

**ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ  
ПЕРЕМЕШАННОГО СЛОЯ И ПОТОКАМИ ТЕПЛА  
НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ОКЕАН—АТМОСФЕРА  
В СЕВЕРО-ЕВРОПЕЙСКОМ БАССЕЙНЕ**

мл. науч. сотр. А.В.СМИРНОВ<sup>1,3</sup>, канд. геогр. наук А.А.КОРАБЛЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, avsmir@aari.nw.ru

<sup>2</sup>Центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена, Берген (Норвегия)

<sup>3</sup>Международный Центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена, Санкт-Петербург

В статье дается оценка взаимосвязей между потоками тепла на границе раздела океана и атмосферы в регионе Северо-Европейского бассейна. Океанографическая информация получена из базы данных, созданной в отделе взаимодействия океана и атмосферы Арктического и антарктического научно-исследовательского института. Данные с корабля погоды «Майк» использованы для расчета радиационных и турбулентных составляющих общего потока тепла. Коротковолновая радиация получена с помощью формулы Рида [21] с использованием спутникового массива альбедо [25] и модели ERA [5] для параметризации потока при чистом небе. Длинноволновая компонента радиационного потока рассчитана на основе формулы, полученной в Саутгемптонском Океанографическом Центре (Southampton Oceanography Centre, UK). Турбулентные потоки тепла параметризованы с помощью алгоритма COARE 3.0 на основе данных корабля погоды «Майк». Толщина перемешанного слоя оценена на основе тех же данных за период с 2002 по 2009 г. Тесная взаимосвязь между общим потоком тепла и толщиной верхнего квазигомогенного слоя подтверждается высокими коэффициентами корреляции. Найдена зависимость между увеличением толщины верхнего квазигомогенного слоя (ВКС) и событиями усиленного выноса льда из Арктического бассейна. Установлено, что в периоды усиленной адвекции льда поток тепла от океана увеличивался на 10–20 Вт/м<sup>2</sup>, что составляет 15–25 % от его средней величины.

*Ключевые слова:* взаимодействие океана и атмосферы, толщина перемешанного слоя, потоки тепла, Северо-Европейский бассейн.

#### ВВЕДЕНИЕ

Норвежское, Гренландское и Баренцево моря, входящие в состав Северо-Европейского бассейна (СЕБ), являются важным связующим звеном между Атлантическим и Арктическим океанами. В западных частях региона теплые и соленые атлантические воды (АВ) проникают далеко на север, формируя мягкий климат Северной Европы. Встречный поток на юг, вдоль побережья Гренландии выносит полярные воды и морской лед. Холодные и плотные воды в промежуточных и глубинных слоях, образовавшиеся в результате взаимодействия с атмосферой, двигаются на юг, формируя глубоководный перелив в Северную Атлантику.

Подводный хребет, отделяющий СЕБ от Северной Атлантики, служит естественной преградой, ограничивающей водообмен между двумя бассейнами. Основные объемы вод перелива преодолевают хребет в областях глубоководных желобов (Датский пролив, Фареро-Исландский пролив, Фареро-Исландский порог), значительно модифицируются в процессе опускания за счет вовлечения атлантических вод, приобретая характеристики Северо-Атлантической глубинной водной массы [11].

Адвекция тепла и соли в высокие широты играет ключевую роль в формировании вертикального конвективного обмена в крупномасштабной термохалинной циркуляции вод всего Мирового океана. Свойства атлантических вод, поступающих в СЕБ, значительно меняются на протяжении пути следования не только по причине взаимодействия с атмосферой, но и за счет горизонтального и вертикального (ветрового и конвективного) перемешивания, усиливающегося в зимний период. Предыдущие исследования показали, что вертикальный конвективный обмен в СЕБ подвержен сильной временной изменчивости и крайне чувствителен к изменениям климата [10, 11, 13].

Процессы взаимодействия на границе вода–воздух включают в себя обмен теплом, солью и количеством движения. Высокий теплоспас Норвежского течения определяет передачу атмосфере значительного количества тепла (среднегодовая отдача тепла от океана составляет около  $60 \text{ Вт/м}^2$  [13]). В период зимнего охлаждения формируется глубокий квазиоднородный слой, который при определенных условиях может достигать дна не только в шельфовых областях, но и в глубоководных районах СЕБ.

Количественные оценки вклада отдельных составляющих теплообмена на поверхности океана необходимы для понимания закономерностей формирования верхнего квазиоднородного слоя. Масштабы модификации атлантических вод вдоль траектории их распространения в СЕБ влияют не только на региональные характеристики водных масс в СЕБ, но и на свойства вод, поступающих в результате адвекции в высокие широты, а значит, и на климат Арктики. Интенсивность процессов перемешивания зависит от различных факторов, включающих стратификацию вод, параметры атмосферного воздействия (температура воздуха, скорость ветра, влажность и т.п.). В работе дается количественная оценка потоков тепла и характеристик ВКС по данным наблюдений с помощью современных расчетных алгоритмов. Конечная цель исследования заключается в определении взаимосвязей их изменения с состоянием климатообразующих параметров окружающей среды в СЕБ (стратификация верхнего слоя, параметры атмосферного воздействия, морской лед).

#### ДАННЫЕ

Океанографические наблюдения, использованные в настоящей статье, взяты из базы данных, созданной в ААНИИ для СЕБ [1, 3].

При ее построении было использовано около 2,5 млн станций из более чем 30 источников. Примененные процедуры контроля качества позволили исключить ошибочные наблюдения и наблюдения с низкой точностью (ХВТ, МВТ). После процедуры объединения итоговая база данных содержит более 450000 океанографических станций для региона СЕБ ( $60^\circ \text{ с.ш.} - 82^\circ \text{ с.ш.}$ ,  $45^\circ \text{ з.д.} - 70^\circ \text{ в.д.}$ ). В нее вошли температура, соленость, кислород и основные гидрохимические параметры за период с 1900 по 2010 г.

Дополнительно был сформирован массив данных поверхностного слоя. Он содержит более 550000 наблюдений по температуре и солености в верхнем (0–5 м) слое. База сформирована заново из начальных источников и прошла контроль качества, описанный в [1]. В ней отсутствуют ограничения, связанные с низкой инструментальной погрешностью приборов.

Для оценки изменений состояния верхнего слоя были рассчитаны гридированные месячные поля температуры и солености воды на фиксированных глубинах (стандартных горизонтах) в узлах регулярной ( $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  по широте и долготе) сетки за период с 1900 по 2009 г. Гридированные поля получены с помощью нестационарного геостатистического моделирования (Intrinsic Kriging, IK) [28], позволяющего исключать тренды в исходных полях. В данной работе рассмотрены поля для апреля, когда толщина ВКС достигает наибольших значений. Для увеличения площади покрытия, исходные данные за каждый год интегрировались

за период с середины марта до середины мая и представляют собой поля, центрированные на середину апреля. Естественным образом это приводит к увеличению пространственно-временной неоднородности в исходных полях. Каждое восстановленное в узле значение параметра сопровождается величиной стандартного отклонения кригинга или ошибкой интерполяции.

Месячные гридированные поля на стандартных горизонтах были в дальнейшем использованы для расчета средних (климатических) полей, получаемых арифметическим осреднением значений параметров в совпадающих узлах за определенный период и с учетом ошибки интерполяции.

Совместный анализ климатических и месячных полей параметров характеризует как долгопериодную изменчивость, так и аномальность каждого отдельного года. Следует отметить, что алгоритм не допускает экстраполяции за пределы области наблюдений. Внутри этой области значения параметров в узлах оценивались при выполнении ряда условий (наличие определенного числа наблюдений в радиусе поиска, пространственная однородность распределения наблюдений относительно узла интерполяции). Указанные ограничения снижают величину ошибки интерполяции и тем самым повышают качество гридированных полей.

Корабль погоды «Майк», расположенный в точке  $66^\circ$  с.ш.,  $2^\circ$  в.д., является единственной морской станцией в СЕБ, где измеряются все характеристики, необходимые для расчета потоков тепла по балк-формулам. Ряд наблюдений является уникальным с точки зрения продолжительности (с 1948 г.) и синхронности метеорологических и океанологических наблюдений. Последнее позволяет исключить дополнительные неопределенности, связанные с интерполяцией данных. С 2002 г. на корабле погоды начаты STD-зондирования, что значительно повысило вертикальное разрешение наблюдений.

#### ПОТОКИ ТЕПЛА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ОКЕАН–АТМОСФЕРА

Существует целый ряд неопределенностей расчетных алгоритмов тепловых потоков на основе судовых наблюдений. Анализ точности существующих расчетных схем и региональных особенностей процессов обмена в высоких широтах позволил выбрать следующие алгоритмы, наиболее близко соответствующие поставленным задачам.

Коротковолновая приходящая радиация была рассчитана с помощью формулы Рида [21] с использованием спутникового массива альбедо, разработанного в Финском метеорологическом институте [25]. Для параметризации потока приходящей радиации при чистом небе использовалась модель ERA [5].

Длинноволновый поток тепла был получен с помощью формулы, разработанной в Саутгемптонском Океанографическом Центре. Она специально разрабатывалась для средних широт и тестировалась на данных, полученных в СЕБ [16].

Турбулентные потоки тепла были рассчитаны по алгоритму COARE (Coupled Ocean–Atmosphere Response Experiment, 1990–2003) [7, 8]. Изначально данный алгоритм разрабатывался для экваториального региона и тестировался на данных эксперимента COARE, что ограничивало его работоспособность скоростями ветра от 0 до 12 м/с. Вследствие широкой популярности алгоритма (более 200 цитирований в реферируемых журналах), он был значительно доработан и адаптирован для использования вне тропического региона [7].

Существуют положительные примеры использования COARE в средних и высоких широтах [8, 9, 17, 27], при низких температурах воды и высоких скоростях ветра. Появилась возможность учета региональных климатических особенностей за счет расчета входящих в алгоритм физических переменных как функции от внешних параметров (температуры, широты, солнечного потока тепла и т.п.). Недавние усовершенствования сделали COARE одним из лучших среди балк-алгоритмов, которые могут быть использованы в СЕБ [7].

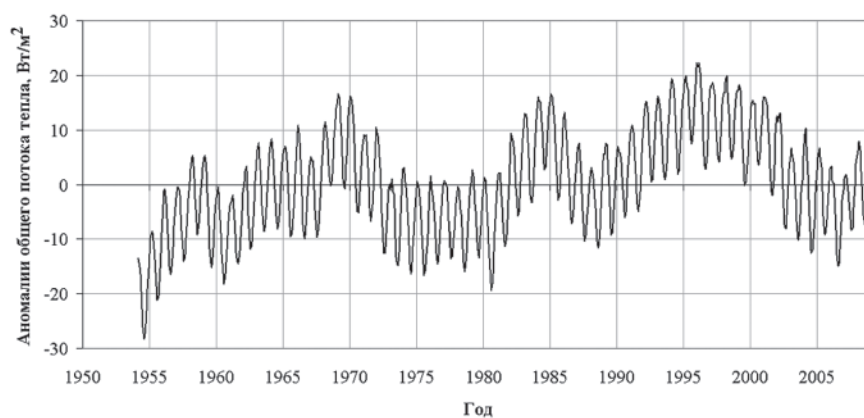


Рис. 1. Временной ход аномалий общего потока тепла в точке 66° с.ш, 2° в.д (по данным корабля погоды «Майк»).

Положительные значения соответствуют отдаче тепла от океана. Временной ряд сглажен скользящим усреднением.

Временной ход общего потока тепла, рассчитанного по данным корабля погоды «Майк» с помощью алгоритма COARE 3.0, приведен на рис. 1. Видны три основных периода усиления притока тепла из океана в атмосферу: в конце 1960-х—середине 1980-х гг. и середине 1990-х гг., и несколько периодов усиленной аккумуляции тепла океаном. Причины усиления теплоотдачи требуют детального изучения и будут рассмотрены ниже.

Анализ составляющих общего потока тепла показал, что наибольший вклад в изменчивость вносят его турбулентные составляющие – явный и скрытый потоки тепла. Это означает, что в периоды усиления теплоотдачи из океана происходили процессы, обостряющие температурные градиенты в пограничном слое вода–воздух.

#### ТОЛЩИНА ПЕРЕМЕШАННОГО КВАЗИОДНОРОДНОГО СЛОЯ

Верхний квазиоднородный слой океана изучен в значительно меньшей степени, чем пограничный слой атмосферы. Этому есть несколько простых объяснений. Во-первых, недостаточное количество и качество исторических данных, в особенности низкое вертикальное разрешение профилей, затрудняют надежное определение характеристик ВКС. Во-вторых, используется множество различных определений ВКС и, соответственно, методик нахождения его толщины, что усложняет сопоставление полученных результатов.

Существует три основные группы методов расчета толщины ВКС: методы порогового критерия (конечно-разностные методы); градиентные методы; методы анализа кривизны профиля.

Другие алгоритмы, такие как ступенчатый регрессионный метод наименьших квадратов (step-function least squares regression method) [18], метод захвата (integral depth-scale method, trapping method) [19], алгоритм «разделения и склейки» (split and merge) [26], не получили широкого распространения из-за необходимости привлечения дополнительной информации, требования экспертного контроля и сложности автоматизации [26].

Исторические океанографические данные достаточно часто имеют низкое вертикальное разрешение и содержат ошибки. Как показали тестовые расчеты, единственная группа методов, которая может быть использована в данном случае,

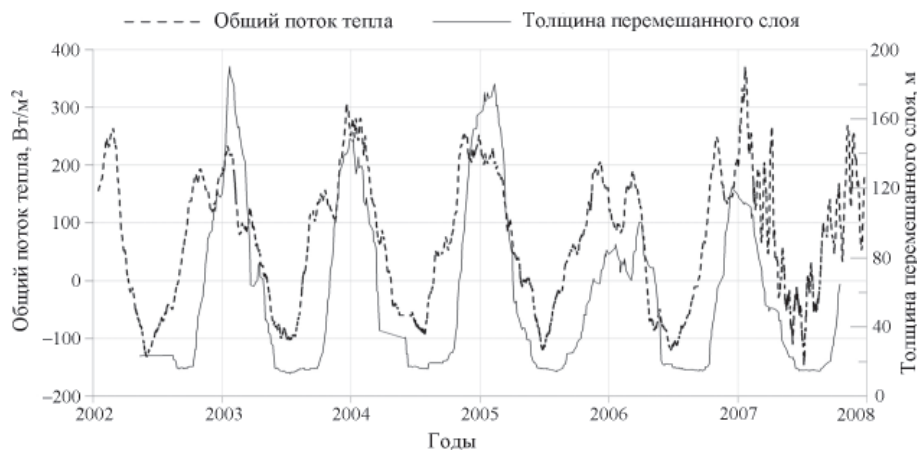


Рис. 2. Временной ход толщины ВКС и суммарного потока тепла, рассчитанных по данным наблюдений корабля погоды «Майк» за 2002–2008 гг.

это методы с заданным пороговым критерием. Остальные способы определения толщины ВКС дают слишком большую погрешность, причиной которой являются большие расстояния между измерениями по вертикали.

Толщина перемешанного слоя была рассчитана для всего ряда данных корабля погоды «Майк» по всем приведенным выше методикам за период с 1948 по 2009 г. В каждой из групп методов выбирались по несколько наиболее часто употребляемых и цитируемых в литературе алгоритмов. Результаты расчетов в целом отражали физические процессы формирования и трансформации ВКС во времени, но были сильно зашумлены и неоднородны. Расстояние между горизонтами в исторических данных составляло до 50 м в верхнем слое, что привело к высоким погрешностям расчета. Попытки корреляции полученных результатов с потоками тепла не принесли положительных результатов, хотя физическая взаимосвязь этих параметров не вызывает сомнений. Величина коэффициента корреляции составила от 0,3 до 0,5 для различных методик определения ВКС.

Как было отмечено, с 2002 г. на корабле погоды «Майк» параллельно с батиметрией стали проводиться STD-зондирования. Повторные расчеты по данным с высоким разрешением выявили высокую положительную корреляцию между толщиной ВКС и суммарным потоком тепла (рис. 2). Значения коэффициентов корреляции менялись от 0,75 до 0,85 в зависимости от используемой методики. Это наглядно показывает, что для точного определения характеристик ВКС необходимы качественные данные с высоким вертикальным разрешением. Следует обратить внимание на временное запаздывание, в течение которого перемешанный слой подстраивается под изменившийся тепловой поток. Этот промежуток составляет в среднем от 3 до 4 месяцев. Нарушение этой зависимости может быть связано с колебаниями адвекции и изменениями фронтального раздела, расположенного вблизи корабля погоды.

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Фоновая стратификация верхнего слоя океана оказывает определяющее влияние на формирование ВКС. Особенность стратификации в зоне распространения теплых и соленых атлантических вод в СЕБ заключается в том, что устойчивая

стратификация верхнего слоя определяется снижением температуры с глубиной (в отличие от СЛО и восточных частей СЕБ, где основной вклад вносит распределение верхнего слоя). Охлаждение (усиление потока тепла от океана к атмосфере) на поверхности приводит к развитию как термической, так и халинной конвекции, что способствует быстрому увеличению плотности, интенсивному перемешиванию и формированию глубокого ВКС. Среднегодовые профили температуры и солёности в районе корабля погоды «Майк» показывают, что ядро атлантических вод располагается в слое 50–150 м. В период весенне-зимней конвекции этот слой

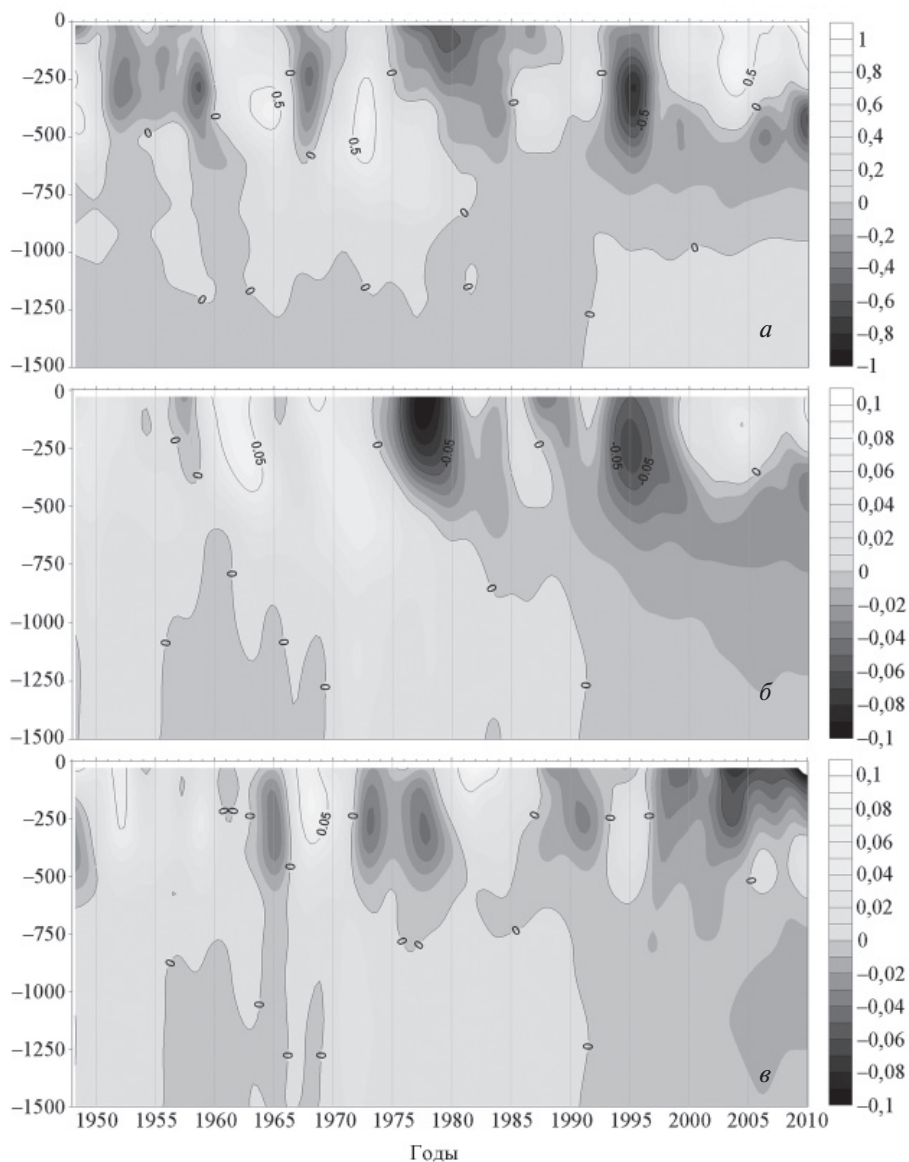


Рис. 3. Временные диаграммы аномалий температуры (*a*), солёности (*б*) и плотности (*в*), построенные по исходным данным за период с 1948 по 2009 г. в районе корабля погоды «Майк»



перемешивается, что приводит к увеличению солености и плотности всего верхнего квазиоднородного слоя. Поэтому, помимо интенсивности взаимодействия на границе вода–воздух, определяемой атмосферными параметрами и температурой поверхности воды, развитие ВКС контролируется колебаниями объемов и термohалинных характеристик в ядре атлантических вод, поступающих в регион.

Адвекция низкосоленых аномалий способна значительно усилить стратификацию. Другими словами, потребуется значительное усиление потоков от океана для увеличения толщины ВКС. Наоборот, при высоких фоновых значениях солености верхнего слоя аналогичная толщина ВКС может быть достигнута при меньшем потоке тепла от океана. Совпадение двух благоприятных факторов (высокая фоновая соленость верхнего слоя и интенсивная теплоотдача на поверхности) может привести к развитию ВКС с экстремальной толщиной [4].

Для иллюстрации общей гидрологической ситуации в СЕБ на рис. 3 приведены временные диаграммы температуры и солености, построенные по исходным данным за период с 1948 по 2009 г. в районе корабля погоды «Майк».

На диаграммах ясно прослеживаются периоды с устойчивым гидрологическим режимом и периоды резких изменений термohалинных характеристик. Адвекция низкосоленых аномалий через район происходила в периоды 1967–1972, 1976–1981, 1992–1997 гг. До 1975 г. преобладала высокая соленость верхнего слоя. Для перечисленных периодов с устойчивым режимом были построены средние поля и поля аномалий на основании описанного выше набора гридированных полей для апреля (не приводится).

Результаты показывают, что с точки зрения стратификации верхнего слоя наиболее благоприятным периодом для развития глубокого ВКС был период до 1975 г. Увеличение солености верхнего слоя с конца 1990-х гг. сопровождалось значительным потеплением и, соответственно, снижением плотности верхнего слоя (рис. 3).

Как показывают наблюдения на прибрежных метеорологических станциях и данные реанализов [2], с конца 1960-х гг. температура воздуха над акваторией СЕБ была аномально низкой на протяжении нескольких лет, в то время как соленость на поверхности оставалась высокой. Резкое охлаждение на поверхности инициировало повсеместное усиление вертикального перемешивания. В западных областях СЕБ, особенно в центральной части Гренландского моря, наблюдались эпизоды развития глубокой конвекции. В восточных частях, в области адвекции атлантических вод происходила усиленная трансформация поверхностных вод в промежуточные [14, 15]. Временные диаграммы по кораблю погоды «Майк» подтверждают формирование положительной аномалии солености (рис. 3) в промежуточных и глубинных слоях.

Положительные подповерхностные аномалии температуры и солености в восточной части СЕБ, сформированные в период охлаждения, сохраняли свои свойства в течение почти 10 лет. Адвекция «Великой соленостной аномалии» (ВСА) во второй половине 1970-х гг. [6] привела к сильной рестратификации вод [14, 15] и ослаблению процесса трансформации поверхностных вод в промежуточные. Это послужило толчком к постепенному снижению температуры и солености вод в промежуточном и глубинных слоях. Новая отрицательная соленостная аномалия середины 1990-х гг. стала причиной сохранения сильной устойчивой стратификации верхнего слоя. Несмотря на начавшийся рост солености атлантических вод с конца 1990-х гг., устойчивость стратификации остается высокой, т.к. основной вклад в поверхностную плотность вносят высокие температуры воды.

Усиления теплоотдачи океана в периоды, отмеченные на рис. 1, соответствуют периодам увеличенного выноса льда и полярных вод из Арктического бассейна под влиянием усилившихся северных потоков в атмосфере, выносивших холодный воздух на акваторию Гренландского и Норвежского морей. Это подтверждается изменением положения границы ледяного покрова [22, 24], данными массива

концентрации морского льда, созданного в Хадли-Центре (HadSST) [20], и наблюдениями за температурой воздуха. Натурные наблюдения показали, что каждому периоду с низкими температурами воздуха зимой и положительной аномалией выноса льда также соответствовало и заглубление перемешанного слоя.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье даны количественные оценки потоков тепла и толщины ВКС, полученные с помощью современных алгоритмов их расчета. Работоспособность различных методик проверена на данных метеорологических и океанографических наблюдений корабля погоды «Майк» в Норвежском море за период с 1949 по 2009 г. Высокое вертикальное разрежение профилей является ключевым фактором корректного определения толщины ВКС. Высокие коэффициенты корреляции общего потока тепла и толщины ВКС получены по STD-зондированиям, и определен временной интервал приспособления ВКС к сезонным изменениям потоков на поверхности.

Возможность аномального глубокого развития ВКС и модификации свойств промежуточных и глубинных вод рассмотрена в контексте устойчивости стратификации верхнего слоя в СЕБ по историческим данным. Временные диаграммы термохалинных характеристик по данным корабля погоды «Майк» показывают, что стратификация верхнего слоя регулируется соотношением в нем атлантических и полярных вод, перераспределение которых по вертикали, в свою очередь, зависит от интенсивности взаимодействия на границе вода–воздух. За период инструментальных наблюдений в СЕБ выявлено несколько устойчивых гидрологических режимов, обуславливающих различные режимы вертикального перемешивания. Их формирование связано, в первую очередь, с периодическим усилением адвекции полярных вод и морского льда из Северного Ледовитого океана (СЛО), что приводит к резкому распреснению верхнего слоя и усилению стратификации, препятствующей вертикальному обмену. Наглядным подтверждением этому являются две сильные отрицательные аномалии солёности 1970-х и 1990-х гг. В свою очередь, колебания адвекции и свойств АВ могут вызываться факторами, действующими далеко за пределами СЕБ и СЛО. Так, увеличение солёности АВ в СЕБ, несмотря на продолжающиеся снижение объема морского льда в СЛО и таяние ледников, с конца 1990-х гг. может быть связано с изменением относительной динамики полярного и субтропического круговоротов Атлантического океана [12]. Хотя фундаментальная причина перестройки общей циркуляции остается главным предметом научных дискуссий.

Присутствие в верхнем слое теплых и соленых вод атлантического происхождения в восточных частях СЕБ означает, что резкое и/или продолжительное снижение температуры воздуха может приводить к развитию термической и халинной конвекции. В сочетании с высокой солёностью в ядре АВ это может приводить к активизации глубокой конвекции, как это наблюдалось в конце 1960-х гг. В статье установлено совпадение между периодами усиленной теплоотдачи АВ и усиленного выноса морского льда из СЕБ. В каждом из трех эпизодов с экстремальными потоками положение кромки льда в СЕБ было смещено в восточном направлении или объем выноса льда из СЛО был повышен [23, 29]. В заключение отметим, что экстремально низкая плотность АВ в восточных областях СЕБ в последнее десятилетие определяется высокой температурой воды. В то же время высокая солёность АВ позволяет утверждать, что верхний слой в СЕБ подготовлен для усиления вертикального перемешивания в случае сильного снижения температуры воздуха.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.



2. *Кораблев А.А., Пнюшков А.В., Смирнов А.В.* К вопросу о возможности использования данных ERA-40 и NCEP/NCAR реанализов для изучения климата в северной полярной области // Труды ААНИИ. 2007. Т. 447. С. 44–67.
3. *Кораблев А.А., Пнюшков А.В., Смирнов А.В.* Технология создания баз океанографических данных на примере Северо-Европейского бассейна Арктики // Ученые записки РГГМУ. 2005. № 1. С. 89–108.
4. *Alekseev G.V., Johannessen O.M., Korablev A.A., Ivanov V.V., Kovalevsky D.V.* Interannual variability in water masses in the Greenland Sea and adjacent areas // Polar Research. 2001. Vol. 20(2). P. 201–208.
5. *Annear R.L., Wells S.A.* A comparison of five models for estimating clear-sky solar radiation // Water Resour. Res. Vol. 43. W10415. doi:10.1029/2006WR005055.
6. *Dickson R.R., Meincke J., Malmberg S.A., Lee A.J.* The «Great Salinity Anomaly» in the northern North Atlantic 1968–1982 // Progress in Oceanography, Pergamon. 1988. Vol. 20. P. 103–151.
7. *Fairall C.W., Bradley E.F., Rogers D.P., Edson J.B., Young G.S.* Bulk parameterization of air-sea fluxes in TOGA COARE // J. Geophys. Res. 1996. Vol. 101. P. 3747–3767.
8. *Fairall C.W., Bradley E.F., Hare J.E., Grachev A.A., Edson J.B.* Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm // J. Climate. 2003. Vol. 16. P. 571–591.
9. *Foltz G.R., Grodsky S.A., Carton J.A., McPhaden M.J.* Seasonal mixed layer heat budget of the tropical Atlantic Ocean // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108(C5). 3146. doi:10.1029/2002JC001584.
10. *Hansen B.* The circulation of the northern part of the Northeast Atlantic // Rit Fiskideildar. 1985. Vol. 9. P. 110–126.
11. *Hansen B., Osterhus S.* North Atlantic – Nordic Seas Exchanges // Progr. Oceanog. 2000. Vol. 45. P. 109–208.
12. *Hatun H., Sando A.B., Drange H., Hansen B., Valdimarsson H.* Influence of the Atlantic Subpolar Gyre on the Thermohaline Circulation // Science. 2005. № 309. P. 1841–1844.
13. *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.
14. *Isachsen P.E., Mauritzen C., Svendsen H.* Dense water formation in the Nordic Seas diagnosed from sea surface buoyancy fluxes // Deep-Sea Res. 2007. № 54. P. 22–41.
15. *Johannessen O.M.* Brief overview of the physical oceanography // The Nordic Seas. New York. Springer-Verlag. 1986. P. 103–127.
16. *Josey S.A., Pascal R.W., Taylor P.K., Yelland M.J.* A new formula for determining the atmospheric longwave flux at the ocean surface at mid-high latitudes // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108(C4). 3108. doi:10.1029/2002JC001418.
17. *Kubota M., Iwabe N., Cronin M.F., Tomita H.* Surface heat fluxes from the NCEP/NCAR and NCEP/DOE reanalyses at the KEO buoy site // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. C02009. doi:10.1029/2007JC004338.
18. *Papadakis J.E.* Determination of the wind mixed layer by an extension of Newton's method // Pacific Marine Sci. Rep. 1981. 81–9, Institute of Ocean Sciences, Sidney, BC, Canada, 32 p.
19. *Price J.F., Weller R.A., Pinkel R.* Diurnal cycling: Observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling, and wind mixing // J. Geophys. Res. 1986. Vol. 91. P. 8411–8427.
20. *Rayner N.A.; Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A.* 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. doi:10.1029/2002JD002670.
21. *Reed R.K.* On estimating insolation over the ocean // J. Phys. Oceanogr. 1977. Vol. 7. P. 482–485.
22. *Schmith T., Hansen C.* Fram Strait ice export during the 19th and 20th centuries reconstructed from a multi-year sea-ice index from Southwestern Greenland // J. Climate. 2003. Vol. 16. P. 2782–2791.
23. *Spreen G., Kern S., Stammer D., Hansen E.* Fram Strait sea ice volume export estimated between 2003 and 2008 from satellite data // Geophys. Res. Lett. 2009. 36. L19502. doi:10.1029/2009GL039591.
24. *Spreen G., Kern S., Stammer D., Forsberg R., Haarpaintner J.* Satellite-based estimates of sea ice volume flux through Fram Strait // Ann. Glaciol. 2006. Vol. 44. P. 321–328.

25. Tanskanen A., Arola A., Kujanpaa J. Use of the moving time—window technique to determine surface albedo from the TOMS reflectivity data // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4896. P. 239–250.
26. 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.
27. Vage K., Pickart R.S., Moore G.W.K., Ribergaard M.H. Winter mixed-layer development in the central Irminger Sea: The effect of strong, intermittent wind events // J. Phys. Oceanogr. 2008. Vol. 38, P. 541–565.
28. Wackernagel H. Multivariate Geostatistics: an introduction with applications. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 387 p.
29. Zhang J., Rothrock D.A. Modeling global sea ice with a thickness and enthalpy distribution model in generalized curvilinear coordinates // Mon. Wea. Rev. 2003. Vol. 131 (5). P. 681–697.

A.V.SMIRNOV, A.K.KORABLEV

## INTERRELATIONSHIP BETWEEN MIXED LAYER CHARACTERISTICS AND ATMOSPHERIC HEAT FLUXES IN THE NORDIC SEAS

*Estimates of the relationships between the net heat flux and mixed layer properties in the Nordic Seas are examined. Oceanographic data are derived from the Oceanographic Data Base (ODB) compiled in the Arctic and Antarctic Research Institute. Ocean weather ship 'Mike' (OWS) data are used to calculate radiative and turbulent components of the net heat flux. The net shortwave flux was calculated using a satellite albedo data set and the EPA model. The net longwave flux was estimated by Southampton Oceanography Center (SOC) method. Turbulent fluxes at the air-sea interface were calculated using the COARE 3.0 algorithm. The net heat flux was calculated by using oceanographic and meteorological data of the OWS 'Mike'. The mixed layer depth was estimated for the period since 2002 until 2009 by the 'Mike' data as well. A good correlation between these two parameters has been found. Sensible and latent heat fluxes controlled by surface air temperature/sea surface temperature gradient are the main contributors into net heat flux. Significant correlation was found between heat fluxes variations at the OWS 'Mike' location and sea ice export from the Arctic Ocean. It is determined that the net heat flux increases for 10..20 W/m<sup>2</sup> during strong sea ice advection periods that is 15..25 % of its mean value.*

*Keywords:* air-sea interaction, mixed layer depth, net heat flux, Nordic Seas.