

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ АРГО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПОЛЯРНЫХ МОРЕЙ С АТМОСФЕРОЙ, АТЛАНТИЧЕСКИМ И СЕВЕРНЫМ ЛЕДОВИТЫМ ОКЕАНАМИ И ИНТЕНСИВНОСТИ ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ

**К. В. Лебедев, А. П. Попов, Б. Н. Филюшкин**

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,  
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,  
e-mail: [KLebedev@ocean.ru](mailto:KLebedev@ocean.ru)*

По данным измерений поплавков Argo за период с 2005 по 2014 гг. с помощью Argo-модели были рассчитаны и исследованы среднегодовые величины полей температуры, солёности, плотности и скорости течений Полярных морей (Норвежского и Гренландского). На этой основе выполнены расчеты обменов теплом для района Полярных морей с атмосферой и окружающими акваториями через замыкающие разрезы со стороны проливов Фрама, Датского, Атлантического океана и Баренцева моря. Были получены и исследованы оценки колебаний величин обменов для климатических, среднегодовых и сезонных масштабов. Показано, что средний за период расчетов баланс тепла в исследуемой области хорошо совпадает с осредненными за аналогичный период времени потоками тепла из океана в атмосферу, рассчитанными по данным реанализа ECMWF ERA-Interim. Обсуждается методика оценки изменчивости средней интенсивности образования и таяния льда.

**Ключевые слова:** Полярные моря, моделирование, течения, теплоперенос, изменчивость, измерения Арго, морской лед

### Введение

Поступающие в Арктический регион теплые и соленые воды из Северной Атлантики (СА) вступают в контакт с холодными и менее солеными водами морей Северного Ледовитого океана (СЛО). Взаимодействия этих принципиально различных водных масс в основном происходят в пределах Полярных морей (the Nordic Seas) – Норвежского и Гренландского (Østerhus et al., 2005; Hansen et al., 2008; Мошонкин и др., 2017). В связи с тем, что в цитируемой зарубежной литературе широко используется термин “the Nordic Seas”, в настоящей статье будем называть Норвежское и Гренландское моря Полярными морями (ПМ).

Поступление большого количества тепла и соли с водами СА создает уникальную переходную область с особым региональным климатом, где, не смотря на арктические широты, моря в течение всего года свободны ото льда. Более того, эта область определяет умеренный климат Западной Европы. Воды СА поступают тремя основными струями. Первая – небольшая Исландская струя в виде Восточно-Исландского

течения, двигаясь через Датский пролив, погибает Исландию с севера (Kohl, Kase, Stammer, 2007; Филюшкин и др., 2013). Вторая – Фарерская струя попадает в переходную область через неглубокие (500 м) проходы Исландско-Фарерского хребта и образует относительно узкое течение на восток вдоль его северного склона (Orvik, Niiler, 2002; Hansen et al., 2008). Третья – Шетландская струя вод СА входит через глубокий (более 1000 м) Фарерско-Шетландский канал (Hansen, Østerhus, 2007). Эта струя несет наиболее теплую (9.5 °С) и соленую (35.32 епс) воду и, двигаясь на север, в основном формирует климат Норвежского, Гренландского и Баренцева морей (Girton, Sandford, 2003; Rhines, Häkkinen, Josey, 2008; Skagseth et al., 2008; Мошонкин и др., 2017).

Особенности этой контактной области состоят в том, что Гренландское море связано с СЛО широким (около 350 км) и глубоким (до 2500 м) проливом Фрама. Через пролив в его восточной части на север поступают воды (температура больше 2 °С) Западно-Шпицбергенского течения, являющегося продолжением струи вод СА. В западной части пролива поступают формирующие Восточно-Гренландское течение холодные воды СЛО с температурой ниже 0 °С и льды. Далее эти воды через Датский пролив выходят в СА (Schauer et al., 2008; Филюшкин и др., 2013).

Появление в начале XXI века постоянно действующей глобальной сети дрейфующих измерителей международной программы Argo предоставляет уникальные возможности непрерывного мониторинга состояния ПМ, оценок переносов массы, тепла и солей на ключевых разрезах. Для обработки поступающей по программе Argo информации в Институте океанологии им. П. П. Ширшова РАН была разработана оригинальная Argo-модель исследования глобального океана (АМИГО). Argo-модель состоит из блока вариационной интерполяции на регулярную сетку данных профилирования дрейфующих измерителей Argo и блока модельной гидродинамической адаптации вариационно проинтерполированных полей, что позволяет получать по нерегулярно расположенным данным измерений Argo полный набор океанографических характеристик: температуру, соленость, плотность и скорость течений (Лебедев, 2016, 2017).

В работах авторов (Лебедев, Филюшкин, Кожелупова, 2019; Лебедев, Филюшкин, Щепеткин, 2020) отмечалась важная роль измерений Argo в Полярных морях, так как классические гидрофизические наблюдения из-за трудных погодных условий – низких температур и сильных ветров, и волнения – крайне затруднены. Анализ результатов численных экспериментов показал, что именно изменчивость полей тангенциального напряжения трения ветра является основным фактором, определяющим межгодовую изменчивость водообмена области ПМ с Атлантическим и Северным Ледовитым океанами. Авторами на основе наблюдений, полученных дрейфующими измерителями Argo за 10 лет, с помощью Argo-модели были рассчитаны и исследованы поля температуры, солености, плотности и течений Норвежского и Гренландского морей, а также переносы массы, тепла и солей на четырех разрезах, ограничивающих область ПМ, положение которых было предложено в работе (Isachsen, Nøst, 2012).

Полученные авторами результаты обозначили направления дальнейших исследований. С одной стороны, было показано заметное влияние межгодовых и сезонных колебаний атмосферного индекса Североатлантического колебания на характер водообмена в проливах, связывающих ПМ с окружающими районами. С другой стороны, проведенные расчеты показали, что приток тепла в область ПМ больше, чем его отток, а баланс соли близок к нулю (Лебедев, Филюшкин, Кожелупова, 2019). Настоящая работа продолжает начатые исследования и посвящена изучению сезонной и межгодовой изменчивости теплообмена области ПМ с атмосферой и окружающими океанами и изучению возможности использования полученных данных для приблизительной оценки интенсивности процессов образования и таяния льда в регионе.

### Данные и методы их обработки

Исследование базируется на анализе изменчивости потоков тепла между океаном и атмосферой по данным реанализа ECMWF ERA-Interim (Dee et al., 2011) и результатах глобальных модельных расчетов АМИГО (Лебедев, 2016, 2017), выполненных с использованием данных измерений Argo (Argo, 2000) и полей напряжения трения ветра из этого же реанализа. Для контроля поведения решения и выбора оптимальных параметров модели были использованы данные спутниковой альтиметрии Aviso (Ducet et al., 2000), осредненные за соответствующий расчетному периоду временной интервал. Модель состоит из блока вариационной интерполяции на регулярную сетку данных профилирования Argo (Lebedev et al., 2010; Курносова, Лебедев, 2014) и блока модельной гидродинамической адаптации вариационно проинтерполированных полей. Использование модели общей циркуляции океана в режиме диагноза (разгон модели при фиксированных полях температуры и солёности) и гидродинамической адаптации (Иванов, Лебедев, Саркисян, 1997; Лебедев, 1999; Sarkisyan, Sündermann, 2009) позволяет рассчитать сбалансированные поля температуры, солёности, плотности и скорости течений по данным поплавков Argo. Метод гидродинамической адаптации успешно и плодотворно применяется разными авторами для расчетов сбалансированных гидрофизических полей как в отдельных районах океана и морях, так и для Мирового океана в целом (Демин и др., 1990; Иванов, Лебедев, Саркисян, 1997; Лебедев, 1999; Sarkisyan, Sündermann, 2009; Багатинский, Дианский, 2019; Дианский, Багатинский, 2021; Diansky et al., 2022).

Методика и особенности глобальных модельных расчетов АМИГО, результаты которых анализируются в данной работе в границах области ПМ, изложены в работах авторов (Лебедев, 2016, 2017). Остановимся подробнее на тех моментах, которые будут необходимы для понимания обсуждаемых в статье новых результатов. На основе данных Argo для 2005–2014 гг. были подготовлены два типа начальных пар полей температура–солёность с пространственным разрешением 1 градус по долготе и широте: среднеклиматические для 2005–2014 гг. (17 пар полей, включающие среднеклиматический год, сезоны и месяцы) и ежемесячные (120 пар полей), сезонные (40 пар полей),

годовые (10 пар полей), представляющие отдельные месяцы, сезоны и годы расчетного периода. Для каждой из пар полей был выполнен отдельный расчет (всего 187 расчетов) по модели общей циркуляции океана в режиме диагноза–адаптации. Модель общей циркуляции океана описывается полной системой уравнений гидротермодинамики океана, в качестве «интегральной» функции берётся уровень океана (Demin, Ibraev, 1989; Демин и др., 1990; Иванов, Лебедев, 1996). Использование уровня океана в качестве «интегральной» функции имеет то преимущество, что в многосвязных областях океана (наличие островов) не возникает дополнительных проблем по сравнению с решением задачи в односвязных областях.

Расчеты велись для всей акватории Мирового океана, ограниченной на севере  $85.5^\circ$  с. ш. на 32 горизонтах одноградусной сетки, соответствующих горизонтам массивов WOA-09 (Locarnini et al., 2010; Antonov et al., 2010); максимальная глубина океана составляла 5750 м. На глубинах, превышающих 2000 м, где отсутствуют измерения Argo, значения температуры и солёности брались из массивов WOA-09. В качестве граничных условий на поверхности океана задавались постоянные значения температуры и солёности, полученные по данным Argo для соответствующего месяца (года, сезона). Тангенциальное напряжение трения ветра для соответствующего месяца (года, сезона) задавалось по данным реанализа ECMWF ERA-Interim. Диагностические расчеты длительностью 50 суток с целью улучшения устойчивости велись при повышенном коэффициенте бокового турбулентного обмена импульсом, равным  $7 \times 10^7$  см<sup>2</sup>/с, после чего коэффициент бокового турбулентного обмена импульсом снижался до стандартной для адаптации величины  $7 \times 10^6$  см<sup>2</sup>/с, и следовала 6-суточная адаптация всего Мирового океана. Затем в течении 34 суток велась адаптация только экваториальной области Тихого океана, а в следующие 40 суток в процесс адаптации включались также экваториальные области Атлантического и Индийского океанов (границы экваториальных областей периодически смещались на  $3^\circ$  в северном и южном направлениях соответственно). На остальной акватории океана поля температуры и солёности при этом оставались неизменными, т. е. во внеэкваториальной зоне решалась задача гидродинамического диагноза. На завершающем этапе проводилась еще одна 6-суточная адаптация всего Мирового океана. Более детальное описание адаптационных расчетов можно найти в работах (Лебедев, 2016, 2017).

Для корректного описания водообмена при использовании одноградусной модельной сетки была проведена корректировка рельефа дна для ряда ключевых районов Мирового океана (Флоридский пролив, западная граница Гольфстрима, пролив Нэрса, Фарерско-Шетландский канал, Берингов пролив, район течения Куроисио, Индонезийские проливы и другие). В результате такой корректировки удалось устранить многие несоответствия измеренных полей плотности модельному одноградусному рельефу дна и добиться хорошего соответствия между модельными и измеренными расходами в ключевых проливах Мирового океана: 0.63 Св в Беринговом проливе, 1.5 Св через пролив Дейвиса, 1.1 Св в придонном течении Гибралтарского пролива, 15.4 Св через Индонезийские проливы (Лебедев, 2017). Расход Антарктического циркумполярного течения в проливе Дрейка получился равным 162 Св (Lebedev, 2018).

Хорошее соответствие модельных и измеренных среднесуточных значений глобального меж океанского водообмена подтверждает обоснованность выбранного подхода к обработке данных дрейфующих измерителей Argo и адекватность одноградусного разрешения модельной сетки при решении задач исследования крупномасштабной океанской циркуляции и изучения ее межгодовой и межсезонной изменчивости. База данных АМИГО находится в свободном доступе в сети Интернет на официальном сервере ИО РАН по адресу: <http://argo.ocean.ru/>.

### Основные результаты

Построенные по среднегодовым данным поля температуры, солёности и течений исследуемого района ПМ для горизонта 20 м представлены на рисунке 1. Отметим, что эти поля построены только по данным измерений Argo и хорошо коррелируют с такими же картами, созданными по данным гидрологических массивов Левитуса и отдельным съёмкам (Locarnini et al., 2010; Antonov et al., 2010; Isachsen, Nøst, 2012; Filyushkin, Sokolovskiy, Lebedev, 2018). Прежде чем переходить к анализу, следует заметить, что гидрологический режим ПМ хорошо изучен, и, хотя авторы знакомы с большим количеством публикаций по данному вопросу, в статье приведено минимальное число ссылок. Поэтому укажем основные работы: монографию ASOF (Arctic-Subarctic Ocean Fluxes, 2008) и ряд отдельных статей, где можно найти более полную библиографию (Hansen et al., 2008; Schauer et al., 2008; Rhines, Häkkinen, Josey, 2008; Skagseth et al., 2008; Мошонкин и др., 2017; Filyushkin, Sokolovskiy, Lebedev, 2018).

Главной особенностью гидрологических полей ПМ является наличие двух транзитных течений, пересекающих эту область с севера на юг. С юга через сложную систему проливов и хребтов от Гренландии до Норвегии входят теплые (10–12 °С) и солёные (35.2–35.4 епс) атлантические воды (Hansen et al., 2008). Эти воды образуют две ветви транзитного потока Норвежского течения – Норвежское фронтальное и Норвежское склоновое (Orvik, Niiler, 2002; Rossby, Prater, Søiland, 2009; Isachsen, Nøst, 2012; Filyushkin, Sokolovskiy, Lebedev, 2018). Норвежское склоновое течение движется вдоль континентального склона Норвегии, меньшая часть его вод поступает в Баренцево море, а основной перенос в виде Шпицбергенского течения уходит через пролив Фрама на север в СЛО. Норвежское фронтальное течение огибает Лофотенскую котловину с запада и севера, его воды поступают в пролив Фрама, где обе струи практически сливаются (рисунок 1).

На севере, в западной части пролива Фрама, формируется Восточно-Гренландское течение, несущее в южном направлении распреснённые воды СЛО (солёность 34.3–34.5 епс) с температурой от 0.5 до –1 °С и льды. Далее эти воды через Датский пролив поступают в СА. Эту динамическую картину отчетливо подтверждают карты распределения температуры и солёности на глубине 20 м (рисунки 1 а, б). Теплая (6–10 °С) и солёная (от 35.1 до 35.3 епс) атлантическая вода занимает всю акваторию Норвежского моря до хребтов Яна Майена и Моно-Книповича. На карте температуры

(рисунок 1а) видно, что очень теплые для таких широт воды ( $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) проникают в Баренцево море. А на карте солёности (рисунок 1б) также видно проникновение вод повышенной солёности ( $35.1\text{ епс}$ ) до северных границ области.

Для расчетов водообмена область ПМ была ограничена от окружающих океанов следующим образом (рисунок 1а): пролив Фрама по  $79^{\circ}$  с. ш. (далее Фрам), Баренцево море с запада меридианом по  $15^{\circ}$  в. д. от Норвегии до Шпицбергена (Баренц), Датский пролив по  $23^{\circ}$  з. д. от Исландии до Гренландии (Датский) и, наконец, разрез от Исландии до Норвегии (Исланд) по  $64^{\circ}$  с. ш. Подобное положение разрезов было предложено в работе (Isachsen, Nøst, 2012).

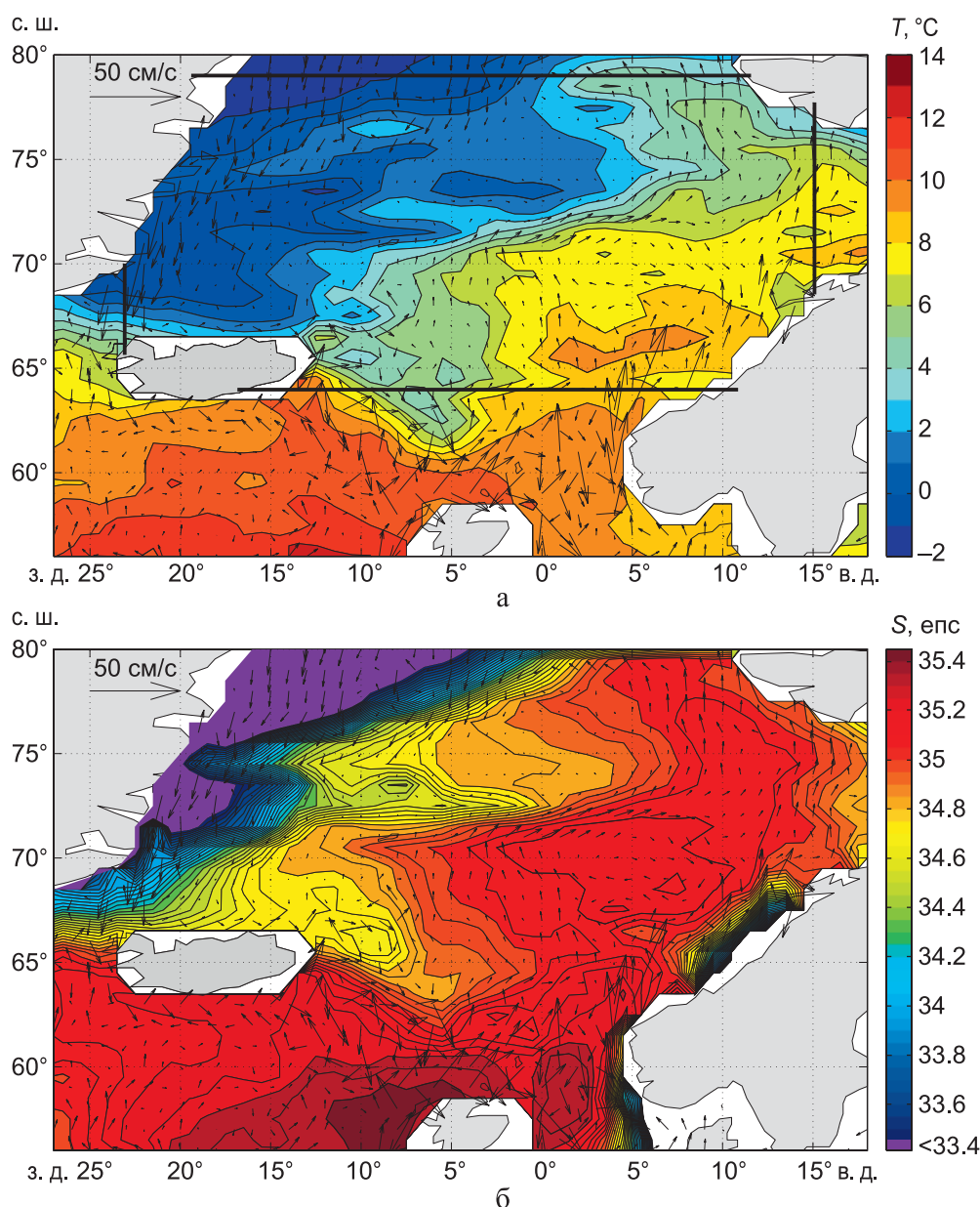


Рис. 1 – Среднегодовое распределение температуры (а) и солёности (б) на глубине 20 м по измерениям Арго за период с 2005 по 2014 гг. на фоне поля течений в области Полярных морей. Толстыми черными линиями (а) показано положение разрезов

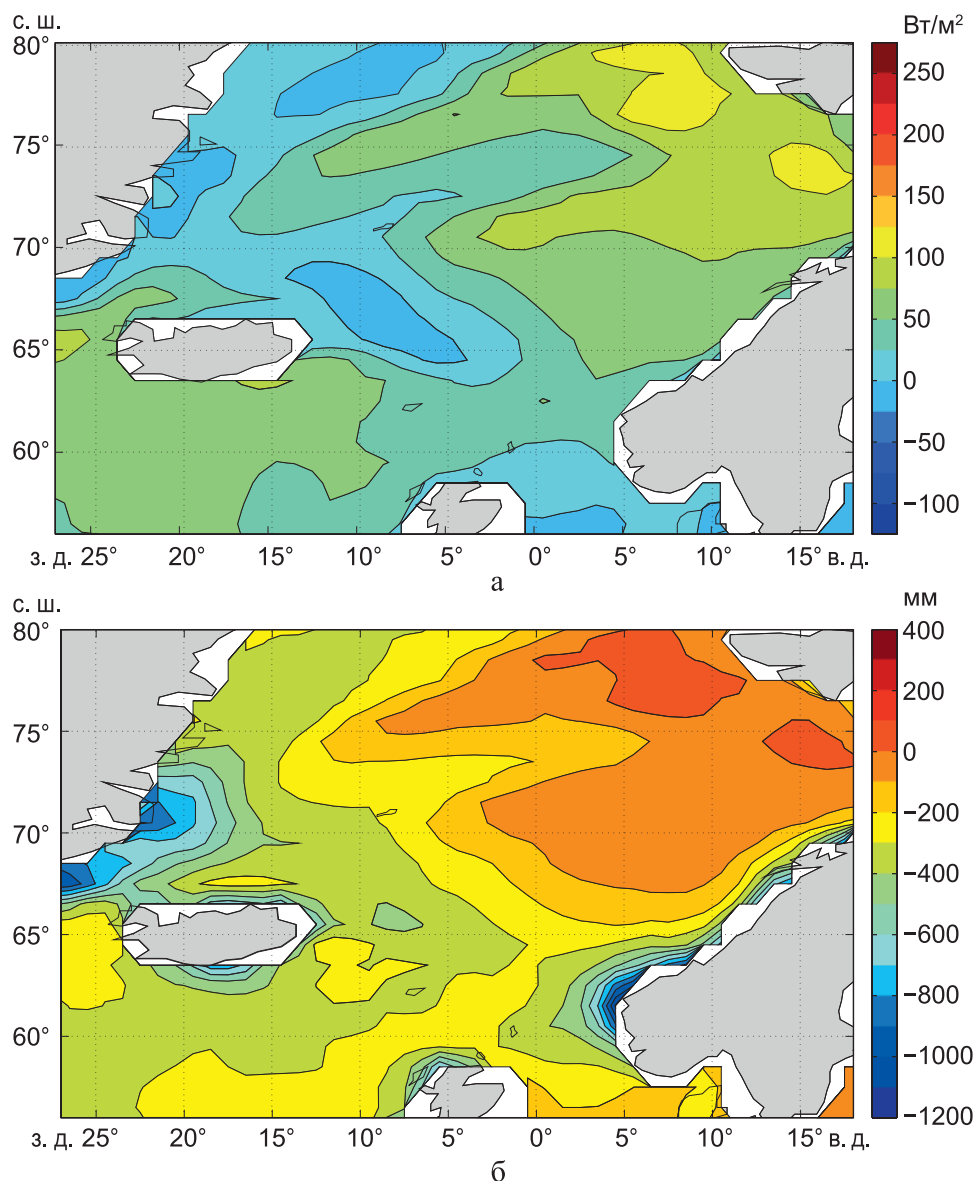


Рис. 2 – Среднегодовые за период с 2005 по 2014 гг. распределения потоков из океана в атмосферу (а) тепла ( $W/m^2$ ) и (б) влаги (мм) в области Полярных морей по данным реанализа ECMWF ERA-Interim

На рисунке 2 представлены среднегодовые за период с 2005 по 2014 гг. распределения потоков тепла и влаги из океана в атмосферу по данным реанализа ECMWF ERA-Interim (Dee et al., 2011). Поток тепла рассчитывался как сумма следующих представленных в массиве ECMWF ERA-Interim величин: slhf (surface latent heat flux), sshf (surface sensible heat flux), ssr (surface solar radiation) и str (surface thermal radiation), поток влаги рассчитывался как разница между величинами  $e$  (evaporation) и  $tp$  (total precipitation). Как видно из сравнения рисунков 2 между собой и с рисунками 1, потоки тепла и влаги в исследуемой области хорошо коррелируют между собой и с рассчитанными на основе данных Argo приповерхностными полями температуры и солёности, что объясняется повышенной

теплоотдачей и испарением поступающих в область ПМ теплых атлантических вод. Выбор для расчета потоков тепла данных именно этого реанализа обусловлен тем, что анализируемые в работе результаты модельных расчетов АМИГО были получены с использованием полей напряжения трения ветра из этого же реанализа ECMWF ERA-Interim (Лебедев, 2016, 2017). В предыдущей работе авторов (Лебедев, Филюшкин, Щепеткин, 2020) было показано, что основным фактором, определяющим межгодовую изменчивость водообмена ПМ с окружающими океанами, является изменчивость полей тангенциального напряжения трения ветра. В связи с этим использование данных несогласованных между собой реанализов при совместном анализе атмосферных потоков тепла и адвективных балансов вдоль границ области, полученных из решения гидродинамической модели, привело бы к некорректным результатам.

Расчеты обменов массой, теплом и солью для района ПМ с окружающими акваториями через указанные разрезы исследованы и подробно описаны в работе авторов (Лебедев, Филюшкин, Кожелупова, 2019). Средний за период 2005–2014 гг. приток вод через разрез «Исланд», рассчитанный на основе среднемесячных данных АМИГО, получился равным  $4.2 \pm 2.1$  Св. Среднее поступление воды через разрез «Фрам» оказалось близким к нулю, составив всего лишь  $0.3 \pm 0.6$  Св. Основная часть воды покидала область ПМ через разрез «Датский», средний расход через который оказался равным  $3.4 \pm 1.7$  Св. Через разрез «Баренц» область ПМ покидало в среднем  $1.1 \pm 0.7$  Св воды. Среднеклиматический теплоперенос по данным 2005–2014 гг. оказался равным: «Исланд» –  $200 \pm 36$  ТВт, «Баренц» –  $52 \pm 14$  ТВт, «Датский» –  $-9 \pm 6$  ТВт, «Фрам» –  $44 \pm 9$  ТВт. Среднепогодный теплоперенос, рассчитанный по среднемесячным значениям для периода 2005–2014 гг., получился близким среднеклиматическому: «Исланд» –  $200 \pm 48$  ТВт, «Баренц» –  $51 \pm 24$  ТВт, «Датский» –  $-10 \pm 8$  ТВт, «Фрам» –  $47 \pm 15$  ТВт. Таким образом, суммарный тепловой бюджет рассматриваемого района в 2005–2014 гг. получился положительным:  $92 \pm 56$  ТВт. Заметный рост теплопереноса в конце 2011 – начале 2012 гг. из СА в рассматриваемый район был связан, как отмечали авторы (Лебедев, Филюшкин, Кожелупова, 2019), с ростом переноса тепла Норвежским течением, который отмечался ранее авторами в работе (Лебедев, 2016) и объяснялся аномально высокими значениями индекса Североатлантического колебания (САК) в этот период времени.

Целью настоящей работы является анализ межгодовой и сезонной изменчивости балансов тепла в области ПМ. Переносы тепла через границы рассматриваемого района представлены на рисунке 3 графиками эволюции среднесезонных величин, рассчитанных относительно  $0^\circ\text{C}$ . Изменчивость теплопереносов носит хорошо выраженный сезонный характер: максимальные значения приходятся на осень–зиму, минимальные – на весну–лето Северного полушария. Черным пунктиром показана изменчивость суммарного теплового бюджета рассматриваемого района, а черной горизонтальной линией – его средняя для периода 2005–2014 гг. величина –  $90.2$  ТВт, рассчитанная по среднесезонным значениям.



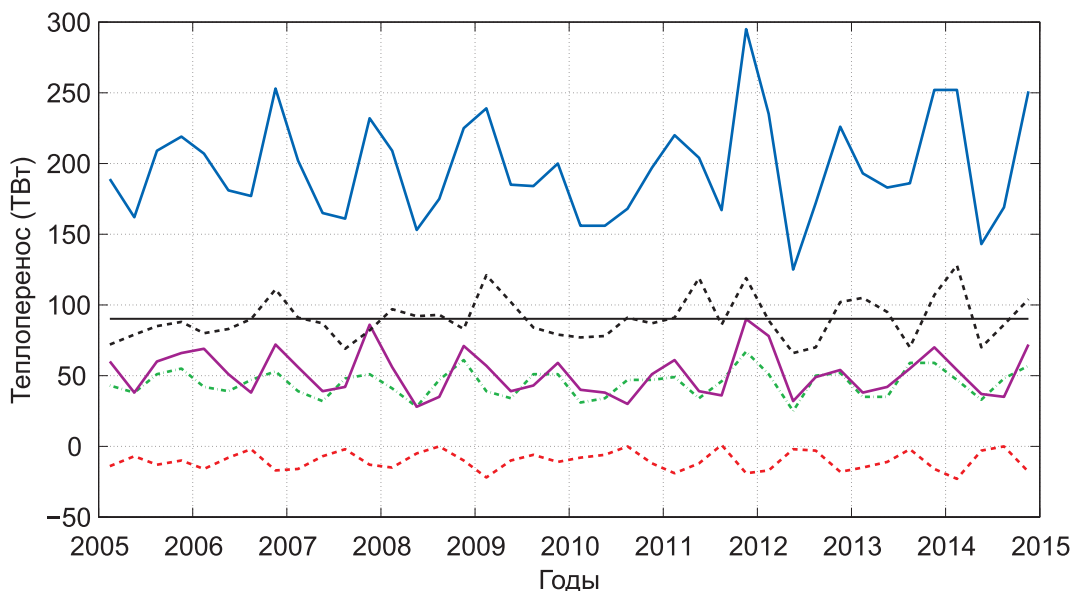


Рис. 3 – Изменчивость теплопереносов (ТВт) через разрез «Исланд» между Исландией и Норвегией по 64° с. ш. (толстая синяя линия), на разрезе «Баренц» между Норвегией и Шпицбергом по 15° в. д. (сиреневая толстая линия), в Датском проливе по 23° з. д. (красная штриховая линия), в проливе Фрама по 79° с. ш. (зеленый штрих-пунктир), а также суммарный тепловой баланс по всем разрезам (черная штриховая линия) и его среднее значение (черная горизонтальная линия). Данные представлены среднесезонными величинами и охватывают период 2005–2014 гг. по данным АМИГО

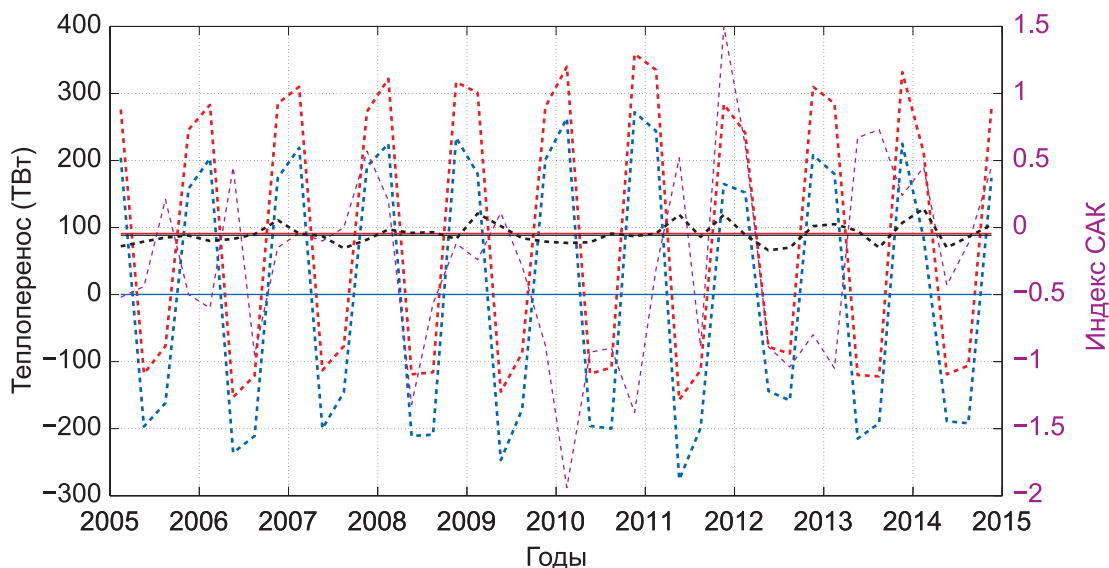


Рис. 4 – Изменчивость теплового баланса (ТВт) области Полярных морей за счет адвективного переноса тепла течениями через боковые границы исследуемого района по данным АМИГО (черная штриховая линия) и ее тепловой обмен с атмосферой по данным реанализа ECMWF ERA-Interim (красная штриховая линия), а также их разность (синяя штриховая линия). Средние значения величин показаны горизонтальными линиями соответствующих цветов. Дополнительно показана изменчивость индекса Североатлантического колебания (тонкий сиреневый пунктир). Данные представлены среднесезонными величинами и охватывают период 2005–2014 гг.

В дополнение к суммарному тепловому балансу по оконтуривающим исследуемую область разрезам на рисунке 4 представлены графики изменчивости теплового обмена области с атмосферой (поток тепла из океана в атмосферу по данным реанализа ECMWF ERA-Interim), а также их разность и средние величины. Обращает на себя внимание большая разница между амплитудами колебаний атмосферных потоков тепла и амплитудами колебаний тепла, поступающего в область за счет адвективного переноса течениями. При этом, как видно из рисунка 4, средние за 2005–2014 гг. значения поступления в область тепла за счет течений (90.2 ТВт), рассчитанные на основе данных численного моделирования АМИГО, и средний за этот период уход тепла в атмосферу (90.3 ТВт), по данным реанализа ERA-Interim, имеют очень близкие значения (черная и красная горизонтальные линии на рисунке 4 практически сливаются), а их разность колеблется вокруг околонулевого значения 0.1 ТВт (синяя горизонтальная линия на рисунке 4). При этом в отдельные годы несимметричность колебаний этой разности относительно околонулевого значения может достигать значительных величин, как, например, это было в 2011 г., когда весной величина разности составляла  $-276$  ТВт, а осенью  $+165$  ТВт (см. рисунок 4).

Для выяснения причин больших разностей между теплом, приходящим в область за счет течений, и теплом, уходящим из области в атмосферу, был дополнительно проанализирован сезонный ход этих величин, полученный по среднеклиматическим для 2005–2014 гг. данным расчетов АМИГО и осредненным соответствующим образом данным по потокам тепла из реанализа ECMWF ERA-Interim (рисунок 5).

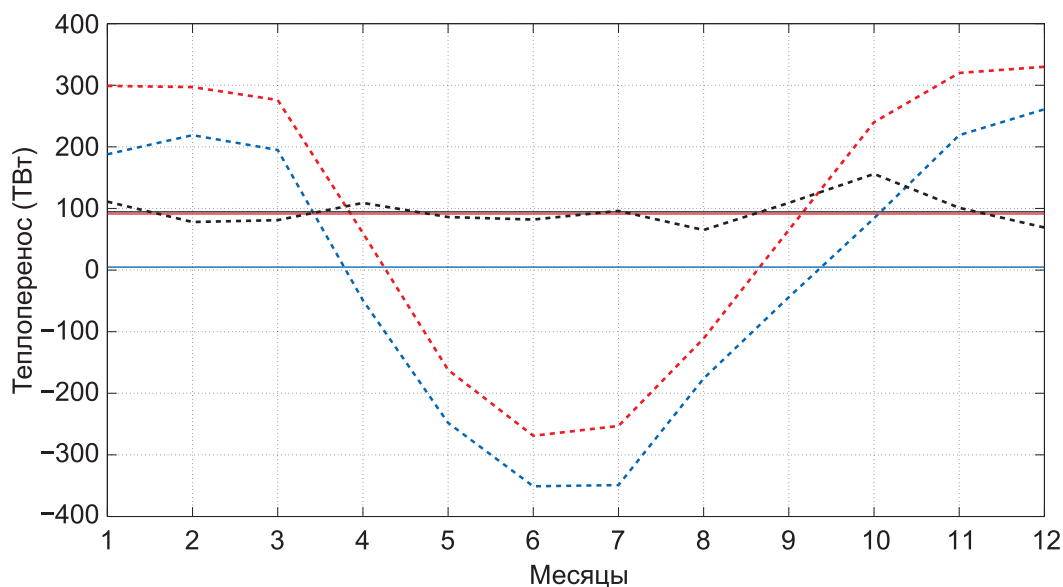


Рис. 5 – Сезонный ход теплового баланса (ТВт) области Полярных морей за счет адвективного переноса тепла течениями через боковые границы исследуемого района по данным АМИГО (черная штриховая линия) и ее тепловой обмен с атмосферой по данным реанализа ECMWF ERA-Interim (красная штриховая линия), а также их разность (синяя штриховая линия). Средние значения величин показаны горизонтальными линиями соответствующих цветов. Данные представлены среднеклиматическими месяцами 2005–2014 гг.

Как хорошо видно из рисунка 5, среднее значение приходящего в область вместе с течениями тепла по данным АМИГО (93 ТВт) хорошо согласуется со средней величиной ухода тепла в атмосферу по данным реанализа ECMWF ERA-Interim (89.4 ТВт), а имеющаяся разность между уходом и приходом тепла колеблется, как и в случае рисунка 4, вблизи нулевого значения. При этом в холодный для области ПМ осенне-зимний сезон (октябрь–март), когда преобладает полярная ночь, из океана в атмосферу поступает значительное количество дополнительного тепла, примерно в два раза превышающее его адвективное поступление в область вместе с теплыми водами СА. А в теплый весенне-летний сезон (апрель–сентябрь), когда преобладает полярный день, океан забирает из атмосферы назад ушедшее в осенне-зимний период тепло. Причем, как видно из рисунка 4, в отдельные годы симметрия этого дополнительного теплообмена может существенно нарушаться. Более низкую, чем в расчетах рисунка 4, точность согласования средних величин теплопереносов АМИГО со средними данными потоков тепла на основе данных реанализа ECMWF ERA-Interim можно объяснить тем, что расчеты базировались на среднемесячных полях, в то время как в расчетах (рисунок 4) использовались более обеспеченные измерениями средне-сезонные поля АМИГО; для полярных районов с малым числом измерений предпочтение следует отдавать среднесезонным полям АМИГО, как более обеспеченным данными измерений Argo.

Основная часть отмеченного выше дополнительного теплопереноса связана с изменением теплосодержания области ПМ в холодную и теплую половины года. Среднее изменение теплосодержания всего объема области ПМ от поверхности до дна за полугодие между апрелем и октябрём получилось по нашим 10-летним расчетам равным  $2.9 \pm 0.2 \times 10^{21}$  Дж, что составляет основную часть энергетического дисбаланса, который оценивается для полугодического периода как  $3.1 \pm 0.4 \times 10^{21}$  Дж. Остающийся дисбаланс в  $0.2 \pm 0.4 \times 10^{21}$  Дж, очевидно, связан с энергетическими затратами, сопровождающими образование и таяние льда. Лед имеет высокую удельную теплоту плавления, равную 330 кДж/кг, что превышает удельную теплоту плавления железа 270 кДж/кг. Таким образом, в холодный сезон атмосфера, забирая у океана тепло, сначала понижает температуру воды до критической, при которой начинает образовываться лед, а затем, в процессе образования льда, забирает у воды большую дополнительную энергию, которая высвобождается при ее замерзании. В теплый сезон при таянии льдов будет наблюдаться обратный процесс поглощения большого количества дополнительной энергии, необходимой для осуществления фазового перехода воды из твердого состояния в жидкое. При этом поглощаемая океаном дополнительная энергия не меняет его температуры. Поскольку процесс образования и таяния льда носит симметричный характер, при многолетнем осреднении в отсутствии явно выраженных трендов его средняя энергетика будет близка к нулевому значению. Несложный расчет показывает, что энергии  $0.2 \times 10^{21}$  Дж будет соответствовать образование за холодное полугодие с октября по март приблизительно  $0.5 \times 10^{12}$  кубических метров льда, охлажденного до средней температуры  $-20$  °С. Это соответствует покрытию слоем сезонного льда характерной толщины

1.3 м около 20 % площади нашей расчетной области, что представляется вполне разумной величиной. Таким образом, рассчитанные на основе данных АМИГО тепловые балансы теоретически могут использоваться для оценок средних объемов образования/таяния льда в области Полярных морей.

Возвращаясь к рисунку 4, попробуем объяснить причины и происхождение экстремальных значений на представляющей из себя разность потоков синей кривой весной и осенью 2011 г., полагая, что эта кривая описывает наряду с изменением теплосодержания области, также таяние (отрицательные значения) и образование (положительные значения) льда. Согласно результатам наших расчетов, образование льда в области ПМ в осенне-зимний период 2011–2012 гг. находилось на крайне низком уровне (синяя кривая на рисунке 4). Это наше предположение полностью подтверждается данными метеонаблюдений, согласно которым «в конце 2011 г. аномалии среднемесячной температуры воздуха в российском секторе Арктики превысили +12...+14°, а в обсерватории им. Кренкеля на о. Хейса – +16°. Впервые за всю историю проводившихся здесь метеонаблюдений в январе была зафиксирована температура воздуха выше 0°. Атлантические циклоны доходили даже до Якутии» (<https://meteoinfo.ru/climate/climat-tabl3/-2012-/6522-2012->). Заметный рост теплопереноса в конце 2011 – начале 2012 гг. из СА в рассматриваемый район связан с ростом переноса тепла Норвежским течением, который отмечался ранее авторами в работе (Лебедев, 2016) и объяснялся аномально высокими значениями индекса САК в этот период времени, что хорошо видно на рисунке 4.

### Заключение

По результатам проведенных исследований можно констатировать, что массив измерений Argo позволил построить адекватные для одноградусной сетки карты пространственной изменчивости термохалинных полей и рассчитать с использованием Argo-модели поля течений для всей акватории Полярных морей. По результатам расчетов были получены климатические, среднегодовые и сезонные величины потоков тепла на четырех разрезах, оконтуривающих область Полярных морей. Был показан полный баланс обмена теплом Полярных морей с атмосферой, Атлантическим и Северным Ледовитым океанами и проведен его детальный анализ. Результаты расчетов показали, что приток тепла в область Полярных морей больше, чем его отток. При этом, с одной стороны, средний за период расчетов баланс тепла в исследуемой области хорошо совпадает с осредненными за аналогичный период времени потоками тепла из океана в атмосферу, рассчитанными по данным реанализа ECMWF ERA-Interim. Однако, с другой стороны, амплитуда сезонной изменчивости баланса тепла в области оказалась заметно ниже амплитуды сезонной изменчивости потоков тепла из океана в атмосферу. В работе показано, что заметная разница амплитуд поступления в область тепла с течениями и его ухода в результате обмена с атмосферой на 90 % связана с изменением теплосодержания океана,

а остающиеся 10 %, предположительно, обусловлены процессами образования и таяния льда, которые являются энергетически достаточно затратными. Косвенно в пользу такого предположения говорит хорошее совпадение средних для области величин, из которых в результате осреднения был удален сезонный ход. Если бы сами расчеты были некорректными, такого хорошего совпадения средних величин как для среднеклиматических величин, так и при 10-летнем осреднении сезонного хода, добиться бы не удалось. Также следует отметить, что экстремальные значения потоков тепла зимой 2011–2012 гг. нашли свое полное подтверждение в данных арктических метеонаблюдений и хорошо коррелируют с экстремальными значениями межгодовых колебаний индекса САК.

**Благодарности.** Данные Арго были собраны и выложены в свободный доступ международной программой Argo при участии национальных программ (<http://www.argo.ucsd.edu>, <http://argo.jcommops.org>). Программа Argo является частью Глобальной инструментальной системы наблюдений за состоянием океана. Альтиметрическая информация подготовлена при помощи системы обработки спутниковой альтиметрии Ssalto/Duacs и распространяется через Aviso при поддержке CNES (<http://www.aviso.altimetry.fr/duacs/>). База данных АМИГО доступна на сервере ИО РАН по адресу: <http://argo.ocean.ru/>.

Работы по обработке данных Арго выполнены в рамках государственного задания Минобрнауки России № FMWE-2024-0016. Работы по анализу изменчивости теплообмена Полярных морей с атмосферой, Атлантическим и Северным Ледовитым океанами выполнены в рамках государственного задания Минобрнауки России № FMWE-2023-0002.

### Список литературы

1. Багатинский В. А., Дианский Н. А. Изменчивость термохалинной циркуляции Северной Атлантики в различные фазы Атлантической мультидекадной осцилляции по данным океанских объективных анализов и реанализов // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2021. Т. 57. № 2. С. 231–244.
2. Демин Ю. Л., Иванов Ю. А., Лебедев К. В., Усыченко И. Г. Расчет поля течений по модели диагноза и адаптации для района «Мегаполигона» // Океанология. 1990. Т. 30. № 4. С. 554–561.
3. Дианский Н. А., Багатинский В. А. Термохалинная структура вод Северной Атлантики в различные фазы Атлантической мультидекадной осцилляции // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 157–170.
4. Иванов Ю. А., Лебедев К. В. Моделирование реакции Северной Атлантики на нестационарное воздействие ветра // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1996. Т. 32. № 5. С. 672–679.
5. Иванов Ю. А., Лебедев К. В., Саркисян А. С. Обобщенный метод гидродинамической адаптации (ОМЕГА) // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1997. Т. 33. № 6. С. 812–818.
6. Курносова М. О., Лебедев К. В. Исследование изменчивости переносов в системе Куроисио на 35° с. ш., 147° в. д. по данным поплавков Argo и спутниковой альтиметрии // Докл. АН. 2014. Т. 458. № 2. С. 225–228.

7. *Лебедев К. В.* Среднегодовой климат океана. 2. Интегральные характеристики климата Мирового океана (переносы массы, тепла, солей) // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1999. Т. 35. № 1. С. 96–106.
8. *Лебедев К. В.* Арго-Модель Исследования Глобального Океана (АМИГО) // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 186–196.
9. *Лебедев К. В.* Арго-Модель Исследования Глобального Океана: синтез наблюдений и численного моделирования // Океанологические исследования. 2017. Т. 45. № 1. С. 53–69. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2017.45\(1\).6](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2017.45(1).6).
10. *Лебедев К. В., Филюшкин Б. Н., Кожелупова Н. Г.* Водообмен Полярных морей с Атлантическим и Северным Ледовитым океанами на основе наблюдений Арго // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 2. С. 183–197. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(2\).11](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).11).
11. *Лебедев К. В., Филюшкин Б. Н., Щенёткин А. Ф.* Модельное исследование межгодовой изменчивости водообмена Полярных морей с Атлантическим и Северным Ледовитым океанами // Океанологические исследования. 2020. Т. 48. № 2. С. 34–50. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2020.48\(2\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(2).3).
12. *Мошонкин С. Н., Багно А. В., Гусев А. В., Филюшкин Б. Н., Залесный В. Б.* Физические особенности формирования обмена водами Атлантического и Северного Ледовитого океанов // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 242–253.
13. *Филюшкин Б. Н., Мошонкин С. Н., Мысленков С. А., Залесный В. Б., Кожелупова Н. Г.* Моделирование многолетней и сезонной изменчивости расхода вод придонного течения в Датском проливе // Океанология. 2013. Т. 53. № 6. С. 725–736.
14. *Antonov J. I., Seidov D., Boyer T. P., Locarnini R. A., Mishonov A. V., Garcia H. E., Baranova O. K., Zweng M. M., Johnson D. R.* World Ocean Atlas 2009, Vol. 2: Salinity // S. Levitus (Ed.), NOAA Atlas NESDIS 69, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 2010. 184 p.
15. Arctic-Subarctic Ocean Fluxes: Defining the Role of the Northern Seas in Climate // Dickson R. R., Meincke J., Rhines P. (eds). Springer. Springer International Publishing, Amsterdam. 2008. 736 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7>.
16. Argo. Argo float data and metadata from Global Data Assembly Center (Argo GDAC) // SEANOE. 2000. <https://doi.org/10.17882/42182>.
17. *Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A. C. M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A. J., Haimberger L., Healy S. B., Hersbach H., Hólm E. V., Isaksen I., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A. P., Monge-Sanz B. M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F.* The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // Quart. J. R. Meteorol. Soc. 2011. Vol. 137. P. 553–597.
18. *Demin Yu. L., Ibraev R. A.* A numerical method of calculation of currents and sea surface topography in multiply connected domains of the ocean // Sov. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 1989. Vol. 4. No. 3. P. 211–225.
19. *Diansky N. A., Bagatinskaya V. V., Gusev A. V., Morozov E. G.* Geostrophic and Wind-Driven Components of the Antarctic Circumpolar Current // Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Advances in Polar Ecology, Vol. 6. Springer, Cham. 2021. P. 3–20. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5_1).
20. *Ducet N., Le Traon P. Y., Reverdin G.* Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2 // J. Geophys. Res. 2000. Vol. 105. No. C8. P. 19477–19498.
21. *Filyushkin B. N., Sokolovskiy M. A., Lebedev K. V.* Evolution of an intrathermocline lens over the Lofoten Basin // The Ocean in Motion: Circulation, Waves, Polar Oceanography. Springer

- Oceanography. Springer International Publishing, Amsterdam. 2018. P. 333–347. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_21).
22. *Girton J. B., Sandford T. B.* Descent and modification of the overflow plume in the Denmark Strait // *J. Phys. Oceanogr.* 2003. Vol. 33. No. 7. P. 1351–1364.
  23. *Hansen B., Østerhus S.* Faroe Bank Channel overflow 1995–2005 // *Progress in Oceanography.* 2007. Vol. 75. No. 4. P. 817–856.
  24. *Hansen B., Østerhus S., Turrell W. R., Jonsson S., Valdimarsson H., Hatun H., Olsen S. M.* The inflow of Atlantic water, heat and salt to the Nordic Seas across the Greenland-Scotland Ridge // *Arctic-Subarctic Ocean Fluxes: Defining the Role of the Northern Seas in Climate.* Springer. Springer International Publishing, Amsterdam. 2008. P. 15–43. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7_2).
  25. *Isachsen P. E., Nøst O. A.* The air-sea transformation and residual overturning circulation within the Nordic Seas // *J. Mar. Res.* 2012. Vol. 70. No. 1. P. 31–68. <https://doi.org/10.1357/002224012800502372>.
  26. *Kohl A., Kase R. H., Stammer D.* Causes of changes in the Denmark Strait Overflow // *J. Phys. Oceanogr.* 2007. Vol. 37. No. 6. P. 1678–1696. <https://doi.org/10.1175/JPO3080.1>.
  27. *Lebedev K. V.* Modeling study of the Antarctic Circumpolar Current variability based on Argo data // *The Ocean in Motion: Circulation, Waves, Polar Oceanography.* Springer Oceanography. Springer International Publishing, Amsterdam. 2018. P. 487–493. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_30).
  28. *Lebedev K. V., DeCarlo S., Hacker P. W., Maximenko N. A., Potemra J. T., Shen Y.* Argo Products at the Asia-Pacific Data-Research Center // *Eos Trans. AGU.* 2010. Vol. 91. No. 26. Ocean Sci. Meet. Suppl., Abstract IT25A-01.
  29. *Locarnini R. A., Mishonov A. V., Antonov J. I., Boyer T. P., Garcia H. E., Baranova O. K., Zweng M. M., Johnson D. R.* World Ocean Atlas 2009, Vol. 1: Temperature // *S. Levitus (Ed.), NOAA Atlas NESDIS 68, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.* 2010. 184 p.
  30. *Orvik K. A., Niiler P.* Major pathways of Atlantic water in the northern North Atlantic and Nordic Seas toward Arctic // *Geophys. Res. Lett.* 2002. Vol. 29. No. 19. <https://doi.org/10.1029/2002GL015002>.
  31. *Østerhus S., Turrell W. R., Jonsson S., Hansen B.* Measured volume, heat and salt fluxes from Atlantic to the Arctic Mediterranean // *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32. No. 7. L07603. <https://doi.org/10.1029/2004GL022188>.
  32. *Rhines P., Häkkinen S., Josey S.* Is ocean heat transport significant in the climate system? // *Arctic-Subarctic Ocean Fluxes: Defining the Role of the Northern Seas in Climate.* Springer. Springer International Publishing, Amsterdam. 2008. P. 87–109. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7_5).
  33. *Rosby T., Prater M. D., Søiland H.* Pathways of inflow and dispersion of warm waters in the Nordic seas // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114. C04011. <https://doi.org/10.1029/2008JC005073>.
  34. *Sarafanov A.* On the effect of the North Atlantic oscillation on temperature and salinity of the subpolar North Atlantic intermediate and deep waters // *ICES Journal of Marine Science.* 2009. Vol. 66. No. 7. P. 1448–1454.
  35. *Sarkisyan A. S., Sündermann J. E.* Modelling Ocean Climate Variability // Springer. Springer Science+Business Media B.V., Dordrecht. 2009. 374 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9208-4>.
  36. *Schauer U., Beszczynska-Möller A., Walczowski W., Fahrbach E., Piechura J., Hansen E.* Variation of measured heat flow through the Fram Strait between 1997 and 2006 // *Arctic-Subarctic Ocean Fluxes: Defining the Role of the Northern Seas in Climate.* Springer. Springer International Publishing, Amsterdam. 2008. P. 65–85. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7_4).

37. Skagseth Ø., Furevik T., Ingvaldsen R., Loeng H., Mork K. A., Orvik K. A., Ozhigin V. Volume and heat transports to the Arctic Ocean via the Norwegian and Barents Seas // Arctic-Subarctic Ocean Fluxes: Defining the Role of the Northern Seas in Climate. Springer. Springer International Publishing, Amsterdam. 2008. P. 45–64. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7_3).

Статья поступила в редакцию 02.11.2024, одобрена к печати 24.12.2024.

**Для цитирования:** Лебедев К. В., Попов А. П., Филлюшкин Б. Н. Использование наблюдений АРГО для исследования межгодовой изменчивости теплообмена Полярных морей с атмосферой, Атлантическим и Северным Ледовитым океанами и интенсивности ледообразования // Океанологические исследования. 2024. № 52 (4). С. 128–146. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(4\).8](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(4).8).

## USING ARGO DATA TO STUDY INTER-ANNUAL VARIABILITY IN HEAT EXCHANGE OF NORDIC SEAS WITH ATMOSPHERE, NORTH ATLANTIC, AND ARCTIC OCEANS, AS WELL AS INTENSITY OF SEA ICE FORMATION

**K. V. Lebedev, A. P. Popov, B. N. Filyushkin**

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,  
e-mail: [KLebedev@ocean.ru](mailto:KLebedev@ocean.ru)*

The annual mean temperature, salinity, density, and velocity fields for the region of the Nordic Seas were calculated and studied using the Argo-based model for the period of 2005–2014. The heat transports through the Denmark and Fram Straits, and through the sections separating the Nordic Seas from the Atlantic Ocean and Barents Sea were studied on the climatological, annual, and seasonal time scales. The calculated transports are in good agreement with the previous estimations. The methodology of the mean ice formation rate estimation is discussed.

**Keywords:** Nordic Seas, modeling, ocean currents, heat transport, variability, Argo floats, sea ice

**Acknowledgments:** The Argo data were collected and made freely available by the International Argo Program and the national programs that contribute to it (<http://argo.ucsd.edu>, <http://argo.ocean-ops.org>). The Argo Program is part of the Global Ocean Observing System. The altimeter products were processed by SSALTO/DUACS and distributed by AVISO+ (<http://www.aviso.altimetry.fr>) with support from CNES. The AMIGO database is freely available on the IO RAS server at <http://argo.ocean.ru/>.

The work was carried out within the State Task FMWE-2024-0016 of the Ministry of Education and Science of Russia. The atmosphere–ocean heat exchange analysis was supported by the State Task FMWE-2023-0002.



## References

1. Antonov, J. I., D. Seidov, T. P. Boyer, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, H. E. Garcia, O. K. Baranova, M. M. Zweng, and D. R. Johnson, 2010: *World Ocean Atlas 2009*. Vol. 2: Salinity, S. Levitus (Ed.), NOAA Atlas NESDIS 69, U. S. Government Printing Office, Washington, D.C., 184 p.
2. Arctic-Subarctic Ocean Fluxes: Defining the Role of the Northern Seas in Climate, 2008: Dickson R. R., Meincke J., Rhines P. (eds), Springer, Springer International Publishing, Amsterdam, 736 p., <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7>.
3. *Argo*, 2000: Argo float data and metadata from Global Data Assembly Center (Argo GDAC), SEANO, <https://doi.org/10.17882/42182>.
4. Bagatinsky, V. A. and N. A. Diansky, 2021: Variability of the North Atlantic Thermohaline Circulation in Different Phases of the Atlantic Multidecadal Oscillation from Ocean Objective Analyses and Reanalyses. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **57** (2), 208–219.
5. Dee, D. P., S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Hólm, L. Isaksen, P. Kållberg, M. Köhler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavolato, J.-N. Thépaut, and F. Vitart, 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 553–597.
6. Demin, Yu. L. and R. A. Ibraev, 1989: A numerical method of calculation of currents and sea surface topography in multiply connected domains of the ocean. *Sov. J. Numer. Anal. Math. Modelling*, **4** (3), 211–225.
7. Demin, Yu. L., Yu. A. Ivanov, K. V. Lebedev, and I. G. Usychenko, 1990: Current field calculation using a diagnostic and adaptation model for the Megapolygon region, *Oceanology*, **30** (4), 405–410.
8. Diansky, N. A., V. V. Bagatinskaya, A. V. Gusev, and E. G. Morozov, 2021: Geostrophic and Wind-Driven Components of the Antarctic Circumpolar Current, Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. *Advances in Polar Ecology*, **6**, Springer, Cham, 3–20, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5_1).
9. Diansky, N. A. and V. A. Bagatinsky, 2019: Thermohaline Structure of Waters in the North Atlantic in Different Phases of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **55** (6), 628–639.
10. Ducet, N., P. Y. Le Traon, and G. Reverdin, 2000: Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2. *J. Geophys. Res.*, **105** (C8), 19477–19498.
11. Filyushkin, B. N., S. N. Moshonkin, S. A. Myslenkov, V. B. Zalesnyi, and N. G. Kozhelupova, 2013: Simulation of the interannual and seasonal variability of the overflow transport through the Denmark Strait. *Oceanology*, **53** (6), 643–654.
12. Filyushkin, B. N., M. A. Sokolovskiy, and K. V. Lebedev, 2018: Evolution of an intrathermocline lens over the Lofoten Basin. *The Ocean in Motion: Circulation, Waves, Polar Oceanography*, Springer Oceanography, Springer International Publishing, Amsterdam, 333–347, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_21).
13. Girton, J. B. and T. B. Sandford, 2003: Descent and modification of the overflow plume in the Denmark Strait. *J. Phys. Oceanogr.*, **33** (7), 1351–1364.
14. Hansen, B. and S. Østerhus, 2007: Faroe Bank Channel overflow 1995–2005. *Progress in Oceanography*, **75** (4), 817–856.

15. Hansen, B., S. Østerhus, W. R. Turrell, S. Jonsson, H. Valdimarsson, H. Hatun, S. M. Olsen, 2008: The inflow of Atlantic water, heat and salt to the Nordic Seas across the Greenland-Scotland Ridge. *Arctic-Subarctic Ocean Fluxes: Defining the Role of the Northern Seas in Climate*, Springer, Springer International Publishing, Amsterdam, 15–43, [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7_2).
16. Isachsen, P. E. and O. A. Nøst, 2012: The air-sea transformation and residual overturning circulation within the Nordic Seas. *J. Mar. Res.*, **70** (1), 31–68, <https://doi.org/10.1357/002224012800502372>.
17. Ivanov, Yu. A. and K. V. Lebedev, 1996: Numerical simulation of the North Atlantic response to a nonstationary wind forcing, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **32** (5), 620–627.
18. Ivanov, Yu. A., K. V. Lebedev, and A. S. Sarkisyan, 1997: Generalized hydrodynamic adjustment method (GHDAM), *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **33** (6), 752–757.
19. Kohl, A., R. H. Kase, and D. Stammer, 2007: Causes of changes in the Denmark Strait Overflow, *J. Phys. Oceanogr.*, **37** (6), 1678–1696, <https://doi.org/10.1175/JPO3080.1>.
20. Kurnosova, M. O., K. V. Lebedev, 2014: Study of transport variations in the Kuroshio extension system at 35°N, 147°E based on the data of Argo floats and satellite altimetry. *Doklady Earth Sciences*, **458** (1), 1154–1157.
21. Lebedev, K. V., 1999: Average annual climate of the ocean. Part 2: Integral characteristics of the world ocean climate (mass, heat, and salt transports), *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **35** (1), 87–96.
22. Lebedev, K. V., 2016: An Argo-Based Model for Investigation of the Global Ocean (AMIGO), *Oceanology*, **56** (2), 172–181.
23. Lebedev, K. V., 2017: The Argo-Based Model for Investigation of the Global Ocean: a synthesis of observations and numerical modeling. *Journal of Oceanological Research*, **45** (1), 53–69, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2017.45\(1\).6](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2017.45(1).6).
24. Lebedev, K. V., 2018: Modeling study of the Antarctic Circumpolar Current variability based on Argo data. *The Ocean in Motion: Circulation, Waves, Polar Oceanography*, Springer Oceanography, Springer International Publishing, Amsterdam, 487–493, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_30).
25. Lebedev, K. V., S. DeCarlo, P. W. Hacker, N. A. Maximenko, J. T. Potemra, and Y. Shen, 2010: Argo Products at the Asia-Pacific Data-Research Center. *EOS Trans. AGU*, **91** (26), Ocean Sci. Meet. Suppl., Abstract IT25A-01.
26. Lebedev, K. V., B. N. Filyushkin, and N. G. Kozhelupova, 2019: Argo-based study of water, heat, and salt exchange between Atlantic, Nordic Seas, and Arctic Ocean. *Journal of Oceanological Research*, **47** (2), 183–197, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(2\).11](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).11).
27. Lebedev, K. V., B. N. Filyushkin, and A. F. Shchepetkin, 2020: The model study of the water exchange interannual variability between Atlantic, Nordic Seas, and Arctic Ocean. *Journal of Oceanological Research*, **48** (2), 34–50, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2020.48\(2\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(2).3).
28. Locarnini, R. A., A. V. Mishonov, J. I. Antonov, T. P. Boyer, H. E. Garcia, O. K. Baranova, M. M. Zweng, and D. R. Johnson, 2010: *World Ocean Atlas 2009*. Vol. 1: Temperature, S. Levitus (Ed.), NOAA Atlas NESDIS 68, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 184 p.
29. Moshonkin, S. N., A. V. Bagno, A. V. Gusev, B. N. Filyushkin, and V. B. Zalesny, 2017: Physical properties of the formation of water exchange between Atlantic and Arctic Ocean, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **53** (2), 213–223.
30. Orvik, K. A. and P. Niiler, 2002: Major pathways of Atlantic water in the northern North Atlantic and Nordic Seas toward Arctic. *Geophys. Res. Lett.*, **29** (19), <https://doi.org/10.1029/2002GL015002>.

31. Østerhus, S., W. R. Turrel, S. Jonsson, and B. Hansen, 2005: Measured volume, heat and salt fluxes from Atlantic to the Arctic Mediterranean, *Geophys. Res. Lett.*, **32** (7), L07603, <https://doi.org/10.1029/2004GL022188>.
32. Rhines, P., S. Häkkinen, and S. Josey, 2008: Is ocean heat transport significant in the climate system? *Arctic-Subarctic Ocean Fluxes: Defining the Role of the Northern Seas in Climate*, Springer, Springer International Publishing, Amsterdam, 87–109, [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7_5).
33. Rossby, T., M. D. Prater, and H. Søiland, 2009: Pathways of inflow and dispersion of warm waters in the Nordic seas. *J. Geophys. Res.*, **114**, C04011, <https://doi.org/10.1029/2008JC005073>.
34. Sarafanov, A., 2009: On the effect of the North Atlantic oscillation on temperature and salinity of the subpolar North Atlantic intermediate and deep waters. *ICES Journal of Marine Science*, **66** (7), 1448–1454.
35. Sarkisyan, A. S. and J. E. Sündermann, 2009: *Modelling Ocean Climate Variability*. Springer, Springer Science+Business Media B.V., Dordrecht, 374 p., <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9208-4>.
36. Schauer, U., A. Beszczynska-Möller, W. Walczowski, E. Fahrbach, J. Piechura, E. Hansen, 2008: Variation of measured heat flow through the Fram Strait between 1997 and 2006. *Arctic-Subarctic Ocean Fluxes: Defining the Role of the Northern Seas in Climate*, Springer, Springer International Publishing, Amsterdam, 65–85, [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7_4).
37. Skagseth, Ø., T. Furevik, R. Ingvaldsen, H. Loeng, K. A. Mork, K. A. Orvik, and V. Ozhigin, 2008: Volume and heat transports to the Arctic Ocean via the Norwegian and Barents Seas. *Arctic-Subarctic Ocean Fluxes: Defining the Role of the Northern Seas in Climate*, Springer, Springer International Publishing, Amsterdam, 45–64, [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7_3).

Submitted 02.11.2024, accepted 24.12.2024.

**For citation:** Lebedev, K. V., A. P. Popov, and B. N. Filyushkin, 2024: Using ARGO data to study inter-annual variability in heat exchange of Nordic Seas with atmosphere, North Atlantic, and Arctic Oceans, as well as intensity of sea ice formation. *Journal of Oceanological Research*, **52** (4), 128–146, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(4\).8](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(4).8).