

ВОДООБМЕН ПОЛЯРНЫХ МОРЕЙ С АТЛАНТИЧЕСКИМ И СЕВЕРНЫМ ЛЕДОВИТЫМ ОКЕАНАМИ НА ОСНОВЕ НАБЛЮДЕНИЙ АРГО

Лебедев К.В., Филюшкин Б.Н., Кожелупова Н.Г.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: KLebedev@ocean.ru*

Статья поступила в редакцию 15.03.2019, одобрена к печати 30.05.2019

По данным измерений поплавков Argo за период с 2005 по 2014 гг. с помощью Argo-модели были рассчитаны и исследованы среднегодовые величины полей температуры, солености, плотности и скорости течений Полярных морей (Норвежского и Гренландского). На этой основе выполнены расчеты обменов массой, теплом и солью для района Полярных морей с 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 полученные расходы воды на всех пограничных разрезах хорошо совпадают с данными натурных наблюдений. Выявлен синхронный характер межгодовых и сезонных колебаний расходов воды с изменчивостью индекса Североатлантического колебания. Положительный среднесезонный тепловой бюджет рассматриваемого района в 2005–2014 гг. составил 92 ± 56 ТВт.

Ключевые слова: Полярные моря, моделирование, течения, расход, теплоперенос, изменчивость, измерения Argo.

Введение

Теплые и соленые воды из Северной Атлантики (СА), поступающие в Арктические районы, вступают в контакт с холодными и менее солеными водами морей Северного Ледовитого океана (СЛО). Эти процессы взаимодействия различных водных масс в основном происходят в пределах Полярных морей (ПМ) – Норвежского и Гренландского (Østerhus et al., 2005; Hansen et al., 2008; Мошонкин и др., 2017). Поступление большого количества тепла и соли с водами СА, с одной стороны, создает уникальную переходную область с особым региональным климатом, когда в арктических широтах в течение всего года моря свободны ото льда. Более того, эта область определяет умеренный климат Западной Европы, а характер и величина затока вод из Атлантического океана тесно связаны с изменчивостью индекса Североатлантического колебания (Rhines, Häkkinen, Josey, 2008; Филюшкин и др., 2013; Лебедев, 2016; Мошонкин и др., 2017; Raj et al., 2018). С другой стороны, большое количество соли в верхних слоях приводит к развитию вертикальной конвекции и формированию промежуточных и глубинных вод высокой плотности для СЛО и СА (Sarafanov, 2009; Hansen et al., 2008), которые в значительной мере определяют цир-

куляцию вод в глубинах Атлантического океана (Girton, Sandford, 2003; Филюшкин и др., 2013).

Воды СА поступают тремя основными струями. 1. Небольшая Исландская струя в виде Восточно-Исландского течения, двигаясь через Датский пролив, огибает Исландию с севера (Kohl, Kase, Stammer, 2007; Филюшкин и др., 2013). 2. 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). 3. Шетландская струя вод СА входит через глубокий (более 1000 м) Фарерско-Шетландский канал (Hansen, Østerhus, 2007). Эта струя несет наиболее теплую ($9,5^{\circ}\text{C}$) 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°C) Западно-Шпицбергенского течения, являющегося продолжением струи вод СА. В западной части пролива поступают формирующие Восточно-Гренландское течение холодные воды СЛО с температурой ниже 0°C и льды (Гладышев и др., 2017). 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. По состоянию на сегодняшний день около 4000 измерителей Argo (45 из которых работают непосредственно в районе ПМ) осуществляют автономное зондирование верхней двухкилометровой толщи океана от Антарктики до Шпицбергена с 10-дневным интервалом, ежемесячно пополняя базу данных по температуре и солености Мирового океана на 10–12 тыс. полноценных профилей. Для обработки поступающей по программе Argo информации в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН была разработана оригинальная Арго-модель исследования глобального океана (АМИГО). Арго-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).

На основе наблюдений, полученных дрейфующими измерителями Argo за 10 лет, с помощью Арго-модели будут рассчитаны и исследованы поля температуры, солености, плотности и течений Норвежского и Гренландского морей, а также климатические, межгодовые и сезонные переносы массы, тепла и солей на четырех

разрезах, оконтуривающих исследуемую область. Подобное положение разрезов было предложено в работе (Isachsen, Nøst, 2012).

Наблюдения и методы их обработки

Рассматривался район, ограниченный координатами от 55° до 80°с.ш. и от 30°з.д. до 15°в.д. Для этой акватории было принято в расчеты около 17600 профилей температуры и солёности, измеренных с помощью дрейфующих поплавков Argo за период 2005–2014 гг. Для расчетов обменов массой, теплом и солями область ПМ была ограничена от окружающих океанов следующим образом: пролив Фрама по 79°с.ш. (далее Фрам), Баренцево море с запада меридианом по 15°в.д. от Норвегии до Шпицбергена (Баренц), Датский пролив по 23°з.д. от Исландии до Гренландии (Датский) и, наконец, СА отделялся разрезом от Исландии до Норвегии (Исланд) по 64°с.ш.

Исследование базируется на результатах модельных расчетов АМИГО (Лебедев, 2016, 2017), выполненных с использованием данных измерений Argo (Argo, 2000) и полей напряжения трения ветра из реанализа ECMWF ERA-Interim (Dee et al., 2011). 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 и гидродинамической адаптации (Иванов, Лебедев, Саркисян, 1997; Лебедев, 1999) позволяет рассчитать сбалансированные поля температуры, солёности, плотности и скорости течений по данным поплавков Argo. Модель общей циркуляции океана описывается полной системой уравнений гидротермодинамики океана, в качестве «интегральной» функции используется уровень океана (Demin, Ibraev, 1989; Демин, Иванов, Лебедев, Усыченко, 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.

Исследование охватывает 10-летний период с 2005 по 2014 гг., расчетные поля представлены ежемесячными (120 полей), сезонными (40 полей), годовыми (10 полей), а также среднеклиматическими для 2005–2014 гг. данными (17 полей, включающие среднеклиматический год, сезоны и месяцы) с пространственным разрешением 1 градус по долготе и широте. База данных АМИГО находится в свободном доступе в сети Интернет на официальном сервере ИО РАН по адресу <http://argo.ocean.ru/>.

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.

Основные результаты

Для описания гидрологического режима ПМ были рассчитаны и построены по среднегодовым данным поля температуры, солёности, плотности и течения для горизонтов 30, 1000 и 1500 м (рис. 1). Сразу следует отметить, что эти поля построены только по данным измерения Argo и хорошо коррелируют с такими же картами, построенными по данным гидрологических массивов Левитуса и отдельным съёмкам (Locarnini et al., 2009; Antonov et al., 2009; Isachsen, Nøst, 2012; Filyushkin, Sokolovskiy, Lebedev, 2018). Прежде чем переходить к анализу, отметим, что гидрологический режим ПМ хорошо изучен и существует огромная литература, знакомая авторам, но 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 существование двух транзитных течений, пересекающих всю область с севера на юг. С юга входят теплые (10–12°C) и солёные (35,2–35,4 епс) атлантические воды через сложную систему проливов и хребтов от Гренландии до Норвегии (Hansen et al., 2008). Атлантические воды образуют две ветви транзитного потока Норвежского течения – западную и восточную (Orvik, Niiler, 2002; Isachsen, Nøst, 2012; Filyushkin, Sokolovskiy, Lebedev, 2018). Восточная ветвь двигается вдоль континентального склона Норвегии и часть воды поступает в Баренцево море, а основной расход воды в виде Шпицбергенского течения уходит через пролив Фрама на север в СЛО. Западная струя огибает Лофотенскую котловину с запада и севера и далее ее воды поступают в пролив Фрама, где обе струи практически сливаются (рис. 1а, б). В Норвеж-

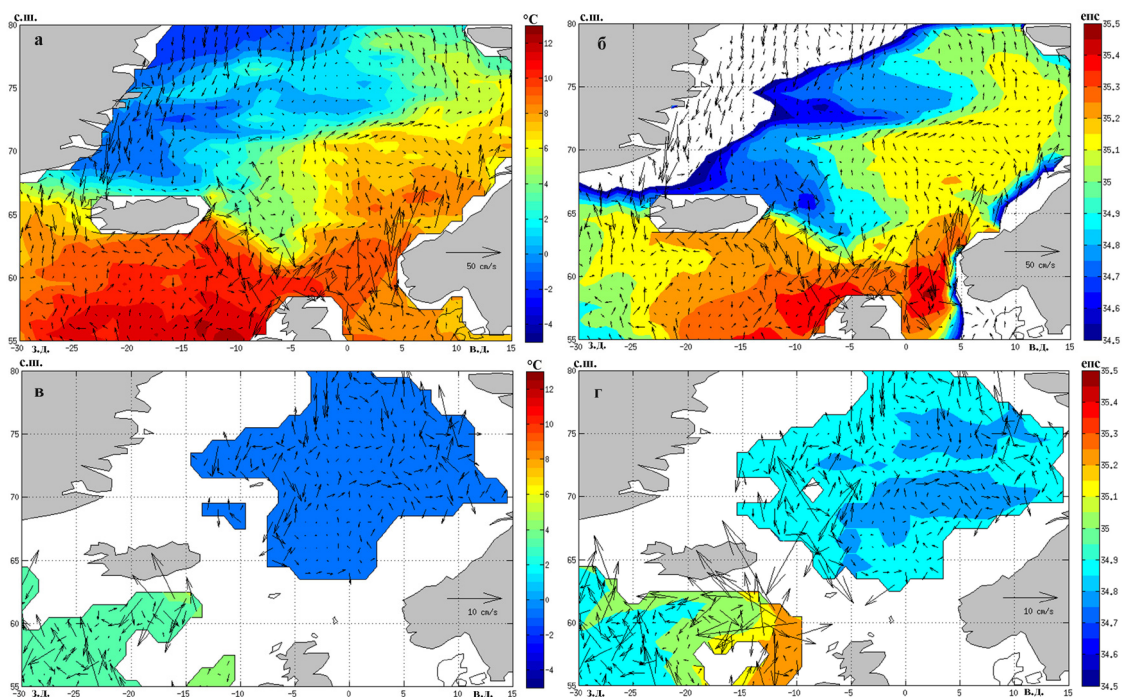


Рис. 1. Среднегодовое распределение температуры (а, в) и солёности (б, г) по измерениям Арго за период с 2005 по 2014 гг. на фоне поля течений на глубине 30 м (а, б), на глубине 1500 м (в) и на глубине 1000 м (г) в области Полярных морей.

ском море выделяется область над Лофотенской впадиной, оконтуренной изобатой 3000 м, над которой в центре с глубиной 3200 м расположен огромный стационарный антициклонический вихрь от поверхности до 1500 м, который является аккумулятором теплых и соленых вод СА. Ядро этого вихря диаметром порядка 100 км с температурой около 5°C и солёностью 35,15 eps располагается на глубинах 250–550 м и представляет собой внутритермоклинную антициклоническую линзу (Filyushkin, Sokolovskiy, Lebedev, 2018).

На севере, в западной части пролива Фрама, формируется Восточно-Гренландское течение, несущее в южном направлении распресненные воды СЛЮ (солёность 34,3–34,5 eps) с температурой от $0,5$ до -1°C и льды (Belkin et al., 1998). Далее эти воды через Датский пролив поступают в СА. Эту динамическую картину отчетливо подтверждают карты распределения температуры и солёности на глубинах 30 м (рис. 1а, б). Теплая (6 – 10°C) и соленая (от 35,1 до 35,3 eps) атлантическая вода занимает всю акваторию Норвежского моря до хребтов Яна Майена и Моно-Книповича. На карте температуры (рис. 1а) видно, что очень теплые для таких широт воды (7°C) проникают в Баренцево море. А на карте солёности (рис. 1б) также видно проникновение вод повышенной солёности (35,1 eps) до северных границ области.

Среднегодовые вектора течений в одноградусных квадратах, показанные на картах распределения температуры и солёности (рис. 1), как правило, репрезентативно описывают характер перемещения водных масс в пространстве, а также процессы водообмена. Температура и солёность на глубинах 1000–1500 м (рис. 1в, г) демонстрируют однородность полей с температурой ниже 1 – 2°C и со-

леностью порядка 34,8 епс (при этом значении образуются донные воды с плотностью около 28,05 кг/м³) практически для всей области ПМ, косвенно подтверждая роль конвекции, когда соленые атлантические воды при движении на север охлаждаются, увеличивают плотность и, опускаясь на глубокие горизонты, формируют поток донных вод южного направления (Schauer et al., 2008; Мошонкин и др., 2017).

Отметим один недостаток карт, построенных по данным Argo. Так, на горизонте 30 м для распределения температуры и солености отдельные прибрежные районы Гренландии и Норвегии частично лишены наблюдений Argo, но удается построить расчетные вектора течений за счет использования в этих районах данных массивов World Ocean Atlas 2009 (Locarnini et al., 2009; Antonov et al., 2009).

Далее следует оценить изменчивость среднегодовых и сезонных величин водообмена по данным Argo за весь период наблюдения на всех четырех контурных разрезах и сравнить с имеющимися натурными наблюдениями. Расчет переносов тепла и солей был выполнен аналогично расчетам из работы (Лебедев, 1999). Ограниченность размера публикации не позволяет нам детально представить все рассчитанные характеристики. При анализе изменчивости водообмена мы подробно рассмотрим только переносы массы и тепла, а перенос солей, который близок к изменчивости переноса массы, будет представлен в итоговой таблице в виде климатических и среднемноголетних значений для каждого из исследуемых разрезов.

1. Поступление Атлантических вод через разрез «Исланд» (64°с.ш.) по среднегодовым данным с 2005 по 2014 гг. оценивалось от 13 до 17 Св, а отток за это же время от 11 до 13 Св. В то же время сезонные колебания по среднемесячным значениям менялись заметно сильнее: приток – от 11 до 25 Св, а отток от 11 до 17 Св (рис. 2а). Максимальные величины притока и оттока приходились на зимние месяцы – декабрь и январь. За все 10 лет наблюдений монотонный ход изменения расходов был нарушен в период с 2009 по 2012 гг. Это было связано со значительными изменениями индекса Североатлантического колебания (САК) (рис. 3а). В рамках эксперимента ASOF (Arctic-Subarctic ocean fluxes) на этом разрезе были проведены экспериментальные наблюдения по изменению расходов воды и была получена среднегодовая величина притока равная 9.5 Св. Учитывая амплитуды сезонных колебаний средняя оценка расходов увеличилась до 12 Св (Hansen et al., 2008).

2. Вдоль разреза «Баренц» проходит продолжение восточной струи Норвежского течения, и часть вод в виде отдельного течения поворачивает в Баренцево море (рис. 1а, б). В течение 10 лет отмечаются поступления атлантических вод от 4 до 7.5 Св. Сезонный ход выражен отчетливо и амплитуда колебаний расходов более значительна и находится в диапазоне от 3.5 до 8.0 Св (рис. 2б). Максимальные значения наблюдаются в зимние месяцы, хотя в отдельные годы (2006, 2010, 2013) происходит отклонение от нормы (рис. 2б), что указывает также на зависимость от атмосферных колебаний (индекса САК). В работе (Skagseth et al., 2008) была отмечена синхронность изменчивости расходов воды между текущими разрезами этого течения: разрезом Свиной (61°с.ш.) на юге Норвегии и Кольским разрезом,

выполненным в открытой части Баренцева моря по 22°в.д. За период наблюдений с 1997–2006 гг. были получены расходы воды на Кольском разрезе равными 1.8 Св и тепла 48 ТВт (Skagseth et al., 2008). Эти величины хорошо согласуются с полученными результатами в используемой модели.

3. Контурный разрез «Датский» расположен по 23°з.д., а не поперек пролива, как это принято. Модельный среднегодовой расход потока полярных вод,двигающихся на юг, довольно заметно меняется по среднегодовым данным от 2.2 до 4.3 Св. Так, в интервале между 2009 и 2010 гг. расход уменьшился с 3.1 до 2.2 Св, а в следующем 2011 г. увеличился до 4.3 Св, тогда как за весь 10-летний период величина расхода сохранялась в диапазоне 3.3–3.6 Св. При этом эти колебания хорошо коррелируются с изменением среднегодовых значений индекса САК (Филюшкин и др., 2013). Расход струи атлантических вод,двигающихся на север вдоль западного по-

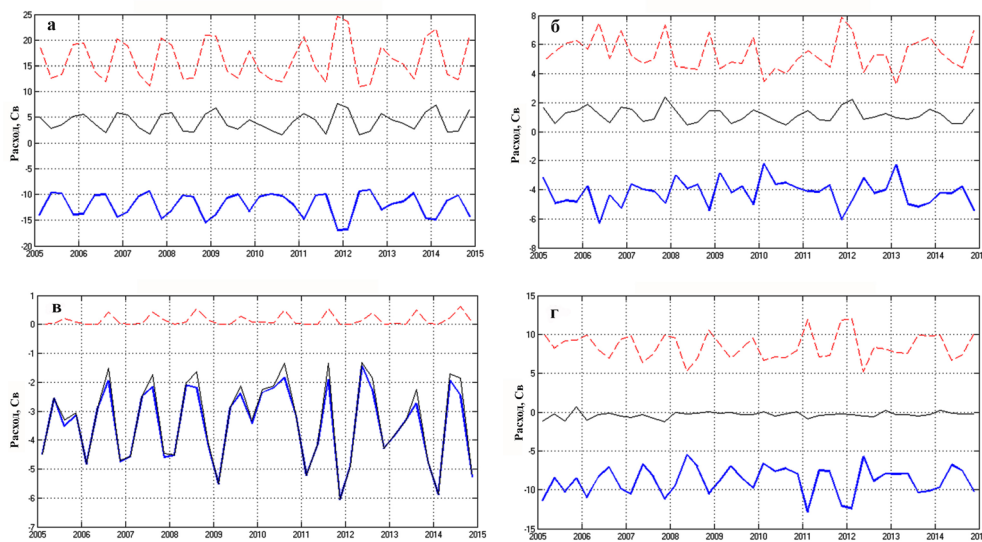


Рис. 2. Изменчивость расхода (Св) на разрезе «Исланд» между Исландией и Норвегией по 64°с.ш. (а), на разрезе «Баренц» между Норвегией и Шпицбергеном по 15°в.д. (б), в Датском проливе по 23°з.д. (в) и в проливе Фрама по 79°с.ш. (г). Полным расходам соответствует тонкая черная линия, расходы северного и восточного направлений изображены красной штриховой линией, расходы южного и западного направлений – толстой синей линией. Данные представлены среднесезонными величинами и охватывают период 2005–2014 гг.

бережья Исландии, меняется от 0.2 до 0.8 Св и практически не реагирует на внешние возмущения (Rhines, Häkkinen, Josey, 2008; Филюшкин и др., 2013; Мошонкин и др., 2017). Сезонный ход струи полярных вод в проливе выражен очень четко: минимальный расход отмечается летом (от 1.5 до 3.5 Св), а максимальный – зимой (от 4.5 до 6.0 Св) (рис. 2в), и также сильно меняется под влиянием колебаний индекса САК. Полученные значения потоков воды и тепла по данным расчетов Арго-модели показали хорошие соответствия с наблюдаемыми данными (Girton, Sandford, 2003; Kohl, Kase, Stammer, 2007; Rhines, Häkkinen, Josey, 2008; Филюшкин и др., 2013).

4. Разрез «Фрам» проведен по 79°с.ш. от Шпицбергена до Гренландии. Гидрология пролива Фрам была подробно исследована в рамках проекта ASOF в период с 1997 по 2006 гг. (Schauer et al., 2008). Глубина пролива 2500 м, ширина глубоководной части около 300 км. Ширина пролива за счет мелководного шельфа Гренландии увеличивается почти на 100 км. Атлантические воды, охлажденные до 4°C на поверхности и до 2°C на глубине 500 м, узким (7–9°в.д.) Шпицбергенским течением (мощность течения 800 м) входят в Арктический бассейн через восточную часть пролива. Нулевая изотерма в проливе проходит на глубине 800–1000 м. В западной части пролива зарождается Восточно-Гренландское течение (ширина 2–5°з.д.) с температурой на поверхности ниже 0°C, а на глубине 500 м около 1°C. Именно поступление вод этого течения и определяет температуру и соленость всей западной части ПМ (Гладышев и др., 2017). Расходы течений в проливе в работе (Schauer et al., 2008) измерялись с помощью буйковых станций, число которых менялось в процессе выполнения четырех постановочных серий. Окончательно было принято, что на север поступает 12 Св, а на юг 14 Св и высказано допущение, что эта разница компенсируется струей, поступающей в СЛО из Баренцева моря севернее Шпицбергена (Schauer et al., 2008).

По модельным расчетам среднегодовая величина расхода воды в проливе Фрама изменялась слабо. Так, в направлении на юг эта величина менялась от 6.8 до 9.2 Св, а в северном направлении от 6.2 до 7.5 Св. В среднем расход на юг несколько больше и эта разница совпадает с инструментальными наблюдениями (Schauer et al., 2008). Сезонный ход, построенный по среднемесячным величинам, выражен очень четко, но баланс потоков юг–север близок к нулю. В то же время расходы потоков на юг изменяются за этот период с 5.3 до 12.5 Св, а на север от 5.1 до 12.0 Св (рис. 2г). Заметим, что максимальные значения расходов близки к наблюдаемым инструментальным величинам. К тому же отметим, что эти колебания расходов также коррелируют с колебаниями индекса САК. Именно поэтому регулярная сезонная изменчивость была нарушена в 2005–2006 гг., 2010–2011 гг. и 2014 г. Максимальные значения расходов наблюдаются в зимние месяцы, а минимальные – летом для обоих потоков, то есть они компенсируют друг друга, сохраняя баланс близким к нулю.

На рис. 3а показана изменчивость среднесезонных величин расходов через оконтуривающие исследуемую область разрезы на фоне изменчивости среднесезонных значений индекса САК. Как видно из рисунка, поступление вод СА через разрез «Исланд» (толстая синяя линия) очень хорошо коррелирует с их обратным выносом через Датский пролив (тонкая штриховая красная линия), и обе эти кривые неплохо коррелируют с индексом САК (жирный пурпурный пунктир), что отмечалось ранее в работах (Филюшкин и др., 2013; Лебедев, 2016; Raj et al., 2018).

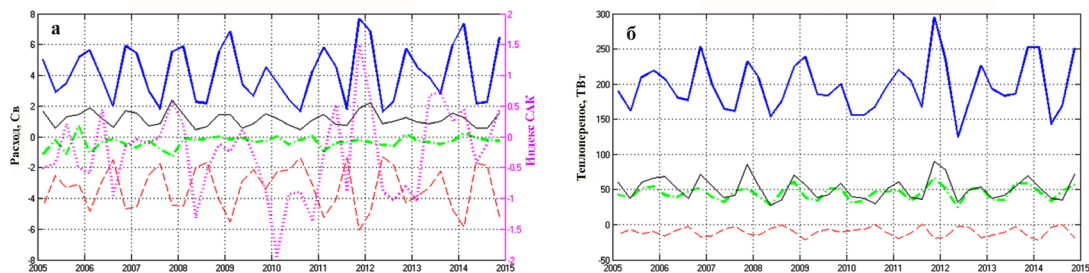


Рис. 3. Изменчивость (а) расходов (Св) и (б) теплопереносов (ТВт) через разрез «Исланд» между Исландией и Норвегией по 64°с.ш. (толстая синяя линия), на разрезе «Баренц» между Норвегией и Шпицбергенем по 15°в.д. (тонкая черная линия), в Датском проливе по 23°з.д. (красная штриховая линия) и в проливе Фрама по 79°с.ш. (зеленый штрих-пунктир). Индекс Североатлантического колебания показан на рисунке (а) сиреневым пунктиром. Данные представлены среднесезонными величинами и охватывают период 2005–2014 гг.

Следует также отметить и наличие хорошо выраженной корреляции указанных выше величин с переносом воды в Баренцево море (тонкая сплошная линия), хотя сами значения полных расходов на разрезе «Баренц» заметно уступают по величине суммарному поступлению атлантических вод через разрез «Исланд». Это связано с тем, что поступающий в область теплый поток вод СА делится на Норвежскую и Шпицбергенскую ветви. Норвежская ветвь уходит в Баренцево море в виде Нордкапского течения, а Шпицбергенская ветвь поворачивает на север и через пролив Фрама уходит в Арктический бассейн.

Переносы тепла через границы рассматриваемого района представлены на рис. 3б графиками эволюции среднесезонных величин, рассчитанных относительно 0°С. Изменчивость теплопереносов носит хорошо выраженный сезонный характер: максимальные значения приходятся на осень–зиму, минимальные – на весну–лето северного полушария. Среднеклиматический теплоперенос по данным 2005–2014 гг. оказался равным: «Исланд» 200±36 ТВт, «Баренц» 52±14 ТВт, «Датский» –9±6 ТВт, «Фрам» 44±9 ТВт. Среднепогодный теплоперенос, рассчитанный по среднемесячным значениям для периода 2005–2014 гг., получился близким среднеклиматическому: «Исланд» – 200±48 ТВт, «Баренц» – 51±24 ТВт, «Датский» – 10±8 ТВт, «Фрам» – 47±15 ТВт. Таким образом, суммарный тепловой бюджет рассматриваемого района в 2005–2014 гг. оказывается положительным: 92±56 ТВт. 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.

Результаты расчетов дополнительно сведены в таблицу.

Таблица. Климатические (для 2005–2014 гг.) и среднемноголетние (средние по 120 среднемесячным значениям за 2005–2014 гг.) переносы массы, тепла и соли на границах Полярных морей (пояснения по названиям разрезов см. в тексте).

Разрез	Климатические значения			Среднемноголетние значения		
	Расход (Св)	Перенос тепла (ТВт)	Перенос соли (кт/с)	Расход (Св)	Перенос тепла (ТВт)	Перенос соли (кт/с)
«Исланд» 64°с.ш.	4,3±1,6	200±36	156±58	4,2±2,1	200±48	153±78
«Баренц» 15°в.д.	1,2±0,5	52±14	43±16	1,1±0,7	51±24	41±26
«Датский» 23°з.д.	-3,5±1,2	-9±6	-123±43	-3,4±1,7	-10±8	-120±61
«Фрам» 79°с.ш.	-0,4±0,1	44±9	-10±5	-0,3±0,6	47±15	-8±22

Заключение

По результатам проведенных исследований можно констатировать, что использованный 10-летний массив измерений Argo позволил построить достоверные карты пространственной изменчивости среднегодовых полей температуры, солёности, плотности в слое от 30 до 1500 м и рассчитать с использованием Argo-модели поля течений в рамках одноградусной сетки для всей акватории Полярных морей. По исходным данным были получены климатические, среднегодовые и сезонные величины потоков массы, тепла и соли на четырех разрезах, огибающих область Полярных морей. Был показан полный баланс обмена массой и солью Полярных морей с Атлантическим и Северным Ледовитым океанами. Одновременно в результате расчетов показано, что приток тепла в область Полярных морей больше, чем его отток. Этот дополнительный источник тепла в Полярных морях заметно влияет на изменчивость атмосферных процессов над этим районом в холодное время года. Это также косвенно подтверждается заметным влиянием межгодовых и сезонных колебаний индекса САК на характер водообмена во всех проливах, связывающих Полярные моря с окружающими районами (Schauer et al., 2008; Филюшкин и др., 2013; Мошонкин и др., 2017). И, наконец, следует отметить важную 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.

Данные Argo 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/>).

Работы по обработке данных Арго выполнены в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема № 0149-2019-000). Работы по анализу изменчивости водообмена Полярных морей с Атлантическим и Северным Ледовитым океанами выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-05-80089. База данных АМИГО находится в свободном доступе на сервере ИО РАН по адресу <http://argo.ocean.ru/>.

Литература

- Гладышев С.В., Гладышев В.С., Соков А.В., Гулев С.К., Паутова Л.А., Демидов А.Б. Среднемноголетняя структура и перенос вод системой западных пограничных течений восточнее Гренландии // Докл. АН. 2017. Т. 473. № 1. С. 93–97.
- 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.
- Иванов Ю.А., Лебедев К.В. Моделирование реакции Северной Атлантики на нестационарное воздействие ветра // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1996. Т. 32. № 5. С. 672–679.
- Иванов Ю.А., Лебедев К.В., Саркисян А.С. Обобщенный метод гидродинамической адаптации (ОМЕГА) // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1997. Т. 33. № 6. С. 812–818.
- Курносова М.О., Лебедев К.В. Исследование изменчивости переносов в системе Курошио на 35° с.ш., 147° в.д. по данным поплавков Argo и спутниковой альтиметрии // Докл. АН. 2014. Т. 458. № 2. С. 225–228.
- 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.
- Лебедев К.В. Арго-Модель Исследования Глобального Океана (АМИГО) // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 186–196.
- Лебедев К.В. Арго-Модель Исследования Глобального Океана: синтез наблюдений и численного моделирования // Океанологические исследования. 2017. Т. 45. № 1. С. 53–69. doi:10.29006/1564-2291.JOR-2017.45(1).6.
- Мошонкин С.Н., Багно А.В., Гусев А.В., Филлюшкин 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.
- Филлюшкин 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.
- 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, Volume 2: Salinity // S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 69, Washington, D.C.: Government Printing Office, 2010. 184 p.
- Arctic-Subarctic Ocean Fluxes: Defining the Role of the Northern Seas in Climate // Dickson R.R., Meincke J., Rhines P. (eds). Springer. Amsterdam: Springer International Publishing, 2008. 736 p. doi:10.1007/978-1-4020-6774-7.
- Argo. Argo float data and metadata from Global Data Assembly Center (Argo GDAC) // SEANOE. 2000. <http://doi.org/10.17882/42182>.
- Belkin I.M., Levitus S., Antonov J., Malmberg S.-A. “Great salinity anomalies” in the North Atlantic // Progress in Oceanography. 1998. Vol. 41. No. 1. P. 1–68.

- 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 L., 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.
- 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.
- 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.
- 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. Amsterdam: Springer International Publishing, 2018. P. 333–347. DOI:10.1007/978-3-319-71934-4_21.
- 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.
- Hansen B., Østerhus S.* Faroe Bank Channel overflow 1995-2005 // *Progress in Oceanography.* 2007. Vol. 75. No. 4. P. 817–856.
- 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. Amsterdam: Springer International Publishing, 2008. P. 15–43. DOI:10.1007/978-1-4020-6774-7_2.
- 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. DOI:10.1357/002224012800502372.
- 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. DOI:10.1175/JPO3080.1.
- 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. Amsterdam: Springer International Publishing, 2018. P. 487–493. DOI:10.1007/978-3-319-71934-4_30.
- 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.
- 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, Volume 1: Temperature // S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 68, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 2010. 184 p.
- 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. DOI: 10.1029/2002GL015002.
- 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. DOI:10.1029/2004GL022188.
- Raj R.P., Nilsen J.E.Ø., Johannessen J.A., Furevik T., Andersen O.B., Bertino L.* Quantifying Atlantic Water transport to the Nordic Seas by remote sensing // *Remote Sensing of Environment.* 2018. Vol. 216. P. 758–769. DOI:10.1016/j.rse.2018.04.055.

- 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. Amsterdam: Springer International Publishing, 2008. P. 87–109. DOI:10.1007/978-1-4020-6774-7_5.
- 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.
- 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. Amsterdam: Springer International Publishing, 2008. P. 65–85. DOI:10.1007/978-1-4020-6774-7_4.
- 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. Amsterdam: Springer International Publishing, 2008. P. 45–64. DOI:10.1007/978-1-4020-6774-7_3.

ARGO-BASED STUDY OF WATER, HEAT, AND SALT EXCHANGE BETWEEN ATLANTIC, NORDIC SEAS, AND ARCTIC OCEAN

Lebedev K.V., Filyushkin B.N., Kozhelupova N.G.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia, e-mail: KLebedev@ocean.ru
Submitted 15.03.2019, accepted 30.05.2019*

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 mass, heat, and salt 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 based on direct velocity measurements. Comparative analysis of transports variations and the North Atlantic Oscillation (NAO) index shows a well pronounced correlation between them. The positive heat budget of the studied region for the period of 2005–2014 was estimated as 92 ± 56 TW.

Keywords: Nordic Seas, modeling, ocean currents, heat transport, consumption, variability, Argo floats

References

- Antonov J.I., Seidov D., Boyer T.P., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Garcia H.E., Baranova O.K., Zweng M.M., and Johnson D.R.* World Ocean Atlas 2009, Volume 2: Salinity, S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 69, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 2010, 184 p.
- Arctic-Subarctic Ocean Fluxes: Defining the Role of the Northern Seas in Climate, Dickson R.R., Meincke J., Rhines P. (eds). Springer, Amsterdam: Springer International Publishing, 2008, 736 p., doi:10.1007/978-1-4020-6774-7.

- Argo*, Argo float data and metadata from Global Data Assembly Center (Argo GDAC), *SEANOE*, 2000, <http://doi.org/10.17882/42182>.
- Belkin I.M., Levitus S., Antonov J., and Malmberg S.-A.* “Great salinity anomalies” in the North Atlantic. *Progress in Oceanography*, 1998, Vol. 41, No. 1, pp. 1–68.
- 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 L., 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, pp. 553–597.
- Demin Yu.L. and 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, pp. 211–225.
- Demin Yu.L., Ivanov Yu.A., Lebedev K.V., and Usychenko I.G.* Current field calculation using a diagnostic and adaptation model for the Megapolygon region. *Oceanology*, 1990, Vol. 30, No. 4, pp. 405–410.
- Ducet N., Le Traon P.Y., and 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, pp. 19477–19498.
- Filyushkin B.N., Moshonkin S.N., Myslenkov S.A., Zalesnyi V.B., and Kozhelupova N.G.* Simulation of the interannual and seasonal variability of the overflow transport through the Denmark Strait. *Oceanology*, 2013, Vol. 53, No. 6, pp. 643–654.
- Filyushkin B.N., Sokolovskiy M.A., and Lebedev K.V.* Evolution of an intrathermocline lens over the Lofoten Basin, *The Ocean in Motion: Circulation, Waves, Polar Oceanography*, Springer Oceanography, Amsterdam: Springer International Publishing, 2018, pp. 333–347, doi:10.1007/978-3-319-71934-4_21.
- Girton J.B. and Sandford T.B.* Descent and modification of the overflow plume in the Denmark Strait. *J. Phys. Oceanogr.*, 2003, Vol. 33, No. 7, pp. 1351–1364.
- Gladyshev S.V., Gladyshev V.S., Sokov A.V., Gulev S.K., Pautova L.A., and Demidov A.B.* Average annual structure and transport of waters eastward of Greenland by the system of western boundary currents. *Doklady Earth Sciences*, 2017, Vol. 473, No. 1, pp. 313–317.
- Hansen B. and Østerhus S.* Faroe Bank Channel overflow 1995-2005. *Progress in Oceanography*, 2007, Vol. 75, No. 4, pp. 817–856.
- Hansen B., Østerhus S., Turrell W.R., Jonsson S., Valdimarsson H., Hatun H., and 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, Amsterdam: Springer International Publishing, 2008, pp. 15–43, doi:10.1007/978-1-4020-6774-7_2.
- Isachsen P.E., and Nøst O.A.* The air-sea transformation and residual overturning circulation within the Nordic Seas. *J. Mar. Res.*, 2012, Vol. 70, No. 1, pp. 31–68, doi:10.1357/002224012800502372.
- Ivanov Yu.A. and Lebedev K.V.* Numerical simulation of the North Atlantic response to a nonstationary wind forcing. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 1996, Vol. 32, No. 5, pp. 620–627.
- Ivanov Yu.A., Lebedev K.V., and Sarkisyan A.S.* Generalized hydrodynamic adjustment method (GHDAM). *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 1997, Vol. 33, No. 6, pp. 752–757.
- Kohl A., Kase R.H., and Stammer D.* Causes of changes in the Denmark Strait Overflow. *J. Phys. Oceanogr.*, 2007, Vol. 37, No. 6, pp. 1678–1696, doi:10.1175/JPO3080.1.
- Kurnosova M. O. and Lebedev K.V.* 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*, 2014, Vol. 458, No. 1, pp. 1154–1157.
- 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, Amsterdam: Springer International Publishing, 2018, pp. 487–493, doi:10.1007/978-3-319-71934-4_30.
- Lebedev K.V. The Argo-Based Model for Investigation of the Global Ocean: a synthesis of observations and numerical modeling. *Oceanologicheskie issledovaniya*, 2017, Vol. 45, No. 1, pp. 53–69. doi:10.29006/1564-2291.JOR-2017.45(1).6.
- Lebedev K.V. An Argo-Based Model for Investigation of the Global Ocean (AMIGO). *Oceanology*, 2016, Vol. 56, No. 2, pp. 172–181.
- Lebedev K.V. 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*, 1999, Vol. 35, No. 1, pp. 87–96.
- Lebedev K.V., DeCarlo S., Hacker P.W., Maximenko N.A., Potemra J.T., and 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.
- Locarnini R.A., Mishonov A.V., Antonov J.I., Boyer T.P., Garcia H.E., Baranova O.K., Zweng M.M., and Johnson D.R. *World Ocean Atlas 2009, Volume 1: Temperature*, S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 68, Washington: D.C., Government Printing Office, 2010, 184 p.
- Moshonkin S.N., Bagno A.V., Gusev A.V., Filyushkin B.N., and Zalesny V.B. Physical properties of the formation of water exchange between Atlantic and Arctic Ocean. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017, Vol. 53, No. 2, pp. 213–223.
- Orvik K.A. and 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, doi:10.1029/2002GL015002.
- Østerhus S., Turrel W.R., Jonsson S., and Hansen B. Measured volume, heat and salt fluxes from Atlantic to the Arctic Mediterranean. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, Vol. 32, No. 7, L07603, doi:10.1029/2004GL022188.
- Raj R.P., Nilsen J.E.Ø., Johannessen J.A., Furevik T., Andersen O.B., and Bertino L. Quantifying Atlantic Water transport to the Nordic Seas by remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 216, pp. 758–769, doi:10.1016/j.rse.2018.04.055.
- Rhines P., Häkkinen S., and 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, Amsterdam: Springer International Publishing, 2008, pp. 87–109, doi:10.1007/978-1-4020-6774-7_5.
- 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, pp. 1448–1454.
- Schauer U., Beszczynska-Möller A., Walczowski W., Fahrbach E., Piechura J., and 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, Amsterdam: Springer International Publishing, 2008, pp. 65–85, doi:10.1007/978-1-4020-6774-7_4.
- Skagseth Ø., Furevik T., Ingvaldsen R., Loeng H., Mork K.A., Orvik K.A., and 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, Amsterdam: Springer International Publishing, 2008, pp. 45–64, doi:10.1007/978-1-4020-6774-7_3.