

МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВОДООБМЕНА ПОЛЯРНЫХ МОРЕЙ С АТЛАНТИЧЕСКИМ И СЕВЕРНЫМ ЛЕДОВИТЫМ ОКЕАНАМИ

Лебедев К.В., Филюшкин Б.Н., Щепёткин А.Ф.

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

Статья поступила в редакцию 09.06.2020, одобрена к печати 28.08.2020

В статье изучается межгодовая изменчивость водообмена через разрезы, идущие вдоль границ области Полярных морей (Норвежского и Гренландского). Исследование охватывает период с 2005 по 2014 гг. и базируется на анализе результатов расчетов с использованием Арго-модели исследования глобального океана (АМИГО), состоящей из блока вариационной интерполяции на регулярную сетку данных профилирования дрейфующих измерителей Argo и блока модельной гидродинамической адаптации вариационно проинтерполированных полей. Изменчивость расходов имеет четко выраженный сезонный характер, с максимальными значениями осенью–зимой и минимумами весной–летом. Изменчивость расхода через пролив Фрама содержит полугодовую составляющую, при том, что среднее поступление воды через разрез близко к нулю. В связи с тем, что количество гидрофизических наблюдений в районе Полярных морей ограничено, представляется крайне важным ответить на вопрос о критичности неполноты знаний термохалинных характеристик для корректного численного моделирования особенностей межгодовой изменчивости циркуляции в этом районе. Для оценки вклада ветрового и термохалинного факторов в межгодовую изменчивость водообмена были выполнены дополнительные численные эксперименты с заменой реальных термохалинных полей их среднесноголетними аналогами и с заменой среднесноголетними аналогами реальных полей тангенциального напряжения трения ветра. Анализ результатов численных экспериментов показал, что именно изменчивость полей тангенциального напряжения трения ветра является основным фактором, определяющим межгодовую изменчивость водообмена области Полярных морей с Атлантическим и Северным Ледовитым океанами.

Ключевые слова: Полярные моря, моделирование, течения, расход, изменчивость, напряжение трения ветра, Арго

Введение

Воды Северной Атлантики (СА), несущие в Арктический регион большое количество тепла и соли, взаимодействуют с холодными и менее солеными водами морей Северного Ледовитого океана (СЛО). Эти процессы взаимодействия 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). Для удобства мы будем называть Норвежское и Гренландское

моря Полярными морями (ПМ), поскольку такое обозначение будет максимально соответствовать термину the Nordic Seas, широко используемому в цитируемой зарубежной литературе. 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 залива 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 циркуляцию 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, обгибает 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°C) и соленую (35.32 епс) воду и, двигаясь на север, в основном формирует климат Норвежского, Гренландского и Баренцева морей (Girton, Sandford, 2003; Rhines et al., 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 предоставило 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 позволя-

ет получать по нерегулярно расположенным данным измерений Argo полный набор океанографических характеристик: температуру, соленость, плотность и скорость течений (Лебедев, 2016; 2017).

В предыдущей работе авторов (Лебедев и др., 2019) 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. 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 и др., 2019). Таким образом, изменчивость циркуляции в области ПМ находится под влиянием двух основных факторов: ветрового и термохалинного. Из-за того, что количество гидрофизических наблюдений в районе ПМ ограничено, представляется крайне важным ответить на вопрос о том, насколько наши неполные знания термохалинных характеристик критичны для корректного численного моделирования особенностей межгодовой изменчивости циркуляции в районе интенсивного взаимодействия вод СА с водами СЛЮ. Настоящая работа продолжает начатое исследование и посвящена изучению роли термохалинного и ветрового факторов в формировании межгодовой изменчивости водообмена области ПМ с окружающими океанами.

Данные и методы их обработки

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). Модель состоит из блока вариационной интерполяции на регулярную сетку данных профилирования Argo и блока модельной гидродинамической адаптации вариационно проинтерполированных полей. Модель общей циркуляции океана, которая используется в режиме диагноза и гидродинамической адаптации (Иванов и др., 1997; Лебедев, 1999), позволяет рассчитать по данным поплавков Argo сбалансированные поля температуры, солености, плотности и скорости течений. Расчетные поля представлены ежемесячными (120 полей), сезонными (40 полей), годовыми (10 полей), а также среднемноголетними для 2005–2014 гг. данными (17 полей, включающие средний 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/>.

Метод вариационной интерполяции данных минимизирует отклонение рассчитанных в узлах регулярной сетки полей от нерегулярно расположенных измерений Argo таким образом, что полученное оптимальное решение проходит максимально близко к данным измерений (Lebedev et al., 2010; Курносова, Лебедев, 2014; Лебедев, 2016, 2017). Для настройки весовых коэффициентов в процедуре вариационной интерполяции данных Argo, а также 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 (месяц, сезон, год и т.п.). Сравнение результатов модельных расчетов с данными дрейфтеров в приповерхностном слое океана показало, что использование вариационной методики интерполяции на регулярную сетку измеренных дрейфующими поплавками Argo значений температуры и солёности позволяет рассчитать реалистичные поля скорости течений (Лебедев и др., 2016; Саркисян и др., 2016). Использование данных поверхностной солёности, полученных на основе указанной методики, приводит к лучшему воспроизведению в моделях общей циркуляции океана межгодовой изменчивости глубины верхнего перемешанного слоя, изменчивости солёности в нижележащих слоях, а также к воспроизведению так называемых «барьерных слоев» (Furie et al., 2018).

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 среднемноголетних 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.

Как и в работе авторов (Лебедев и др., 2019), данное исследование ограничено во времени интервалом 2005–2014 гг., а в пространстве – 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.

Расчет расходов при анализе водообмена был выполнен аналогично расчетам из работы (Лебедев, 1999). Для удаления из расходов сезонного хода дополнительно производился расчет средних значений расходов в отдельные сезоны путем осреднения данных для соответствующего сезона за 10-летний период 2005–2014 гг. (зимний сезон был представлен данными января, февраля и марта, весенний – апреля, мая и июня, летний – июля, августа и сентября, осенний – октября, ноября и декабря).

Для изучения вклада ветрового воздействия в изменчивость расхода были выполнены две серии дополнительных численных экспериментов аналогично тому, как это делалось в работах (Lebedev, Tarakanov, 2018; Лебедев, 2019). В Эксперименте 1 используемые в расчетах АМИГО поля температуры и солёности были заменены их среднемноголетними аналогами (расчет для января 2005 г. проводился по среднемноголетним для 2005–2014 гг. данным АМИГО для января и т.д.). Поля ветра при этом соответствовали реальным месяцам и сезонам (расчет для января 2005 г. проводился по данным тангенциального напряжения трения ветра за январь 2005 г. и т.д.). Это позволило оценить вклад в изменчивость расхода ветрового воздействия.

В Эксперименте 2 используемые в расчетах АМИГО поля тангенциального напряжения трения ветра были заменены их осредненными за 2005–2014 гг. аналогами (для января 2005 г. использовались данные температуры и солёности января 2005 г. и осредненный за январь 2005–2014 гг. ветер и т.д.). Целью этих расчетов была оценка вклада изменчивости термохалинных полей в изменчивость расхода.

Основные результаты

Построенные по среднегодовым данным поля температуры, солёности и течений исследуемого района ПМ для горизонтов 30 и 50 м представлены на рис. 1. Отметим, что эти поля построены только по данным измерения Argo и хорошо коррелируют с такими же картами, построенными по данным гидрологических массивов Левитуса и отдельным съемкам (Locarnini et al., 2009; Antonov et al., 2009; Isachsen, Nøst, 2012; Filyushkin et al., 2018). Прежде чем переходить к анализу, следует заметить, 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 et al., 2008; Skagseth et al., 2008; Мошонкин и др., 2017; Filyushkin et al., 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 –

Норвежское Фронтальное и Норвежское Склоновое (Orvik, Niiler, 2002; Rossby et al., 2009; Isachsen, Nøst, 2012; Filyushkin et al., 2018). Норвежское Склоновое течение движется 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. Норвежское Фронтальное течение огибает Лофотенскую котловину с запада и севера, и далее его воды поступают в пролив Фрама, где обе струи практически сливаются (рис. 1). В Норвежском 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 (Белоненко и др., 2014; Filyushkin, Sokolovskiy, Lebedev, 2018).

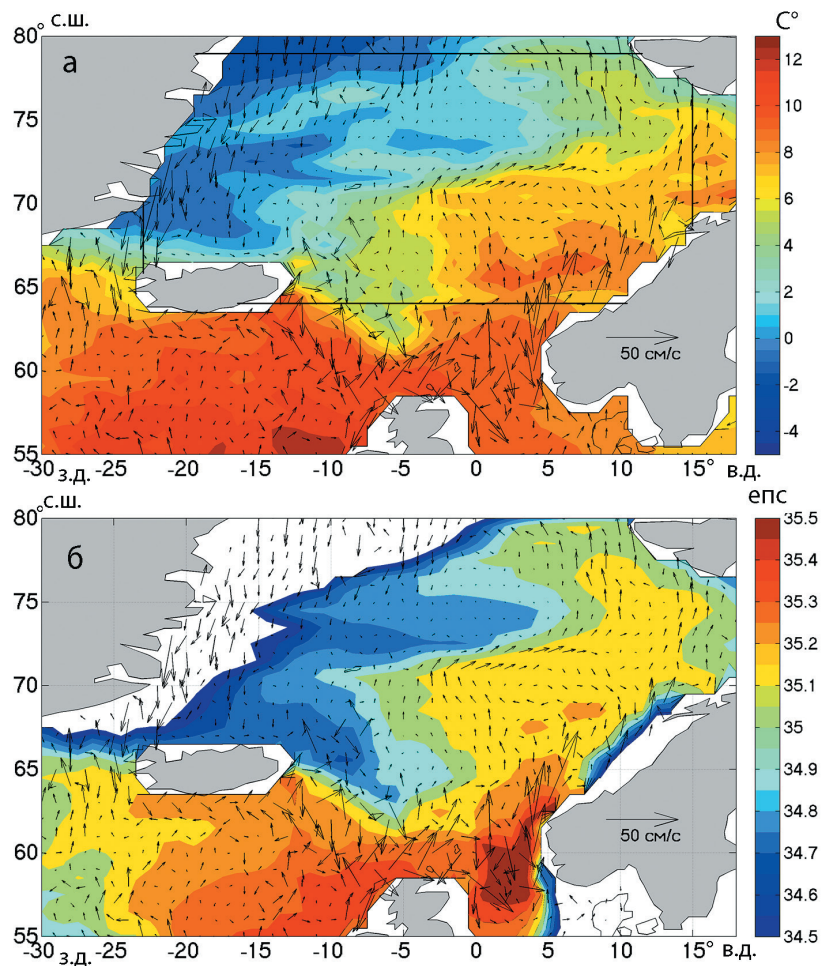


Рис. 1. Среднегодовое распределение температуры на глубине 20 м (а) и солёности на глубине 50 м (б) по измерениям Арго за период с 2005 по 2014 гг. на фоне поля течений в области Полярных морей. Толстыми черными линиями (а) показано положение разрезов.

На севере, в западной части пролива Фрама, формируется Восточно-Гренландское течение, несущее в южном направлении распресненные воды СЛО (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 20 и 50 м (рис. 1а, б). Теплая (6–10°C) 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 (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 епс) до северных границ области.

Для расчетов водообмена область ПМ была ограничена от окружающих океанов следующим образом (рис. 1а): 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, разрез от Исландии до Норвегии («Исланд») по 64°с.ш. Подобное положение разрезов было предложено в работе (Isachsen, Nøst, 2012).

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 ± 2.1 Св. Среднее поступление воды через разрез «Фрам» оказалось близким к нулю, составив всего лишь 0.3 ± 0.6 Св. Основная часть воды покидала область ПМ через разрез «Датский», средний расход через который оказался равным 3.4 ± 1.7 Св. Через разрез «Баренц» область ПМ покидало в среднем 1.1 ± 0.7 Св воды. Авторами было показано, что полученные расходы воды на всех пограничных разрезах хорошо совпадают с результатами исследований других авторов и данными натурных наблюдений, а также выявлен синхронный характер межгодовых и сезонных колебаний расходов воды с изменчивостью индекса Североатлантического колебания.

Целью настоящей работы является анализ межгодовой изменчивости водообмена ПМ с окружающими акваториями и сравнительная оценка вклада ветрового и термохалинного факторов в формирование такой изменчивости. Межгодовая изменчивость переносов через границы исследуемой области ПМ проиллюстрирована на рис. 2а графиками изменчивости расходов через разрезы «Исланд» (положительные значения соответствуют притоку воды в область), «Датский» (положительные значения соответствуют оттоку воды из области) и «Баренц» (положительные значения соответствуют оттоку воды из области). Изменчивость расходов имеет четко выраженный сезонный характер с максимальными расходами осенью–зимой и минимальными весной–летом. Из особенностей в поведении изменчивости расходов отметим заметное падение расходов на разрезах «Исланд» и «Датский» зимой 2010 г. Колебания расхода между зимой и летом в отдельные годы рассматриваемого периода достигали 6 Св на разрезе «Исланд», 4.5 Св на разрезе «Датский» и 2 Св на разрезе «Баренц». При этом диапазон межгодовых колебаний зимних расходов на разрезе «Исланд» составил 4.5–7.7 Св, на разрезе «Датский» – 3.3–6.0 Св и

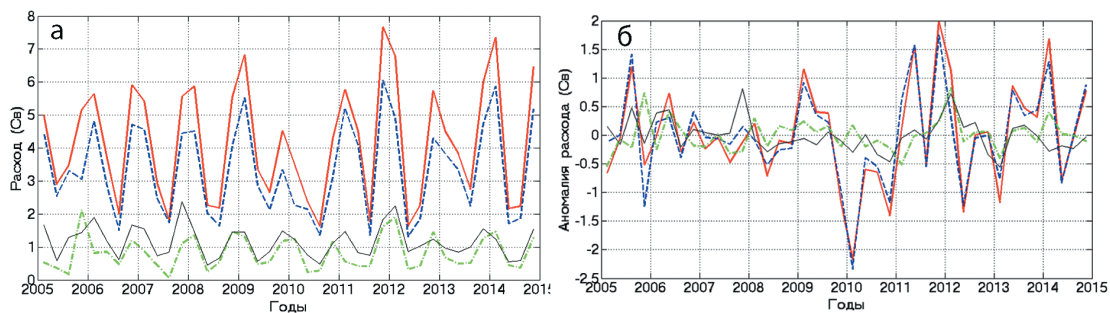


Рис. 2. Изменчивость значений расхода (а) и аномалий расхода (Св) относительно среднего сезонного хода (б) на разрезе «Исланд» между Исландией и Норвегией по 64° с.ш. (толстая красная линия), в Датском проливе по 23° з.д. в западном направлении (синяя штриховая линия), на разрезе «Баренц» между Норвегией и Шпицбергенем по 15° в.д. (черная тонкая линия), а также разность между притоком через разрез «Исланд» и оттоком через разрез «Датский» (зеленый штрих-пунктир). Данные представлены среднесезонными величинами и охватывают период 2005–2014 гг. по данным АМИГО.

1.2–2.4 Св на разрезе «Баренц». Летом диапазон межгодовых колебаний расходов оказался заметно ниже: 1.6–2.9 Св на разрезе «Исланд», 1.3–2.5 Св на разрезе «Датский» и 0.5–0.9 Св на разрезе «Баренц». Также на рис. 2а зеленым штрих-пунктиром показана разность между притоком через разрез «Исланд» и оттоком через разрез «Датский». Эта разность также имеет хорошо выраженный сезонный ход с максимумом в 1–2 Св зимой и минимумом 0–0.5 Св летом и, как видно из рисунка, хорошо коррелирует с расходом через разрез «Баренц», что объясняется незначительными средними расходами через четвертый, замыкающий границы области, разрез «Фрам».

Для более детального анализа изменчивости расходов из них был удален средний за период 2005–2014 гг. сезонный ход. Полученные в результате аномалии расходов представлены на рис. 2б. При взгляде на этот рисунок, сразу бросается в глаза как количественная, так и качественная близость между аномалиями притока через разрез «Исланд» и оттока через разрез «Датский». Поскольку гидрологические условия на этих разрезах существенно разные, единственным разумным объяснением такого близкого совпадения аномалий расходов на двух принципиально разных разрезах может служить определяющая роль ветра в формировании их изменчивости. Для проверки этого предположения были выполнены описанные выше дополнительные численные эксперименты, результаты которых представлены на рис. 3–4.

Межгодовая изменчивость расходов на ограничивающих область ПМ разрезах проиллюстрирована на рис. 3. Анализ графиков показывает, с одной стороны, практически полное совпадение результатов численного Эксперимента 1 с исходными расчетами АМИГО на всех четырех разрезах, а с другой стороны, – отсутствие значимой межгодовой изменчивости расходов в данных расчетов численного Эксперимента 2. При этом на всех разрезах, за исключением разреза «Фрам» (рис. 3г), в изменчивости расходов имеется четко выраженная сезонная составляющая значительной амплитуды. Изменчивость расхода через разрез «Фрам» содержит полу-

годовую составляющую, что особенно хорошо видно на графике, представляющем результат расчета в численном Эксперименте 2 (тонкий красный пунктир на рис. 3г).

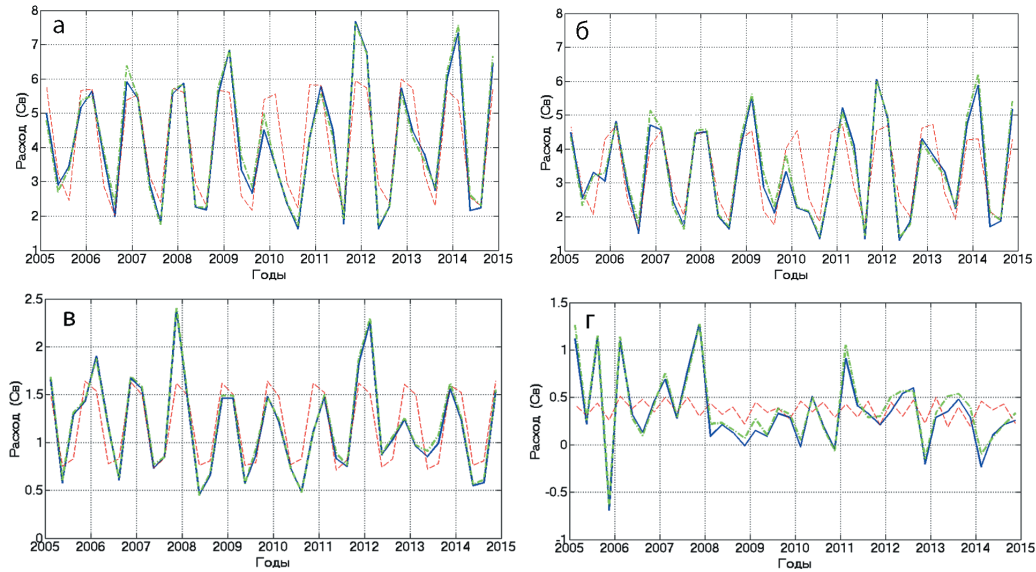


Рис. 3. Изменчивость среднесезонных значений расхода (Св) на разрезе «Исланд» между Исландией и Норвегией по 64° с.ш. (а), в Датском проливе по 23° з.д. в западном направлении (б), на разрезе «Баренц» между Норвегией и Шпицбергеном по 15° в.д. (в) и в проливе Фрама по 79° с.ш. в южном направлении (г). Результаты расчетов АМИГО представлены синей сплошной линией, результаты Эксперимента 1 представлены зеленой штрих-пунктирной линией, результаты Эксперимента 2 изображены красной штриховой линией.

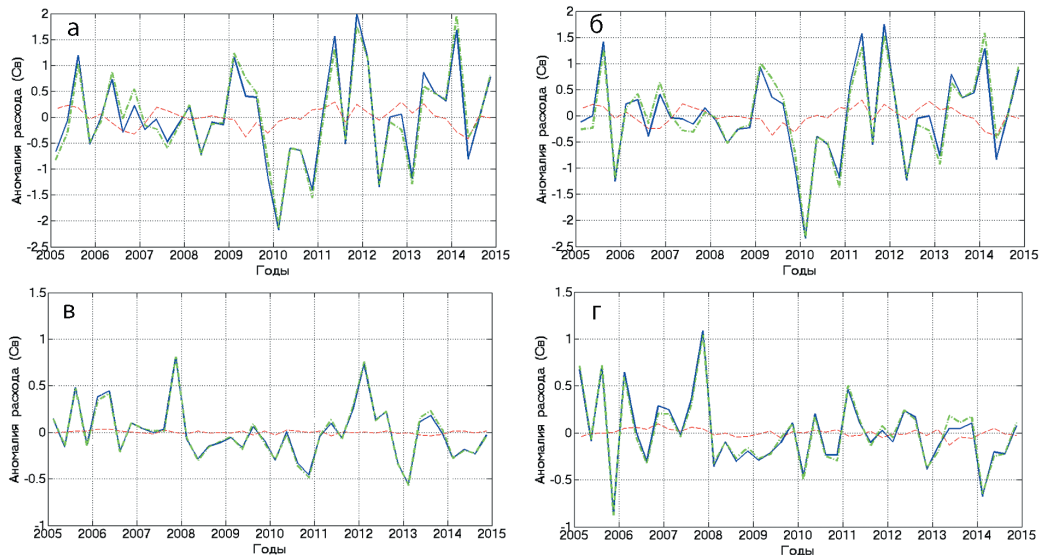


Рис. 4. Изменчивость аномалий расхода (Св) относительно среднего сезонного хода на разрезе «Исланд» между Исландией и Норвегией по 64° с.ш. (а), в Датском проливе по 23° з.д. в западном направлении (б), на разрезе «Баренц» между Норвегией и Шпицбергеном по 15° в.д. (в) и в проливе Фрама по 79° с.ш. в южном направлении (г). Результаты расчетов АМИГО представлены синей сплошной линией, результаты Эксперимента 1 представлены зеленой штрих-пунктирной линией, результаты Эксперимента 2 изображены красной штриховой линией.

На рис. 4 представлены графики аномалий описанных выше расходов, полученные в результате удаления из расходов среднего за период 2005–2014 гг. сезонного хода. График изменчивости аномалий расходов в Эксперименте 1, в котором в качестве форсинга для среднемноголетних сезонных полей температуры и солёности использовался реальный сезонный ветер (зеленый штрих-пунктир), ведет себя аналогично графику расходов по исходным данным АМИГО (толстая синяя линия). При этом графики изменчивости аномалий расходов, полученных в Эксперименте 2, где в качестве форсинга для реальных сезонных полей температуры и солёности использовался осредненный за 2005–2014 гг. для соответствующего сезона ветер (тонкая красная штриховая линия), выделяются практически полным отсутствием межгодовой изменчивости.

Представленные результаты численных экспериментов наглядно демонстрируют, что межгодовая изменчивость водообмена Полярных морей с окружающими океанами, главным образом, формируется под влиянием изменчивости полей тангенциального напряжения трения ветра и при этом слабо зависит от межгодовой изменчивости термохалинных полей. Похожий вывод (но для синоптических масштабов времени) был сделан ранее в работе (Иванов, Лебедев, 1996), в которой анализировалась изменчивость полей течений северной части Атлантического океана в модельных расчетах с использованием реальных ежесуточных полей ветра. Полученные выводы находятся в хорошем соответствии с выводами ряда работ о наличии четко выраженной связи изменчивости расходов течений в исследуемом регионе с изменчивостью атмосферного индекса Североатлантического колебания (Филлюшкин и др., 2013; Лебедев, 2016; Raj et al., 2018; Лебедев и др., 2019).

Заключение

По результатам проведенных модельных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. Модельные расчеты АМИГО с использованием данных Argo за 2005–2014 гг. позволили оценить межгодовую изменчивость расходов на разрезах, ограничивающих область Полярных морей. Изменчивость расходов имеет четко выраженный сезонный характер, с максимальными значениями осенью–зимой и минимумами весной–летом. Изменчивость расхода через пролив Фрама содержит полугодовую составляющую, при том, что среднее поступление воды через пролив Фрама оказалось близким к нулю, составив всего лишь 0.3 ± 0.6 Св. Средний расход через разрез от Исландии до Норвегии по 64° с.ш. получился равным 4.2 ± 2.1 Св, при этом диапазон межгодовых колебаний зимних расходов составил 4.5–7.7 Св, а летних – 1.6–2.9 Св. Вынос воды через Датский пролив оказался равным 3.4 ± 1.7 Св с диапазоном межгодовых колебаний зимних расходов 3.3–6.0 Св, а летних – 1.3–2.5 Св. Средний перенос в Баренцево море между Норвегией и Шпицбергом составил 1.1 ± 0.7 Св при относительно небольшом диапазоне межгодовых колебаний: 1.2–2.4 Св зимой и 0.5–0.9 Св летом.

2. Численный эксперимент с заменой в расчетах АМИГО реальных сезонных полей тангенциального напряжения трения ветра на их осредненные за 2005–2014 гг. аналоги показал, что изменчивость расходов через ограничивающие область Полярных морей разрезы начинает в этом случае носить в основном сезонный характер, а межгодовая изменчивость становится слабовыраженной. На основании выполненной серии численных экспериментов с моделью АМИГО получен вывод о том, что межгодовая изменчивость термохалинных полей Полярных морей оказывает слабое влияние на изменчивость расходов через ограничивающие их разрезы.

3. Численный эксперимент с заменой в расчетах АМИГО реальных сезонных полей температуры и солености на их среднемноголетние для периода 2005–2014 гг. аналоги показал, что изменчивость расходов через ограничивающие Полярные моря разрезы оказывается практически идентичной изменчивости, полученной на основе оригинальных расчетов АМИГО. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что основным фактором, определяющим межгодовую изменчивость водообмена Полярных морей с окружающими океанами, является изменчивость полей тангенциального напряжения трения ветра.

Благодарности. 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 Argo 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

- Белоненко Т.В., Волков Д.Л., Норден Ю.Е., Ожигин В.К. Циркуляция вод в Лофотенской котловине Норвежского моря // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2014. Вып. 2. С. 108–121.
- 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.
- 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 Куроиси 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. 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.
- Лебедев К.В.* Модельное исследование ветрового вклада в межгодовую изменчивость расхода Антарктического циркумполярного течения южнее Австралии // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 2. С. 172–182. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).10.
- Лебедев К.В., Саркисян А.С., Никитин О.П.* Сравнительный анализ поверхностной циркуляции Северной Атлантики, воспроизведенной тремя различными методами // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2016. Т. 52. № 4. С. 465–474.
- 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. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).11.
- 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.
- Саркисян А.С., Никитин О.П., Лебедев К.В.* Физические характеристики Гольфстрима как индикатор качества моделирования циркуляции Мирового океана // Докл. АН. 2016. Т. 471. № 5. С. 595–598.
- 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.
- 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, 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., 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 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.
- 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.
- Furue R., Takatama K., Sasaki H., Schneider N., Nonaka M., Taguchi B.* Impacts of sea-surface salinity in an eddy-resolving semi-global OGCM // *Ocean Modelling*. 2018. Vol. 122. P. 36–56. DOI: 10.1016/j.ocemod.2017.11.004.
- 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.
- Lebedev K.V., Tarakanov R.Yu.* A model study of the wind stress influence on the interannual variability of the Antarctic Circumpolar Current // *Russ. J. Earth Sci.* 2018. Vol. 18. ES2002. DOI: 10.2205/2017ES000610.
- 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.
- 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.

- 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. DOI: 10.1029/2008JC005073.
- 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.

THE MODEL STUDY OF THE WATER EXCHANGE INTERANNUAL VARIABILITY BETWEEN ATLANTIC, NORDIC SEAS, AND ARCTIC OCEAN

Lebedev K.V., Filyushkin B.N., Shchepetkin A.F.

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

Submitted 09.06.2020, accepted 28.08.2020

The interannual variability of the mass transports through the Denmark and Fram Straits, and through the sections separating the Nordic Seas from the Atlantic Ocean and Barents Sea is studied on the base of numerical simulations performed with the use of the Argo-based Model for Investigation of the Global Ocean (AMIGO). The model consists of a block for variational interpolation to a regular grid of Argo floats data and a block for model hydrodynamic adjustment of variationally interpolated fields. Additional numerical experiments were carried out in order to study the contribution of the wind forcing to the interannual variability of the transports: the real thermohaline fields corresponding to the particular time period were replaced by climatic ones (1) and by replacing the real wind forcing data with the climatic ones (2). Analysis of the numerical experiments results has shown that the variable wind stress forcing is the key factor determining the interannual variability of the water exchange between Atlantic, Nordic Seas, and Arctic Ocean.

Keywords: Nordic Seas, modeling, ocean currents, mass transport, variability, wind stress, Argo floats

Acknowledgment: Argo data were collected and made publicly available by the international program Argo with the participation of national programs (<http://www.argo.ucsd.edu>, <http://argo.jcommops.org>). The Argo program is part of the Global Ocean Observing Instrument System. Altimetry information was prepared using the

Ssalto / Duacs satellite altimetry processing system and is distributed through Aviso with the support of CNES (<http://www.aviso.altimetry.fr/duacs/>).

The work on processing Argo data was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia (topic No. 0149-2019-000). The work on the analysis of the variability of water exchange between the Polar Seas and the Atlantic and Arctic Oceans was carried out with the financial support of the RFBR grant No. 18-05-80089. The AMIGO database is freely available on the IO RAS server at <http://argo.ocean.ru/>.

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, Washington: U.S. Government Printing Office 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.
- Belonenko T.V., Volkov D.L., Norden Yu.E., and Ozhigin V.K. Circulation of waters in the Lofoten Basin of the Norwegian Sea. *Vestnik of St. Petersburg State University*, 2014, Vol. 7, No. 2, pp. 108–121.
- 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., Kállberg 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., and 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.
- 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.
- Furue R., Takatama K., Sasaki H., Schneider N., Nonaka M., and Taguchi B. Impacts of sea-surface salinity in an eddy-resolving semi-global OGCM. *Ocean Modelling*, 2018, Vol. 122, pp. 36–56, doi: 10.1016/j.ocemod.2017.11.004.
- 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. The model study of the wind stress impact to the interannual variability of the Antarctic Circumpolar Current south of Australia. *Journal of Oceanological Research*, 2019, Vol. 47, No. 2, pp. 172–182, doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).10.
- 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. *Journal of Oceanological Research*, 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.
- Lebedev K.V., Filyushkin B.N., and Kozhelupova N.G. Argo-based study of water, heat, and salt exchange between Atlantic, Nordic Seas, and Arctic Ocean. *Journal of Oceanological Research*, 2019, Vol. 47, No. 2, pp. 183–197, doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).11.
- Lebedev K.V., Sarkisyan A.S., and Nikitin O.P. Comparative analysis of the North Atlantic surface circulation reproduced by three different methods. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic*

- Physics*, 2016, Vol. 52, No. 4, pp. 410–417.
- Lebedev K.V. and Tarakanov R.Yu. A model study of the wind stress influence on the interannual variability of the Antarctic Circumpolar Current. *Russ. J. Earth Sci.*, 2018, Vol. 18, ES2002, doi: 10.2205/2017ES000610.
- 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, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 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.
- Rosby T., Prater M.D., and Søiland H. Pathways of inflow and dispersion of warm waters in the Nordic seas. *J. Geophys. Res.*, 2009, Vol. 114, C04011, doi: 10.1029/2008JC005073.
- 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.
- Sarkisyan A.S., Nikitin O.P., and Lebedev K.V. Physical characteristics of the Gulf Stream as an indicator of the quality of large-scale circulation modeling. *Doklady Earth Sciences*, 2016, Vol. 471, No. 2, pp. 1288–1291.
- 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.