхностных и промежуточных вод в восточном бассейне передаются глубинным водам вследствие вовлечения атлантических вод в слой СВГВ.

В настоящей работе проводится сравнение изменчивости термохалинных характеристик в районах интенсивной конвекции и формирования промежуточных и глубинных вод Северо-Западной Атлантики и Северо-Европейского бассейна (СЕБ) и исследуется роль атмосферной циркуляции в формировании термохалинных аномалий в выбранных районах.

## ДААННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для исследования использованы данные океанографических наблюдений за период с 1940 по 2012 г., собранные в базе данных (БД) по Северо-Европейскому бассейну (Кораблев и др., 2007). В базу вошли данные о температуре, солёности и основных гидрохимических параметрах. Применённые процедуры контроля качества позволили исключить сомнительные данные. Для анализа использовались только высокоточные профили, полученные с помощью батиметрии или СТД.

В ходе исследования база данных была пополнена значительным количеством наблюдений, выполненных в конце прошлого и начале нынешнего столетия, а также океанографическими данными Бедфордского института (Канада, <http://dfo-mpo.gc.ca>), что дало возможность совместного изучения климатических изменений в СЕБ и Северо-Западной Атлантике за достаточно большой период времени. Пополненная БД содержит более 500000 океанографических станций в СЕБ (60° с.ш. – 82° с.ш., 45° з.д. – 70° в.д.) и Северо-Западной Атлантике (47° с.ш. – 82° с.ш., 45° з.д. – 81° з.д.). Исследование изменчивости характеристик водных масс в указанных районах проведено для слоев 0–500 м, 500–1000 м, 1000–2000 м, 2000–3000 м, в которых находятся, соответственно, верхняя, промежуточная, глубинная и придонная водные массы.

В качестве характеристик водных масс были рассчитаны средние значения температуры и солёности воды в каждом из слоев, осредненные за период с апреля по октябрь. Кроме средних значений были рассчитаны значения аномалий относительно средних многолетних значений.

Оценка влияния атмосферных процессов на формирование аномалий термohалинного состояния верхнего слоя и развитие глубокой конвекции в исследуемых районах выполнялась с использованием данных о среднемесячной температуре воздуха на метеостанциях в субарктическом регионе (рис. 3) и временных рядов индексов арктической осцилляции (АО) и САК, осредненных с декабря по март.

Для исследования были выбраны 4 района (рис. 2, табл. 1): районы в Лабрадорском (1) и Гренландском (2) морях, где развиваются процессы глубокой конвекции; район в проливе Фрама, через который проходит водообмен между СЕБ в Арктический бассейн (3); и район в Лофотенской котловине, где располагается стационарный вихрь (4). Следует отметить, что в Лабрадорском море выбран район нахождения корабля погоды «Б».

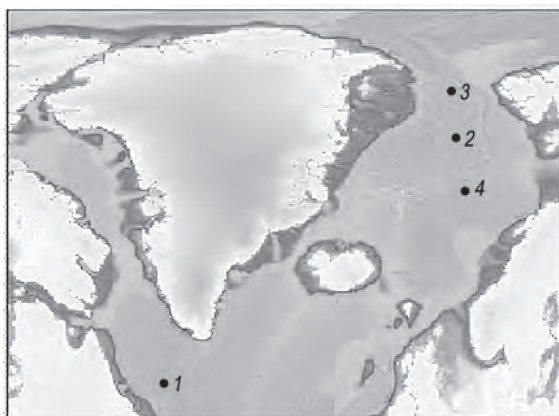


Рис. 2. Положение выбранных районов.

**Положение районов, координаты их центров и число использованных океанографических станций**

№ района	Координаты центра	Радиус области, км	Число станций	Примечание
1	56° 30' с.ш., 51° з.д.	100	~3000	Лабрадорское море, район КП «Б»
2	75° с.ш., 2° в.д.	100	~2400	Гренландское море
3	78° 48' с.ш., 1° з.д.	100	~2200	Пролив Фрама
4	71° 30' с.ш., 3° в.д.	100	~1700	Лофотенская котловина

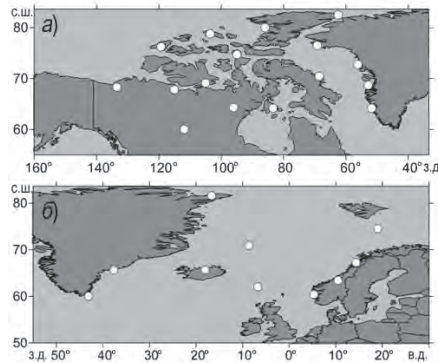


Рис. 3. Положение метеорологических станций в Гренландско-Канадском (а) и Северо-Европейском регионах (б), по которым рассчитаны аномалии температуры воздуха.

#### ТЕРМОХАЛИННЫЕ АНОМАЛИИ В ВЫБРАННЫХ РАЙОНАХ СУБАРКТИЧЕСКОЙ АТЛАНТИКИ

На рис. 4 и 5 представлены графики изменений аномалий средней температуры и солёности с апреля по октябрь в различных слоях в выбранных районах в Лабрадорском море (рис. 4а), Гренландском море (рис. 4б), проливе Фрама (рис. 5а) и Лофотенской котловине (рис. 5б). Во временной изменчивости аномалий температуры в Гренландском море (рис. 4б) выделяются период отрицательных аномалий температуры на всех уровнях с 1960-х до конца 1990-х гг. и значительное увеличение температуры в последующие годы. Отрицательные аномалии солёности, сопровождающие понижение температуры во всех слоях, дают основания предположить, что причинами существенного охлаждения и опреснения вод в Гренландском море с начала 1970-х до 1990-х гг. является усиление потока опреснённой воды и морских льдов из Арктического бассейна (Peterson et al, 2002; Rayner et al., 2003; Dickson et al., 2002) и зимняя конвекция.

Повышение температуры и солёности в данном районе в последние декады можно объяснить ослаблением интенсивности зимней конвекции, что подтверждается результатами работы (Somavilla et al., 2013). Измеренная годовая величина потока воды, погружающейся в результате конвекции в Гренландском море на глубину более 1500 м по оценкам авторов работы (Gerdes et al., 2005) составляет 0,47 Св в период с 1965 по 1979 г. и только 0,1 Св в период с 1980 по 1989 г.

В Лабрадорском море временные ряды летних аномалий температуры и солёности воды в районе корабля погоды «Б» (рис. 4а) свидетельствуют о существенных многолетних изменениях. Выделяются два периода интенсивного опреснения и



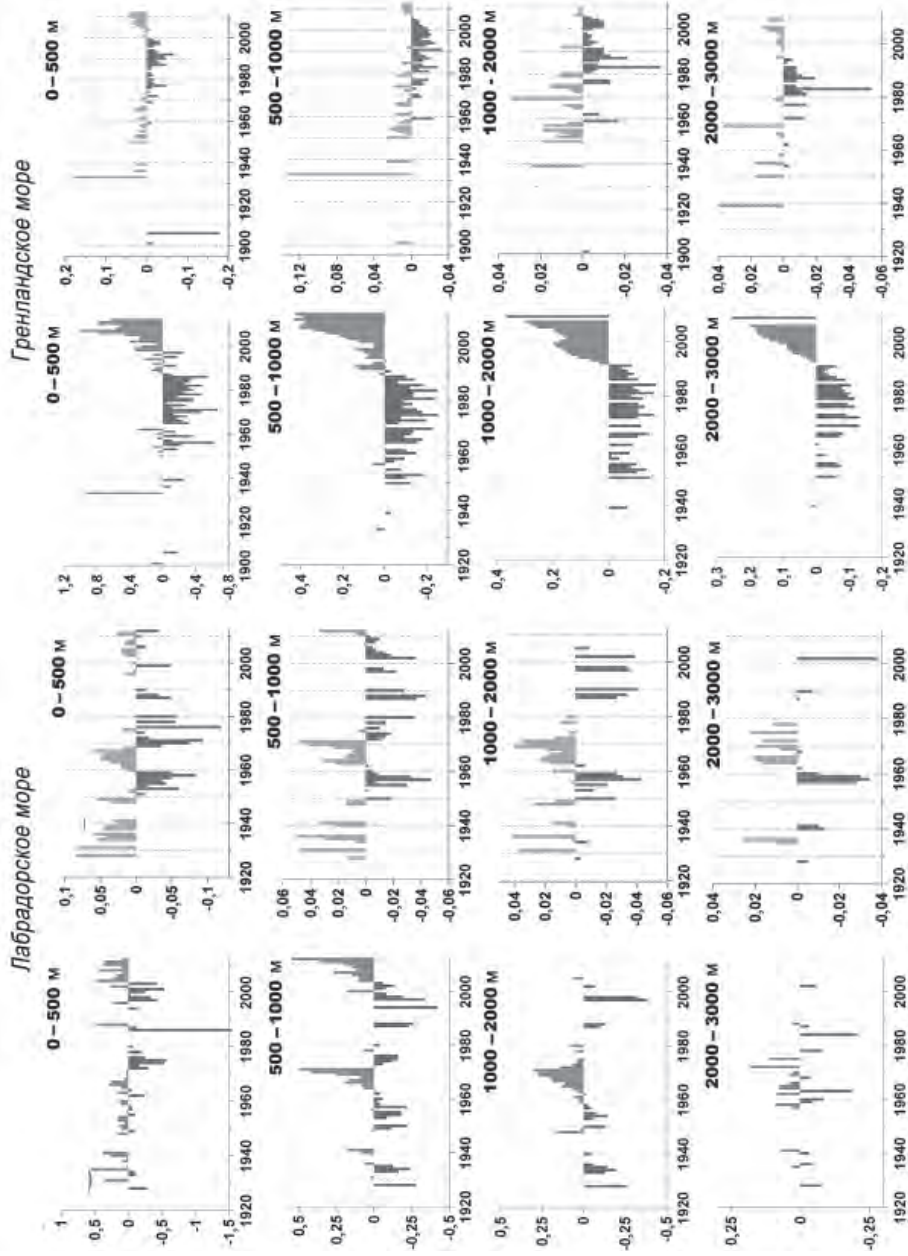


Рис. 4. Аномалии температуры (1 и 3 колонки) и солёности (2 и 4 колонки) по слоям в Лабрадорском море и Гренландском море (апрель-октябрь).

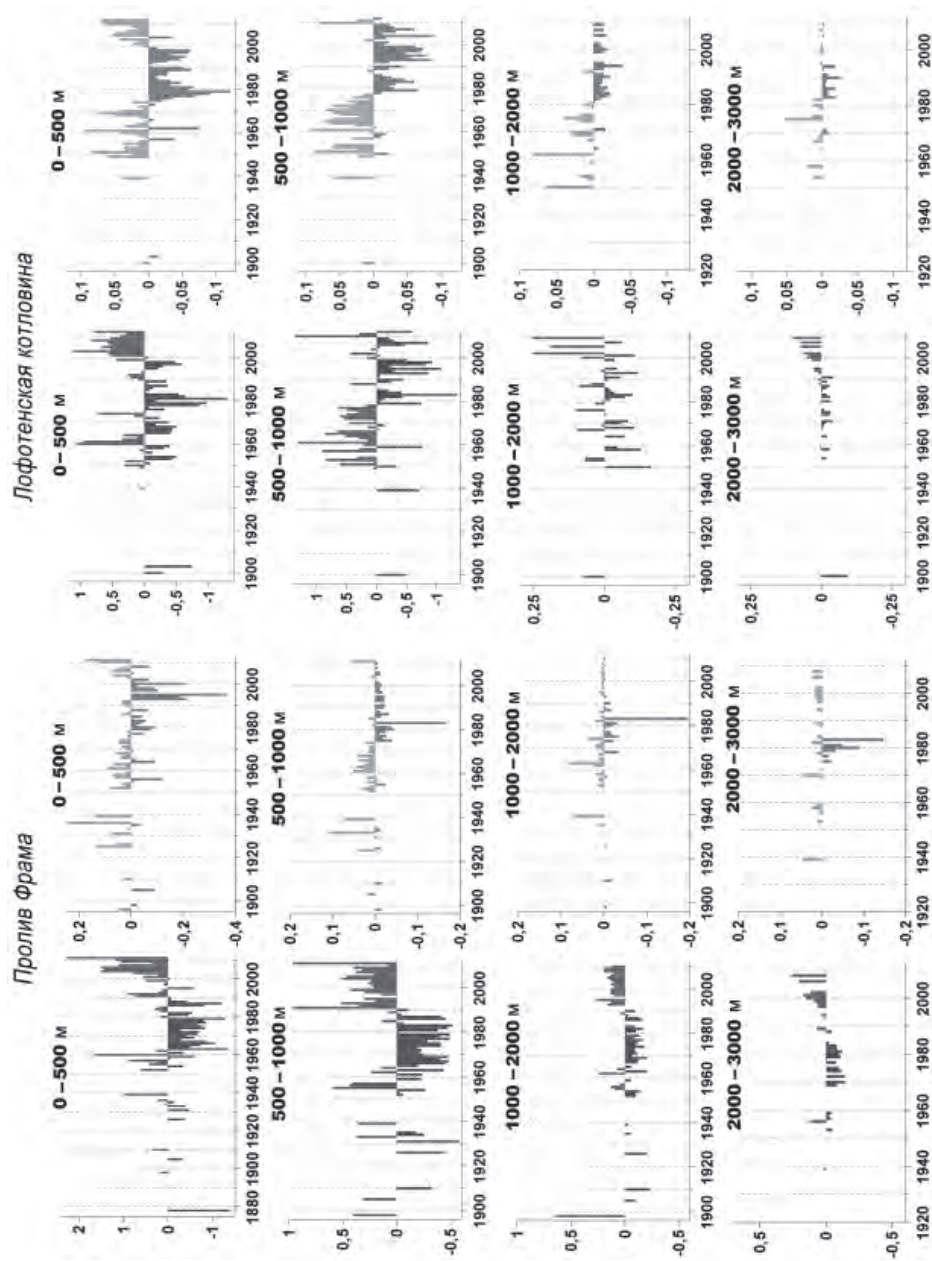


Рис. 5. Аномалии температуры (1 и 3 колонки) и солёности (2 и 4 колонки) по слоям в проливе Фрама (октябрь–март) и в районе Лофотенской котловины (апрель–октябрь).

охлаждения вод и два периода потепления и осолонения. Периоды опреснения и охлаждения, то есть периоды интенсивного формирования Лабрадорской водной массы, это, во-первых, десятилетие 1950-х гг., а также длительный период с 1970-х до 1990-х гг. В 1950-х гг. значительные отрицательные аномалии солёности и температуры наблюдались в основном до глубины 1000 м. Это означает, что, по данным наблюдений корабля погоды «Б», конвекция в Лабрадорском море в эти годы не достигала больших глубин, что согласуется с выводами авторов работы (Gerdes et al., 2005). С 1970-х по 1990-е гг. — это период устойчивого опреснения и охлаждения вод, наблюдавшийся практически во всех слоях вплоть до 2000–3000 м.

Периоды потепления и осолонения — это, во-первых, 1960-е гг., а также период с начала 2000-х по настоящее время. Следует отметить, что полученные результаты несколько отличаются от выводов, сделанных в других исследованиях. Например, если в работе (Yashayaev, 2007) период потепления и осолонения выделен как в 1960-е, так и в более ранние, 1950-е гг., то в данном исследовании продолжительность первого периода потепления и осолонения оказалась короче.

Тенденции опреснения и охлаждения вод в одни периоды, а также процессы потепления и осолонения водной массы в Лабрадорском море в другие годы неразрывно связаны с процессами усиления и ослабления глубокой зимней конвекции. Именно последствиями сильной конвекции можно объяснить присутствие в летние сезоны середины 1970-х, в 1980-е и 1990-е гг. значительных отрицательных аномалий солёности и температуры вод до глубины 2000 м. Как было отмечено в работе (Yashayaev et al., 2007), конвективное охлаждение и опреснение Лабрадорского моря в 1980-е и ранние 1990-е гг. привели к образованию наиболее холодных, плотных глубинных вод за период наблюдений с 1930-х гг. Меньшие значения отрицательных аномалий солёности и температуры вод, наблюдающиеся в летние сезоны второй половины 1990-х гг., свидетельствуют о постепенном ослаблении конвекции. Ослабленная зимняя конвекция в эти годы, как отмечено в работе (Brandt et al., 2002) не могла значительно обновить глубинную водную массу. В 2000 г. отмечено некоторое усиление конвекции (отрицательных аномалий температуры и солёности вод) в верхних слоях до 1000 м, что способствовало образованию новой, но менее глубокой и меньшей по плотности водной массы (Yashayaev et al., 2007).

Следует отметить, что в течение достаточно длительного периода устойчивого потепления и опреснения в некоторые годы формирования отрицательных аномалий солёности и температуры в Лабрадорском море, а следовательно, и обновления глубинных вод не происходило, что можно объяснить слабыми конвективными процессами. В отличие от Гренландского моря, где увеличение температуры вод в последние декады отмечено до глубин 2000–3000 м, в Лабрадорском море увеличение температуры вод наблюдалось только до глубины 1000 м и выражено менее ярко. Следует отметить также, что если в 1950-х гг. аномалии температуры и солёности воды Лабрадорского моря были отрицательны, в Гренландском море в верхних 1000 м температурные аномалии были положительны и показатели солёности были высоки по всей глубине. В 1960–1970-х гг. в Лабрадорском море преобладали теплые и солёные воды на глубинах 500–2000 м, в то же самое время в Гренландском море на тех же глубинах температурные и солёностные аномалии были отрицательные. Данные события подтверждают наличие оппозиции процессов в рассматриваемых районах Гренландского и Лабрадорского морей.



В проливе Фрама (рис. 5а) во временной изменчивости аномалий температуры выделяется период охлаждения вод с начала 1960-х до начала 1990-х гг. Отрицательные аномалии температуры наблюдаются до глубины 3000 м, но их максимальные значения, до  $-1,0$  °С, отмечены в верхнем слое до 500 м. Отрицательные аномалии солёности, максимальные также в верхнем слое океана, в основном наблюдаются с середины 1970-х до начала 2000-х гг. После 2000 г. наблюдается потепление водных масс до глубины 3000 м, и тенденция к их осолонению, особенно заметная в верхнем слое океана. Аномально теплые и солёные воды отмечались в проливе Фрама и в 1950–1960-х годах, но на глубинах до 1000 м.

Практически такая же картина, как в проливе Фрама, наблюдалась и в районе Лофотенской котловины (рис. 5б). Низкая солёность верхнего слоя воды в СЕБ в начале 1950-х, а также в 1980–1990-х гг. отмечалась в работах (Dickson et al., 1988, Belkin et al., 1998).

Согласно предположению, высказанному в работах (Peterson et al., 2002; Rayner et al., 2003, Dickson et al., 2002), опреснение верхнего 1000–1500-метрового слоя в Гренландском и Норвежском морях в период с 1970 до 2000-х гг. и распределение глубинных вод в субполярной Северной Атлантике связано с увеличением экспорта пресной воды и льда из Арктического бассейна в период интенсивной положительной фазы САК. Максимальные отрицательные аномалии солёности в верхнем слое океана в районе пролива Фрама в середине 1990-х гг. (рис. 5) объясняются рекордным годовым потоком льда в данном районе в 1994–1995 гг. (Dickson et al., 2000). Возможно, существуют и другие факторы и механизмы, оказывающие влияние на опреснение в европейских субарктических морях. Например, в работе (Blindheim et al., 2000) отмечается смещение теплого солёного Атлантического течения в направлении побережья Норвегии.

### **О СВЯЗИ ТЕРМОХАЛИННЫХ АНОМАЛИЙ С АНОМАЛИЯМИ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ**

Результаты анализа термохалинных аномалий водных масс в выбранных районах субарктической Атлантики, представленные выше, показывают значительные изменения характеристик вод в масштабе десятилетий. Климатические изменения в океане, проявляющиеся в чередовании потепления и осолонения и опреснения и охлаждения водных масс, в значительной степени обусловлены изменениями атмосферной циркуляции, в отдельные годы способствующей, в другие – препятствующей развитию зимней конвекции в районах формирования промежуточных и глубинных вод. Основными проявлениями климатических изменений атмосферной циркуляции в Северной Атлантике считаются Североатлантическое колебание и Арктическая осцилляция (АО). Фаза и интенсивность САК в значительной степени обуславливают атмосферные условия над акваторией океанов, влияющих на развитие конвекции. В ряде исследований отмечено, например, что интенсивная конвекция в Лабрадорском море наблюдалась в зимние сезоны, отличавшиеся низкими температурами воздуха (Johnson et al., 2005; Lazier et al., 2002; Mizoguchi et al., 2003), и, наоборот, в мягкие зимы здесь отмечено ослабление конвекции.

На рис. 6 представлены графики изменений средних за летний сезон (июнь–август) аномалий температуры воздуха по данным метеостанций для районов Лабрадорского моря с заливом Баффина и СЕБ. На рис. 7 приведены временные ряды зимнего индекса САК, индекса АО и аномалий приземной температуры в двух регионах ис-

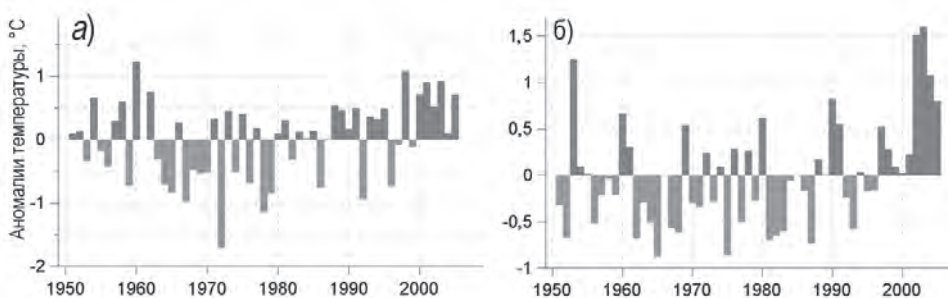


Рис. 6. Летние (июнь–август) аномалии температуры воздуха по данным метеостанций для регионов: Лабрадорское море (а), залив Баффина, СЕБ (б).

следования: Лабрадорском море с заливом Баффина ( $54\text{--}82^\circ$  с.ш.,  $40\text{--}82^\circ$  з.д.) и СЕБ ( $63\text{--}82^\circ$  с.ш.,  $30^\circ$  з.д. –  $20^\circ$  в.д.).

В атмосфере в 1950-е и 1960-е гг. по данным метеостанций в регионе Северо-Западной Атлантики наблюдалось потепление с максимальными аномалиями приповерхностной температуры воздуха здесь в конце 1950-х гг. (рис. 6а). В СЕБ пик положительных аномалий температуры воздуха наблюдался в первой половине 1950-х гг., но и в начале 1960-х аномалии температуры были положительны (рис. 6б). С конца 1990-х гг. по настоящее время в обеих рассматриваемых областях регистрируется повышение температуры воздуха, более значительное в регионе СЕБ.

Из рис. 6 можно сделать вывод, что положительным аномалиям температуры воздуха в обоих регионах соответствует развитие отрицательных аномалий солёности в верхнем слое в 1960–1970-е, 1980-е и 1990-е гг. в районе Северной Атлантики и СЕБ по данным (Dikson et al., 1988; Velkin et al., 1998). На рис. 4, 5 и 6 это соответствие выражено слабо из-за оценки средней солёности в слое 0–500 м, в то время как летнее распределение сказывается в верхних 100 м.

САК и АО оказывают влияние на температуру воздуха в СЕБ и в Северо-Западной Атлантике и тем самым влияют на зимнюю конвекцию в обоих регионах, поскольку низкие температуры воздуха и усиление холодных ветров являются благоприятным фактором для развития зимней конвекции. В период отрицательных индексов САК и АО наблюдаются низкие температуры воздуха, содействующие развитию конвекции в Гренландском море. В фазе положительных индексов САК и АО низкие температуры воздуха и сильные северо-западные ветра содействуют глубокой конвекции в Лабрадорском море (Gerdes et al., 2005).

Корреляция между рядами аномалий индексов САК и АО и аномалий температуры воздуха (рис. 7) позволяет оценить степень влияния циркуляции атмосферы на развитие аномалий температуры. Из рис. 7 можно видеть, что средние за декабрь–март температура воздуха в СЕБ и индексы САК и АО показывают согласованные изменения, но расходятся после 1995 г., что свидетельствует об изменениях циркуляции атмосферы над СЕБ, не отраженных изменениями индексов (Bengtsson et al., 2004). Из-за этого расхождения коэффициент корреляции между индексами и температурой воздуха над СЕБ не превысил 0,24. Средняя за декабрь–март температура воздуха в Северо-Западной Атлантике (залив Баффина, Лабрадорское море) на протяжении всего периода наблюдений находится в значимой обратной зависимости от индексов, что указывает на репрезентативность индексов на протяжении всего рассматриваемого

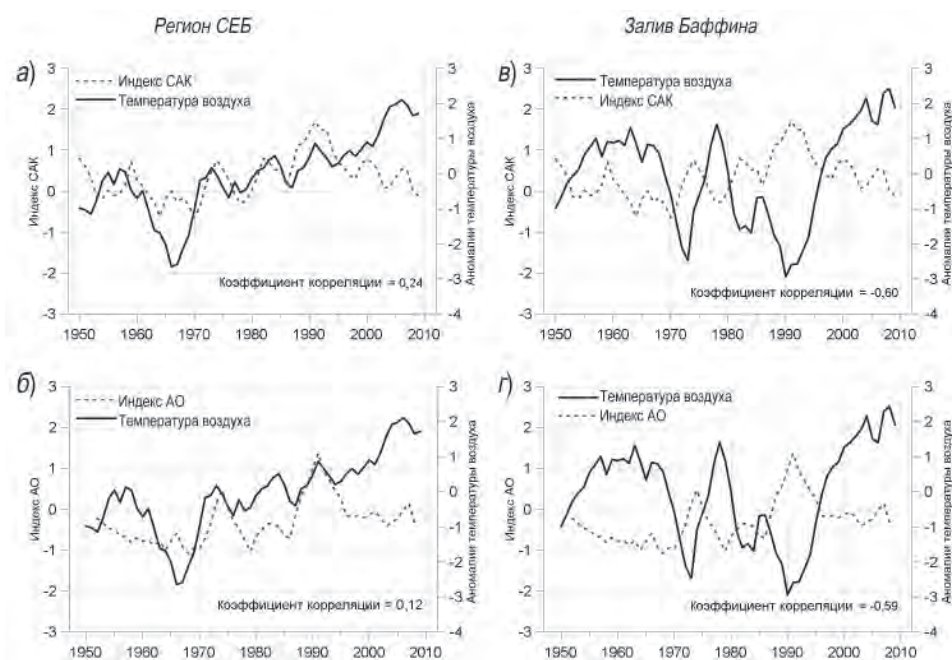


Рис. 7. Средние за декабрь–март аномалии температуры воздуха (скользящее осреднение за 5 лет) в регионе СЕБ (63–82° с.ш., 30° з.д.–20° в.д.) и в Лабрадорском море, заливе Баффина (54–82° с.ш., 40–82° з.д.); индексы САК (а, в) и АО (б, г), осредненные за период с декабря по март. периода для оценки влияния атмосферы и подтверждается значимым коэффициентом корреляции между ними, равным  $-0,60$ .

Корреляция между среднегодовыми значениями температуры воздуха и температуры воды в верхних 500 м в обоих регионах составляет 0,6–0,7. За положительными аномалиями температур воздуха в 1950-х и начале 1960-х гг. следует потепление и осолонение вод Лабрадорского моря в 1960-х и начале 1970-х гг. В то же самое время в Гренландском море доминируют холодные воды с положительными аномалиями солёности. Аномалии температуры и солёности воды остаются положительными так же, как и аномалии температуры воздуха, в течение последних 15 лет, несмотря на отрицательные значения САК и АО, что подтверждает вывод о нерепрезентативности этих индексов для атмосферной циркуляции над СЕБ.

## ВЫВОДЫ

Многолетние временные ряды термохалинных характеристик для ключевых районов Северо-Западной Атлантики и Северо-Европейского бассейна и построенные на их основе пространственно-временные диаграммы подтверждают развитие интенсивного опреснения и охлаждения водных масс в Лабрадорском море с середины 1960-х до 1990-х гг. и значительного их осолонения и потепления после 2000 г. В этот же период глубинные воды Гренландского моря становились более теплыми и более солёными в сравнении с ранними 1970 гг., что говорит об ослаблении процессов конвекции в данном районе.

Между термохалинными аномалиями в верхнем 500-метровом слое и аномалиями температуры воздуха в этих регионах существует связь (коэффициент корреляции

составляет 0,6–0,7) под влиянием атмосферных циркуляционных мод САК и АО. В период отрицательных индексов САК и АО низкие температуры воздуха содействуют развитию конвекции в Гренландском море. В фазе положительного индекса САК и АО низкие температуры воздуха и сильные северо-западные ветра благоприятствуют глубокой конвекции в Лабрадорском море.

Показано, что последние годы конвекция в Гренландском море не проникала глубже 1000 м, в то время как в Лабрадорском море достигала глубины более 2300 м. Установлено, что циркуляционные моды САК и АО репрезентативны для оценки их влияния на процессы в Северо-Западной Атлантике, но не репрезентативны для периода после 1995 г. для процессов в СЕБ. Для анализа оценки влияния атмосферы на процессы в СЕБ будет более подходящим использование региональных индексов циркуляции атмосферы над СЕБ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Алексеев Г.В., Богородский П.В., Назурный А.П.* Структура термохалинных полей в районе циклонической циркуляции и поднятия донных вод Гренландского моря // Структура и изменчивость крупномасштабных океанологических процессов и полей в Норвежской энергоактивной зоне. Л.: Гидрометеоздат, 1989. С. 37–43.

*Алексеев Г.В., Иванов В.В., Кораблев А.А.* Межгодовая изменчивость глубокой конвекции в Гренландском море // Океанология. 1995. Т. 35. № 1. С. 45–52.

*Алексеев Г.В., Кораблев А.А.* Океанографические условия развития глубокой конвекции // Закономерности крупномасштабных процессов в Норвежской энергоактивной зоне и прилегающих районах. СПб.: Гидрометеоздат, 1994. С. 79–93.

*Алексеев Г.В., Кораблев А.А., Священников П.Н.* Крупномасштабная структура океанологических полей в Норвежском и Гренландском морях // Структура и изменчивость крупномасштабных океанологических процессов и полей в Норвежской энергоактивной зоне. Л.: Гидрометеоздат, 1989. С. 10–18.

Взаимодействие океана и атмосферы в северной полярной области / Под ред. А.Ф. Трешникова, Г.В. Алексеева. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 175 с.

*Кораблев А.А., Пнюшков А.В., Смирнов А.В.* Создание океанографической базы данных для мониторинга климата в Северо-Европейском бассейне Арктики // Труды ААНИИ. 2007. Т. 447. С. 85–108.

*Сарафанов А.А.* Циркуляция и термохалинные характеристики вод субарктической Атлантики: среднее состояние и изменение в масштабе десятилетий: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М., 2013. 50 с.

*Сарафанов А.А., Соков А.В., Фалина А.С.* Потепление и осолонение лабрадорской водной массы и глубинных вод в субполярной Северной Атлантике на 60° с.ш. в 1997–2006 гг. // Метеорология и гидрология. 2009. Т. 49. № 2. С. 209–221.

*Aagaard K.J., Swift H.* Seasonal transitions and water mass formation in the Iceland and Greenland seas // Deep Sea Research. 1981. Vol. 28. № 10. P. 1107–1129.

*Alekseev G.V., Johannessen O.M., Korablev A.A., Ivanov V.V., Kovalevsky D.V.* Interannual variability of water mass in the Greenland Sea and the adjacent areas // Polar Research. 2001. Vol. 20. № 2. P. 201–208.

*Avsic T., Karstensen J., Send U., Fischer J.* Interannual variability of newly formed Labrador Sea Water from 1994 to 2005 // Geophys. Res. Lett. 2006. Vol. 33. L21S02.

*Belkin I.M., Levitus S., Antonov J., Malmberg S.A.* Great Salinity Anomalies in the North Atlantic // Progress in Oceanography. 1998. Vol. 41. P. 1–68.

- Bengtsson L., Semenov V.A., Johannessen O.M.* The Early Twentieth-Century Warming in the Arctic—A Possible Mechanism // American Meteorological Society. 2004. Vol. 17. P. 4045–4057.
- Blindheim J., Borovkov V., Hansen B., Malmberg S. A., Turrell W.R., Osterhus S.* Upper layer cooling and freshening in the Norwegian Sea in relation to atmospheric forcing // Deep-Sea Res. 2000. Vol. 47. P. 655–680.
- Brandt P., Schott F.A., Funk A., Martins C.S.* Seasonal to interannual variability of the eddy field in the Labrador Sea from satellite altimetry // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 109. C02028.
- Dickson R., Brown J.* The production of North Atlantic Deep Water: Sources, rates, and pathways // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99 (C6). P. 319–341.
- Dickson R.R., Curry R., Yashayaev I.* Recent changes in the North Atlantic // Phil. Trans. R. Soc. Land. A. 2003. Vol. 361. P. 1917–1934.
- Dickson R., Lazier J., Meincke J., Rhines P., Swift J.* Long-term coordinated changes in the convective activity of the North Atlantic // J. Prog. Oceanog. 1996. Vol. 38. P. 241–295.
- Dickson R.R., Meincke J., Malmberg S.A., Lee A.J.* The «Great Salinity Anomaly» in the northern North Atlantic, 1966–1982 // Progress in Oceanography. 1988. Vol. 20. № 2. P. 103–151.
- Dickson B., Meincke J., Vassie I., Jungclaus J., Østerhus S.* Possible predictability in overflow from the Denmark Strait // Nature. 1999. Vol. 397. P. 243–246.
- Dickson R.R., Yashayaev I., Meincke J. and et al.* Rapid freshening of the deep North Atlantic Ocean over the past four decades // Nature. 2002. Vol. 416. P. 832–837.
- Gerdes R., Hurka J., Karcher M., Kauker R., Koeberle C.* Simulated history of convection in the Greenland and Labrador seas 1948–2001, in The Nordic Seas: An Integrated Perspective // AGU, Geophysical Monograph. 2005. Vol. 158. P. 221–238.
- Getzlaff J., Boning C.W., Eden C., Biastoch A.* Signal propagation related to the North Atlantic overturning // Geophys. Res. Lett. 2005. Vol. 32. L09602.
- Griffies S.M., Bryan K.* A predictability study of simulated North Atlantic multidecadal variability // Climate Dynamics. 1997. Vol. 13. P. 459–487.
- Fischer J., Schott F.A., Dengler M.* Boundary Circulation at the Exit of the Labrador Sea // J. of Physical Oceanography. 2004. Vol. 34. P. 1548–1570.
- Helland-Hansen B., Nansen F.* The Norwegian Sea: Its physical oceanography // Rep. Norw. Fish. Mar. Inv. Oslo: The royal Department of Trade, Navigation and Industries. 1909. P. 1–390.
- Hopkins T.S.* The GIN Sea – a synthesis of its physical oceanography and literature review 1972–1985 // Earth-Science Reviews. 1991. Vol. 30. P. 175–318.
- Houghton R., Visbeck M.* Quasi-decadal Salinity Fluctuations in the Labrador Sea // J. Phys. Oceanography. 2002. Vol. 32. P. 687–701.
- Hurrell J.W.* Climate Variability: North Atlantic and Arctic Oscillation // Encyclopedia of Atmospheric Sciences. San Diego: Academic Press, 2003. P. 439–445.
- Johnson G.C., Bullister J.L., Gruber N.* Labrador Sea Water property variations in the northeastern Atlantic Ocean // Geophys. Res. Lett. 2005. Vol. 32. L07602.
- Karstensen J., Avsic T., Dengler M.* Subsurface temperature maxima in North Atlantic deep water formation regions // Geophys. Res. Abstr. 2005. Vol. 7. A07739.
- Latarius K., Detlef Q.* Seasonal to inter-annual variability of temperature and salinity in the Greenland Sea Gyre: heat and freshwater budgets // Tellus A. 2010. Vol. 62. № 4. P. 497–515.
- Lazier J., Hendry R., Clarke A., Yashayaev I., Rhines P.* Convection and restratification in the Labrador Sea // Deep-Sea Research. 2002. Vol. I (49). P. 1819–1835.
- Lozier M.S., Stewart N.M.* On the temporally varying northward penetration of Mediterranean Overflow Water and eastward penetration of Labrador Sea Water // J. Phys. Oceanogr. 2008. Vol. 38. P. 2097–2103.



- Myers P.G.* Impact of freshwater from the Canadian Arctic Archipelago on Labrador Sea Water formation // *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32. L06605.
- Mizoguchi K., Morey S.L., Zavala-Hidalgo J., Suginozono N., Häkkinen S., O'Brien J.J.* Convective activity in the Labrador Sea: Preconditioning associated with decadal variability in subsurface ocean stratification // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108. C103330.
- Peterson B.J., Holmes R.M., McClelland J.W. et al.* Increasing river discharge to the Arctic Ocean // *Science.* 2002. Vol. 298. № 5601. P. 2171–2173.
- Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B. et al.* Global analyses of sea surface temperature, sea ice and night marine air temperature since the late nineteenth century // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108. (D14) – 4407.
- Ronski S., Budeus G.* How to identify winter convection in the Greenland Sea from hydrographic summer data // *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110. C11010.
- Ronski S., Budeus G.* Time series of winter convection in the Greenland Sea // *Journal of Geophysical Research.* 2005. Vol. 110. C04015.
- Sarafanov A., Falina A., Lherminier P., Mercier H., Sokov A., Gourcuff C.* Assessing decadal changes in the Deep Western Boundary Current absolute transport southeast of Cape Farewell, Greenland, from hydrography and altimetry // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. C11003.
- Somavilla R., Schauer U., Budke G.* Increasing amount of Arctic Ocean deep waters in the Greenland Sea // *Geophys. Res. Lett.* 2013. Vol. 40. L50775.
- Thomson R.E., Fine I.V.* Estimating mixed layer depth from oceanic profile data // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2003. Vol. 20. № 2. P. 319– 329.
- Wu P., Gordon C.* Oceanic Influence on North Atlantic Climate Variability // *J. Climate.* 2002. Vol. 15. P. 1911–1925.
- Yashayaev I., Bersch M., M. van Aken H.* Spreading of the Labrador Sea Water to the Irminger and Iceland basins // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34. L10602.
- Yashayaev I.* Hydrographic changes in the Labrador Sea 1960–2005 // *Prog. Oceanogr.* 2007. Vol. 73. № 3–4. P. 242–276.