© Амбросимов А.К., Дианский Н.А., Клювиткин А.А., Мельников В.А. 2019, Океанологические исследования, 2019, Том 47, № 2, С. 246–265

УДК: 551.465 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).15

ДОЛГОВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЙ В ЗОНЕ СУБАРКТИЧЕСКОГО ФРОНТА АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА

Амбросимов А.К.[1], Дианский Н.А.[2], Клювиткин А.А.[1], Мельников В.А.[1]

[1]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, e–mail: ambrosimov@ocean.ru
[2]Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, 119034, Москва, Кропоткинский пер., д. 6, e-mail: nikolay.diansky@gmail.com
Статья поступила в редакцию 15.04.2019, одобрена к печати 30.05.2019

На основе временных рядов скорости течений и температуры, по измерениям в период с июня 2016 г. по июль 2017 г., в трех точках в зоне Субарктического фронта Атлантики, наряду с использованием многолетних (с 1993 г. по настоящее время) спутниковых данных зондирований поверхности океана, изучаются многомасштабные вариации течений на поверхности океана и придонные течения над западным и восточным флангами хребта Рейкьянес, а также вблизи поднятия Хэттон, на плато Роколл. При постановке и снятии буйковых станций были проведены также гидрологические зондирования от поверхности до дна с отсчетами через 10 м. С использованием данных банка гидрологических станций (WOD13), спутниковых массивов температуры поверхности океана (ТПО) (Pathfinder), многолетних рядов уровня моря и геострофических скоростей (AVISO), а также рельефа дна (модель ETOPO-1) определены особенности долговременных циклических колебаний ТПО, уровня моря, геострофических течений на поверхности океана в приполярном регионе Атлантики. Показано, что соответственно крупномасшабной термохалинной структуре Субарктического фронта, на поверхности океана обнаруживаются две ветви Северо-Атлантического течения, одна из которых направлена от поднятия Хэттон в сторону Исландско-Фарерского поднятия, а другая – вдоль западного склона хребта Рейкьянес, к Исландии. Для первой ветви, которая является главным продолжением Северо-Атлантического течения, определен средний (за 25 лет) дрейф вод со скоростью 9.1±0.1 см/с, на северо-восток. Во второй ветви, которая образует восточную часть Субарктического циклонического круговорота, средний дрейф вод со скоростью 4.0±0.1 см/с направлен на север-северо-восток. В промежуточных водах фронтальной зоны наблюдается средний перенос вод со скоростью 2.7±0.1 см/с на север-северо-восток, вдоль восточного склона хребта Рейкьянес. За счет разномасштабных составляющих изменчивости, средняя плотность кинетической энергии (ПКЭ) течений суммарных поверхностных течений (109, 45, 97 (±3) эрг/см^3) в точках постановки буйковых станций (с востока на запад) намного превышает энергию среднего дрейфа. Придонные течения на флангах хребта Рейкьянес направлены обратно течениям на поверхности океана. Вне Субарктического круговорота, в первой ветви Северо-Атлантического течения, направление среднего переноса сохраняется от поверхности океана до дна. Средняя (за год) ПКЭ течений около дна – 31, 143, 27(±3) эрг/см^3, соответственно для трех станций, с востока на запад. В зоне промежуточных вод фронтальной зоны, на восточном склоне хребта Рейкьянес, имеет место мощный реверсивный (относительно Северо-Атлантического течения) придонный поток вод на юго-запад, с большой средней скоростью ~ 15 см/с. ПКЭ течений в течение года изменяется в широких пределах: от нуля до ~ 600 эрг/см^3. Общая изменчивость обусловлена циклическими вариациями и перемежаемостью («вспышками») течений.

Выделяются многолетние циклы, сезонные колебания, синоптические флуктуации с периодами в интервале 30–300 суток, а также инерционные колебания и полусуточные приливные волны. Перемежаемость колебаний частично связана с изменениями низкочастотных течений, которые могут приводить к доплеровскому сдвигу частоты циклических составляющих спектра. Амплитуда флуктуаций температуры в придонном слое за год составила по средне-квадратическому отклонению (0.07–0.10)±0.01°C. Сезонный ход придонной температуры не обнаруживается. Заметен линейный тренд с потеплением на ~ (0.10–0.15)±0.01°C за год.

Ключевые слова: Северо-Атлантическое течение, Субарктический фронт, Исландский бассейн, хребет Рейкьянес, придонные течения, температура поверхности океана, аномалии уровня моря, геострофические течения, долговременные колебания, мезомасштабная изменчивость

Введение

С 1997 г. на протяжении более 20 лет, в Институте океанологии РАН проводятся ежегодные гидрологические зондирования и измерения течений в Северной Атлантике вдоль разреза на широте 59.5ºс.ш. от Оркнейских островов Шотландии до южной оконечности о. Гренландия (мыс Фарвелл) (Сарафанов и др., 2013; Sarafanov et al., 2018). Эти измерения известны как часть океанографических работ в ряду крупных мировых программ исследований физических и гидродинамических процессов во всей Северной Атлантике и в субполярной области Атлантики, в частности. В этом ряду исследовательских программ следует отметить такие масштабные проекты как: НЭВ (Натурный эксперимент по взаимодействию океана и атмосферы) 1968–1983 гг.; ПОЛЭКС (Полярный эксперимент), 1971–1983 гг., МПГ (Международный полярный год 2007/2008 гг.) и другие проекты, (Алексеев, 2014; Вязилова и др., 2014); программу РАЗРЕЗЫ 1980–1990 гг.; эксперименты ПОЛИМОДЕ 1976–1984 гг.; НЬЮФАЭКС-88 (Ньюфаундлендский эксперимент); АТЛАНТЭКС-90 (Атлантический эксперимент) (Саркисян, 1983); программу WOCE (World Ocean Circulation Experiment) 1990–1998 гг. (Thompson et al., 2001), как часть проекта WCRP (World Climate Research Programme); программу OVIDE (Observatoire de la Variabilité Interannuelle à Décennale) 2002–2012 гг., et al., 2016); программы RAPID–MOCHA (Rapid Climate Change–Meridional Overturning Circulation and Heatflux Array) и RAPID –WATCH 2004 г. – по настоящее время (Cunningham et al., 2007; Kanzow et al., 2007); программу OSNAP (Overturning in the Subpolar North Atlantic Program) 2012 г. – по настоящее время (Lozier et al., 2010; Lozier et al., 2017), включая эксперимент Франции RREX (Reykjanes Ridge Experiment), (http://www.umr-lops.fr/Projets/Projets-actifs/RREX); программу ASOF (Arctic-Subarctic Ocean Flux Study) 2000 г. – по настоящее время (Dickson, Boscolo, 2002), как часть проекта CLIVAR (Climate Variability and Predictability) (Hurrell et al., 2006); пятилетнюю (2017–2021 гг.) программу North Atlantic Climate System Integrated Study (ACSIS) (Sutton et al., 2018) и некоторые другие проекты (Cunningham et al., 2010).

В результате вышеперечисленных интенсивных программ контактных измерений, с использованием спутниковой информации (Berx, Payne, 2017) и модельных

расчетов (Treguier et al., 2005; Moshonkin et al., 2007; Дианский и др., 2010; Marzocchi et al., 2015; Diansky, Sukhonos, 2018) в субполярной области Атлантики были выявлены элементы системы течений и гидрологических структур, особенности физических и гидродинамических процессов, с учетом взаимодействия с атмосферой (Нестеров, 2013), а также их изменчивость в широкой полосе временных масштабов: от короткопериодных до многолетних (Zhao et al., 2018a; Zhao et al., 2018b).

Так, были получены сведения о положении фронтов и ветвей Северо-Атлантического течения, о размерах, форме, и положении и долговременной изменчивости Субарктического круговорота в связи с долговременными изменениями атмосферных центров действия. В частности было отмечено потепление в Субарктическом круговороте в середине девяностых годов, что привело к его некоторому ослаблению. Интенсивно исследовался фундаментальный процесс формирования глубинных водных масс и глубинных течений в результате конвекции с поверхности арктических морей, а также поступления в виде плюмов арктических вод из бассейна Северного Ледовитого океана через Датский пролив, Фареро-Исландский порог (и глубоководную ложбину в нем). О циркуляции промежуточных и глубинных вод известно, что распространение субарктических вод к низким широтам начинается в Лабрадорском море в виде Глубинного западного пограничного течения DWBC (Deep Western Boundary Current), а также, возможно, в виде некоторых придонных струйных течений в Исландском бассейне. Во многих работах отмечается сильное влияние хребта Рейкьянес и разломов в Срединно-Атлантическом хребте (Charlie-Gibbs Fracture Zone (CGFZ, 53°с.ш.), Faraday Fracture Zone (FFZ, 50°с.ш.) и Maxwell Fracture Zone (MFZ, 48°с.ш.) на поверхностные, промежуточные и глубинные течения.

Дополнительно к океанографическим данным измерений с использованием притопленных буйковых станций, гидрологических разрезов, поверхностных и подповерхностных дрифтеров SOFAR и ARGO, глайдеров, широко рассматриваются архивные данные измерений OceanSites, гидрологические данные WOD, данные спутниковых измерений уровня моря и геострофических течений AVISO, температуры поверхности океана Pathfinder, солености, приповерхностного ветра, данные атмосферных и океанских реанализов, индексы атмосферных центров действия и солнечной активности, палео-реконструкции температуры и течений по колонкам из осадочного слоя, результаты моделирования с ассимиляцией измерительных данных (MERCATOR), распределения притока солнечной радиации, биоты, сейсмической активности и электромагнитных полей.

Отметим две знаменитые концепции, выдвинутые применительно к субполярному региону Атлантики. Согласно первой концепции, вытекающей из численной модели системы атмосфера-океан (Марчук и др., 1989), в субполярном регионе располагается одна из так называемых «Энергоактивных зон океана» (ЭАЗО). Эта зона представляет собой крупномасштабный океанский гидрологический фронт, отделяющий воды умеренных широт от арктических, где взаимодействие океана и атмосферы происходит на повышенном энергетическом уровне, что, наподобие центров действия в атмосфере, оказывает определяющее влияние на глобальные

климатические состояния. Во второй концепции было предложено схематичное представление о глобальной общей циркуляции в Мировом океане в виде системы связанных друг с другом медленных поверхностных и придонных дрейфов вод, которая была названа «Глобальный океанский конвейер» (Лаппо, 1984; Broecker, 1987; Broecker, 1991; Richardson, 2008). Согласно этому термину, в Мировом океане перенос тепла из тропического пояса к полярным областям осуществляется крупномасштабными течениями в верхнем слое океана («верхняя ветвь конвейера»), а охлаждение нижнего слоя Мирового океана на тропических и умеренных широтах происходит в результате медленного распространения полярных холодных вод в нижних слоях океана («нижняя ветвь конвейера»). В полярных морях происходит трансформация вод в результате охлаждения на поверхности моря, глубоководной конвекции и переливов арктических вод через края глубокой котловины Северного Ледовитого океана. В частности, Атлантическая часть «Конвейера Брокера» носит название AMOC – Atlantic Meridional Overturning Circulation, (Buckley, Marshall, 2016). Процесс AMOC имеет фундаментальную роль в крупномасштабном меридиональном переносе тепла и, соответственно, в глобальной климатической системе Земли. Изменения в интенсивности AMOC влияют на температуру поверхности океана в глобальном масштабе (Yeager et al., 2012). Обнаруживаются корреляционные связи индекса AMOC с интенсивностью осадков над африканским Сахелем, в Индии и Бразилии; с частотой ураганов и изменениями летнего климата в Европе и Северной Америке. Увеличение переноса теплых атлантических вод в высокие широты приводит к дополнительному таянию арктических морских льдов (Serreze et al., 2007) и ледников Гренландии (Straneo, Heimbach, 2013), что имеет глубокие следствия в климатических изменениях на Земле.

Трудности в исследовании вышеперечисленных процессов очевидны: обширная акватория океана и сложная временная изменчивость наблюдаемых параметров требуют огромных измерительных и модельных ресурсов, накопления данных со временем и значительных усилий в анализе и обобщении измерительной информации.

Цель работы

Целью экспедиционных исследований Института океанологии в Северной Атлантике является оценка временной изменчивости гидрофизических параметров вод, в широкой полосе частот – от климатических до высокочастотных колебаний, обусловленных внутренними волнами и турбулентностью. Существующие в настоящее время схемы крупномасштабной циркуляции в Атлантическом Субарктическом круговороте, потоков массы воды, тепла и соли, процессов конвекции, образования холодных вод в морях Ирмингера и Лабрадорском, перетока арктической «воды» (водной массы) через цепь поднятий на широте по линии Гренландии–Исландия–Фарерские острова–Шотландия, влияний атмосферных воздействий, остаются далеко незавершенными именно вследствие существенной временной изменчивости и перемежаемости измеряемых параметров.

Измерения вдоль повторных гидрологических разрезов позволяют определить пространственную структуру крупномасштабных гидрофизических полей.

Однако, при интерпретации долговременных вариаций, наблюдаемых на разрезах, нельзя обойтись без сведений о временной изменчивости. Кроме того, при оценке течений и потоков при помощи динамического метода необходимы измерения скорости течений на некотором «отсчетном» горизонте и/или данные об уровне поверхности моря. Поэтому необходимы временные ряды параметров в некоторых реперных точках наблюдаемого поля. Без этого определить малые по величине климатические изменения очень проблематично. Второй важной функцией измерений в «точке» (на буйковой станции) является калибровка спутниковых данных дистанционных зондирований при помощи измерений in-situ.

Целью представленных в настоящей работе экспедиционных измерений является количественная оценка временной изменчивости скорости течений и температуры в придонном слое в зоне Субарктического фронта, на флангах хребта Рейкьянес и вблизи поднятия Хэттон, а также сравнение с гидродинамическими процессами на поверхности моря по спутниковым данным.

Измерения и данные

Для изучения придонной циркуляции вод в приполярной Атлантике в рамках многолетней гидрофизической программы Института океанологии РАН (Sarafanov et al., 2018) в 68-м рейсе НИС «Академик Иоффе», в июне 2016 г., при выполнении трансатлантического гидрологического разреза вдоль параллели 59.5°с.ш., в точках с долготами 17°59.980’, 26°39.82’ и 32°49.647’ з.д. были установлены 3 притопленные буйковые станции (ПБС) с номерами 3540, 3562 и 3580. ПБС были оснащены доплеровкими измерителями скорости течений DVS-750, DVS-6000, Aquadopp-6000 и DVS-750. Станции были подняты через год, в июле 2017 г., во время работ в 35-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш». В течение года, с июня 2016 г. по июль 2017 г., с дискретностью 1 час, были выполнены измерения скорости течений и температуры воды в придонном слое, на флангах хребта Рейкьянес и вблизи поднятия Хэттон. Скорости течения измерялись на станции 3580 на горизонтах 446 м и 2134 м при общей глубине моря 2203 м; на станции 3562 – на горизонте 2183 м при общей глубине моря 2237 м; на станции 3540 – на горизонте 2175 м при общей глубине моря 2239 м. На станциях 3562 и 3540 (на тех же горизонтах) проведены измерения придонной температуры. Карта постановки ПБС на фоне распределения ТПО, а также рельеф дна представлены на рис. 1а, б.

При постановке и снятии буйковых станций были выполнены гидрологические зондирования от поверхности океана до дна с отсчетами через 10 м по глубине.

С целью изучения долговременной изменчивости рассматривались спутниковые многолетние (с 1993 г. по настоящее время) массивы уровня моря, геострофических скоростей на поверхности океана (AVISO), ТПО (Pathfinder, 1982 г. по настоящее время) и данные гидрологических станций (WOD). Рельеф дна был построен по модели ETOPO-1, (Smith, Sandwell, 1997).

а

б

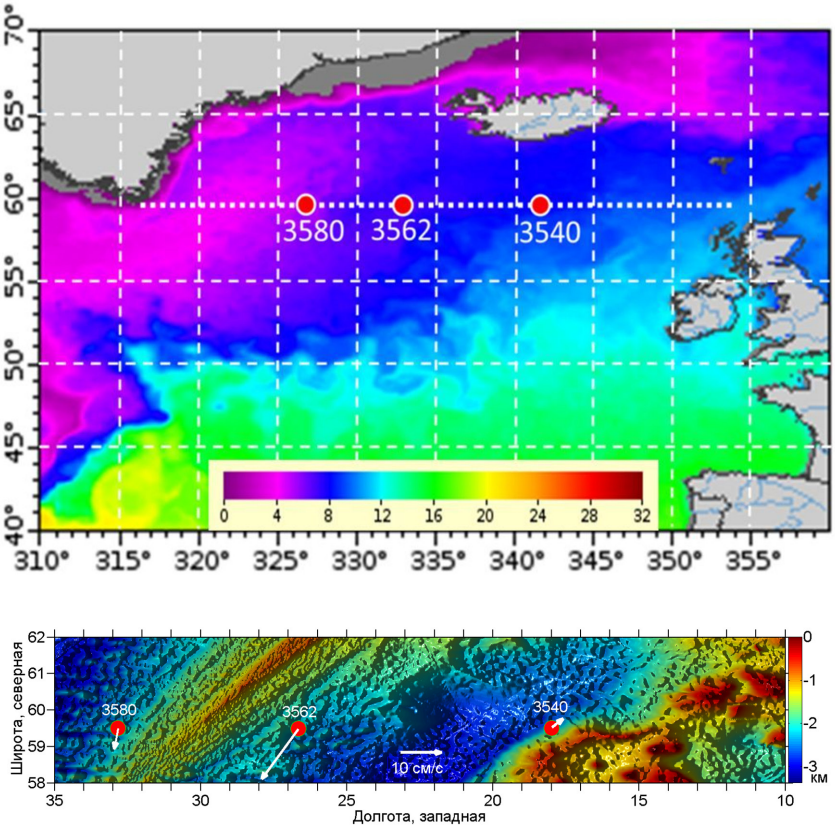

Рис. 1. Карта постановки ПБС на линии трансатлантического разреза по 59.5°с.ш. в 68-м рейсе НИС «Академик Иоффе» в 2016 г.: а – структура и положение крупномасштабных фронтальных зон в районе измерений по спутниковым данным ТПО в субполярной области, в зимний сезон (2015-12-01). Точечная линия–положение многолетнего гидрологического разреза Института океанологии РАН; б – рельеф дна по модели ETOPO-1. Красные кружки отмечают положение, а цифры – номера буйковых станций. Стрелками показаны векторы средних за год придонных течений.

Особенности течений в приполярной акватории Атлантики
Схематическое представление о циркуляции вод по литературным данным

Измерения были проведены на акватории Исландского бассейна, в южной части которого происходит разветвление Северо-Атлантического течения. Теплое Северо-Атлантическое течение в субполярной области – это система из нескольких ветвей поверхностных течений разной интенсивности, направленных в среднем вдоль крупномасштабных фронтов. В общих чертах циркуляцию на поверхности моря в Исландском бассейне можно представить как два основных быстро уменьшающихся с глубиной потока. В западной части впадины, к востоку от плато Роккол, располагается наиболее интенсивная ветвь Северо-Атлантического течения. Вторая по силе ветвь проходит вдоль западного склона хребта Рейкьянес. Между этими основными течениями существует переменное вихревое поле и нестационарные возвратные течения, обусловленные частью неоднородностя-

ми рельефа дна. В Исландском бассейне теплые Северо-Атлантические воды нагревают воздушные массы, которые переносятся западными ветрами (в диполе NAO) к Европе и существенно смягчают европейский климат (Seager et al., 2002). С другой стороны, вторая ветвь Северо-Атлантического течения в западной части Исландского бассейна дает начало циклоническому Субарктическому круговороту на акватории моря Ирмингера. Вследствие охлаждения и конвекции вод по обе стороны от о. Гренландия, а также в результате перетока холодных арктических вод через Гренландско-Шотландское поднятие (Dickson et al., 2008; Kanzow, Zenk, 2014), образуются глубинные воды Северной Атлантики. Эти воды медленно проникают к югу, охватывая придонный слой всей Атлантики. Но вдоль восточного побережья Северной Америки скорость переноса этих вод существенно возрастает. Здесь формируется Глубинное западное пограничное течение (DWBC – Deep Western Boundary Current). Суммарный поток холодных глубинных вод к экватору составляет нижнюю ветвь системы AMOC (Buckley, Marshall, 2016), как следует из общей концепции глобального «Конвейера Брокера» (Broecker, 1991).

В морях Ирмингера и Лабрадор, над континентальными склонами Гренландии и Канады, на поверхности моря существуют быстрые пограничные течения. В западной части Субарктического круговорота пограничные течения проникают до больших глубин, связывая циркуляцию на поверхности с циркуляцией придонных арктических водных масс, затекающих в регион из Северного Ледовитого океана. Напротив, в области от западного склона хребта Рейкьянес до плато Роколл, глубинные слои океана движутся в направлении обратном течениям в верхних слоях. В Исландском бассейне, под мощным слоем промежуточной Лабрадорской воды (LSW), с относительно медленными вихревыми течениями, обнаруживаются придонные струйные течения рециркуляции (Lavender et al., 2000; Lavender et al., 2005; Bower et al., 2002; Lozier et al., 2017).

Геострофические течения на поверхности моря по спутниковым данным

Исходя из термохалинной структуры, наблюдаемой на исследуемой акватории по спутниковым данным, ПБС были расставлены поперек Субарктического фронта (САФ), который представляет собой в Северной Атлантике границу водных масс умеренных широт и арктических вод. Гидрологические зондирования и *T–S* диаграммы показывают, что станция 3580 находилась в зоне Субарктической водной массы, станция 3540 – в Североатлантической воде, а станция 3562 – в области промежуточных вод, образующихся при трансфронтальном обмене. Пример горизонтальной структуры поля ТПО и расположения крупномасштабных фронтов в субполярной области по спутниковым данным (в зимний сезон) можно видеть на рис. 1а. Исходя из того, что поле плотности и уровень моря взаимно геострофически приспособлены на масштабах свыше ~10 км, представляет интерес оценить характеристики геострофических течений на поверхности океана по долговременным спутниковым данным измерений уровня моря (AVISO), табл. 1. Геострофиче-

ские течения на поверхности океана вычисляются по полю уровня моря. Многомасштабные горизонтальные градиенты уровня океана проявляют сложные течения в области САФ. Схематично геострофическую циркуляцию вод на поверхности моря можно представить в виде среднего (многолетнего) дрейфа вод и мезомасштабных течений, которые обусловлены меандрами и вихрями. Мезомасштабные вихревые движения в области САФ характеризуются повышенной кинетической энергией по сравнению с другими регионами в северо-восточной части Атлантики (Buckley, Marshall, 2016).

Таблица 1. Средние (за период наблюдения) широтные $U_{ср.}$, меридиональные $V_{ср.}$ компоненты скорости течений, плотность кинетической энергии $E_{кин.ср.}$, температура $T_{ср.}$, а также их средне-квадратические отклонения СКО U, СКО V, СКО $E_{кин.}$, СКО T (соответственно), в зоне Субарктического фронта.

Станция	$U_{ср.}$, см/с	$V_{ср.}$, см/с	СКО U, см/с	СКО V, см/с	$E_{кин.\ ср.}$, $(см/с)^2$	СКО $E_{кин}$, $(см/с)^2$	$T_{ср.}$, °C	СКО T $*10^{-2}$, °C
3540, 0 м	6.4	6.4	7.5	8.9	109	108	–	–
3540, 2175 м	2.0	1.7	5.5	4.9	31	34	3.369	7.34
3562, 0 м	1.2	2.4	5.5	7.2	45	52	–	–
3562, 2183 м	–8.7	–12.6	4.8	5.2	143	90	2.901	9.96
3580, 0 м	2.1	3.4	7.4	11.1	97	102	–	–
3580, 446 м	0.2	–3.4	7.8	8.9	76	76	–	–
3580, 2134 м	–0.7	–5.0	3.0	4.5	27	29	–	–

В точках постановки ПБС был определен средний за 25 лет дрейф поверхностных вод в северо-восточном секторе направлений с плотностью кинетической энергии (ПКЭ) течений 41, 3.5, 8.0(±3) эрг/см^3 (средние скорости по модулю 9.1, 2.7, 4.0 см/с) для станций 3540, 3562, 3580, табл. 1, рис. 2а.

При этом из табл. 1 видно, что средняя интенсивность суммарных течений на этих станциях была намного больше – 109, 45, 97 (±3) эрг/см^3 (в том же порядке перечисления станций) за счет разномасштабных составляющих суммарной изменчивости. Как следует из рис. 2а, течение на станции 3540 можно считать продолжением главной ветви Северо-Атлантического течения с направлением в сторону Исландско-Фарерского поднятия. Станции 3580 оказалась в области направленной к Исландии ветви Северо-Атлантического течения, которая образует восточную часть Субарктического циклонического круговорота. Между главными ветвями в области промежуточных вод (станция 3562) наблюдаются сравнительно слабые течения переменных в секторе от северо-западных до северо-восточных направлений.

Как следует из доступных спутниковых данных, указанные ветви Северо-Атлантического течения на поверхности моря подвержены заметным изменениям в период 1993–2018 гг. Суммарная изменчивость обусловлена циклическими составляющими и случайной перемежаемостью («вспышками») течений. Выделяются многолетние циклы, годовой ход, синоптические флуктуации, а также инерцион-

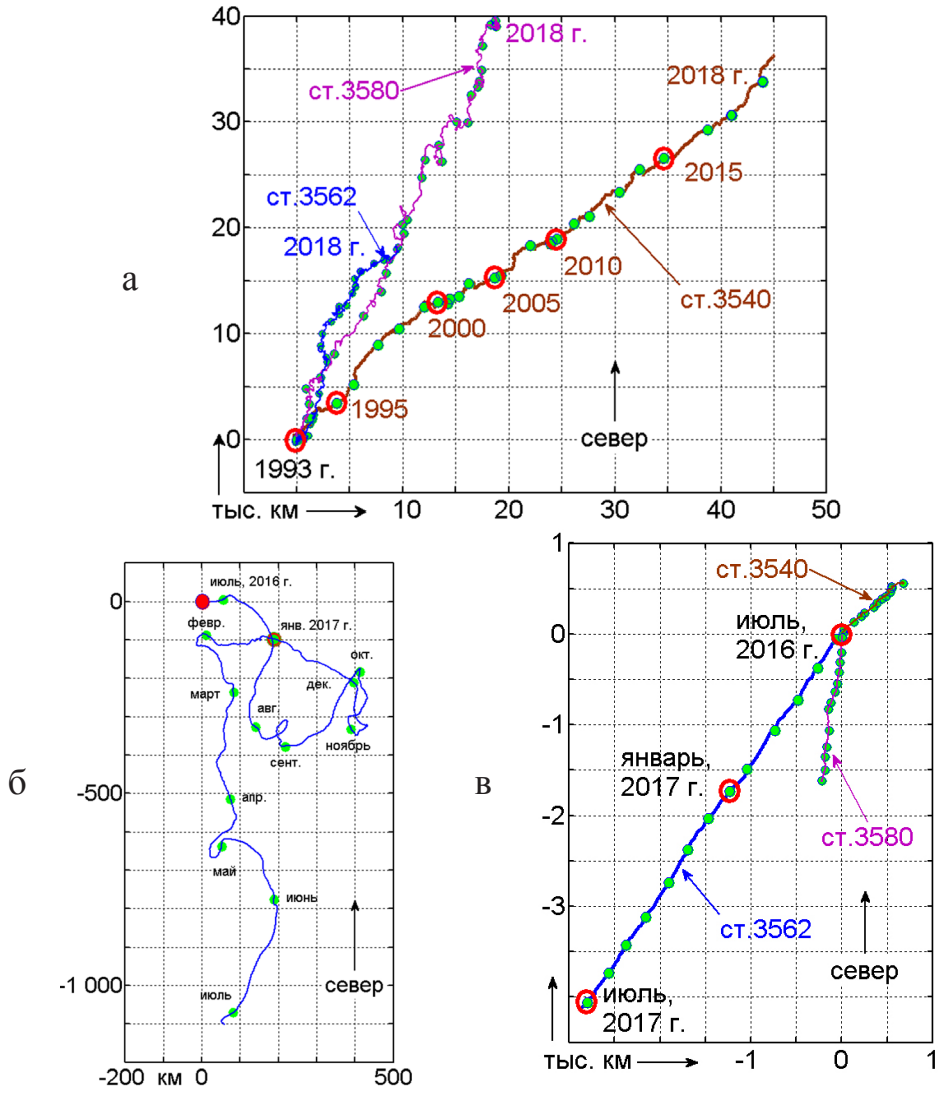

Рис. 2. Прогрессивные векторные диаграммы течений: а – геострофические течения на поверхности океана в точках постановки ПБС (по данным AVISO); б –течения по данным измерений in situ в промежуточном слое на ст. 3580, горизонт 446 м; в – течения в придонном слое по измерениям in situ: ст. 3580, горизонт 2134 м; ст. 3562, горизонт 2183 м; ст. 3540 горизонт 2175 м; глубины моря 2229, 2237, 2229 м, соответственно.

ные колебания и приливные волны. Спектральный состав долговременных колебаний на станциях примерно одинаков, хотя амплитуды составляющих значительно различаются. Так, в интервале периодов менее 14 лет обнаруживаются долговременные циклические колебания с периодами 13.7 лет (интервал: бесконечность – 12.3 лет); 9.6 лет (интервал 12.3–5.8 лет); 3.0 года (интервал 4.1–1.4 лет), 1.1 год (интервал 1.4–0.7 года). В более высокочастотной части спектров отмечаются значимые внутригодовые периоды 220–230, 120–130 и 40–60 суток. Эти составляющие изменчивости (за счет вихрей) хорошо выражены на станциях 3540 и 3580, находящихся в области главных ветвей Северо-Атлантического течения. В межфронтальной зоне (ст. 3562) масштаб вихрей становится малым: 40–60 сут. Амплитуда и ча-

стота каждой из циклических составляющих изменяются со временем. К примеру, на ст. 3540 ярко выраженная циклическая составляющая ПКЭ с периодом в среднем 9.6 лет в конце 25-летнего наблюдательного периода существенно усилилась, а период уменьшился до 8.5 лет. Перемежаемость наблюдается практически на всех частотах, включая и частоты стационарных периодических воздействий: годовые с гармониками и приливные.

Придонные течения по инструментальным измерениям

Придонные течения на обоих склонах хребта Рейкьянес (ст. 3580, 3562) противоположны по направлению Северо-Атлантическому течению на поверхности океана. Напротив, вне Субарктического круговорота (ст. 3540, около банки Хэттон), направление среднего переноса сохраняется от поверхности моря до дна. ПКЭ суммарных течений около дна составляет 27, 143, 31(±3) эрг/см^3 для станций 3580, 3562, 3540, соответственно. В зоне промежуточных вод на восточном склоне хребта Рейкьянес, на глубине 2183 м, имеет место мощный стабильный реверсивный относительно Северо-Атлантического течения поток вод на юго-запад, с большой средней скоростью ~15 см/с, рис. 2в. Станция 3580, установленная в восточной части моря Ирмингера (рис. 1б), у западного подножия хребта Рейкъянес, была снаряжена двумя доплеровскими измерителями ADCP на горизонтах 2134 м и 446 м. Здесь, в придонном слое (рис. 2в), в течение всего года поток воды при средней скорости 5.0 см/с перемещался практически в южном направлении при небольшой западной компоненте. Верхний слой океана на станции 3580 (горизонт 446 м) в период с июня 2016 по март 2017 гг. находился под воздействием большого циклонического вихря с горизонтальным масштабом порядка 350 км. А также наблюдались малые мезомасштабные возмущения масштаба ~ десятки км (рис. 2б). Результирующий годовой перенос вод в верхнем слое имеет в среднем то же направление, что и течение в придонном слое, но скорость среднего переноса в 1.5 раза меньше (3.4 см/с). При этом ПКЭ почти в 3 раза превышает энергию течений в придонном слое, табл. 1.

При помощи спектрального и вэйвлет анализа в инструментальных данных течений обнаруживаются внутригодовые цикличности с периодами 130–140 сут., 60–90 сут., 30–40 сут. и 20 сут., а также приливные и инерционные колебания с периодами 12.4 и 13.9 часа. Обращают на себя внимание значительные вариации по времени мощности всех перечисленных циклических составляющих рис. 3, рис. 4.

Отметим, что на станции 3580, компоненты геострофического течения, вычисленные по спутниковым данным уровня моря, заметны и на глубине 446 м. Однако корреляционные связи между временной изменчивостью течений на поверхности и в придонных слоях на всех трех станциях не прослеживаются. Анализ баротропных и бароклинных составляющих течений остается задачей на будущее.

Пульсации поверхностных и придонных течений

Обращает на себя внимание общая особенность наблюдаемых течений – и на поверхности океана, и придонных. Спорадически, интенсивность течений сильно возрастает по энергии до ~600 эрг/см^3. Для сравнения, в среднем за 1993–2017 гг. ПКЭ геострофических течений на поверхности моря, составляет ~50–100 эрг/см^3.

Из альтиметрических многолетних (1993 г. по настоящее время) рядов и годовых рядов измерений insitu следует, что временная изменчивость ПКЭ течений складывается из сложного сочетания колебаний в широком диапазоне временных масштабов – от долговременных до полусуточных (рис. 3). Полную дисперсию наблюдаемых вариаций можно представить в виде суммы дисперсий циклических (квазипериодических) составляющих (включая колебания долговременные, годовые (с обертонами), мезомасштабные) и некоторого случайного («хаотического») фона. Предполагается, что «хаотические» флуктуации – следствие экспоненциальной релаксации возмущений в гидродинамической системе (океан, атмосфера), выведенной из равновесия в результате множественных случайных внешних воздействий. Спектр этого процесса имеет «красный» вид и может объяснить спадающий

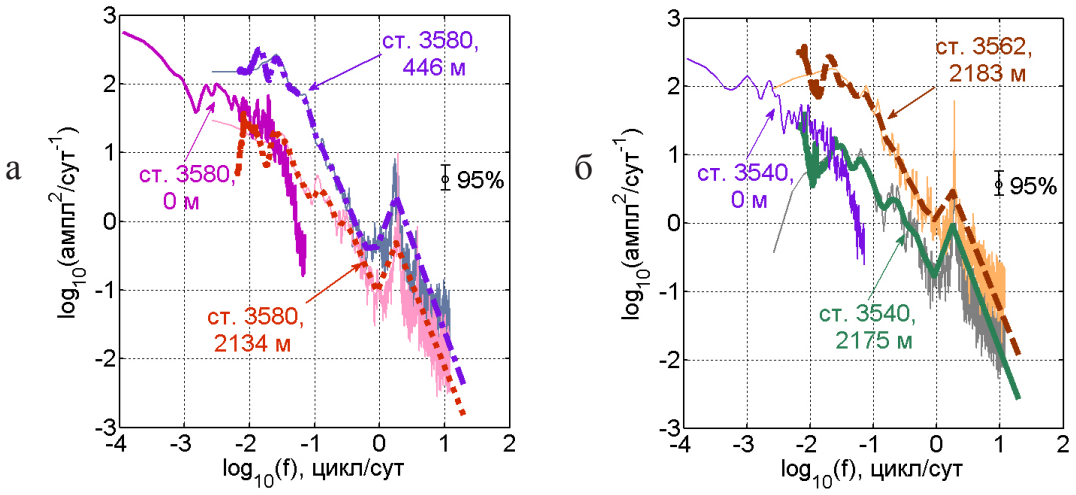

Рис. 3. Спектры плотности кинетической энергии ([ампл]=эрг/см^3) течений около дна и на поверхности моря, на станциях 3580 (а), 3562 и 3540 (б). Тонкие линии – Фурье спектры. Утолщенные линии – вэйвлет-плотность.

по частоте w^{-2} спектральный фон, который повсеместно наблюдается по измерениям в сплошных средах (Мельников, 2015). На этом фоне спектральные пики и плато указывают на доминирующие процессы притока энергии в гидродинамическую систему океана. Однако нередко параметры циклических составляющих спектра имеют признаки нестационарности по среднему значению, дисперсии и частотам, так что бывает затруднительно их оценить, так как максимумы в спектре расплываются и плохо выражены. Примеры нестационарных колебаний ПКЭ придонных течений можно видеть на рис. 4. В дополнение к релаксационному процессу в

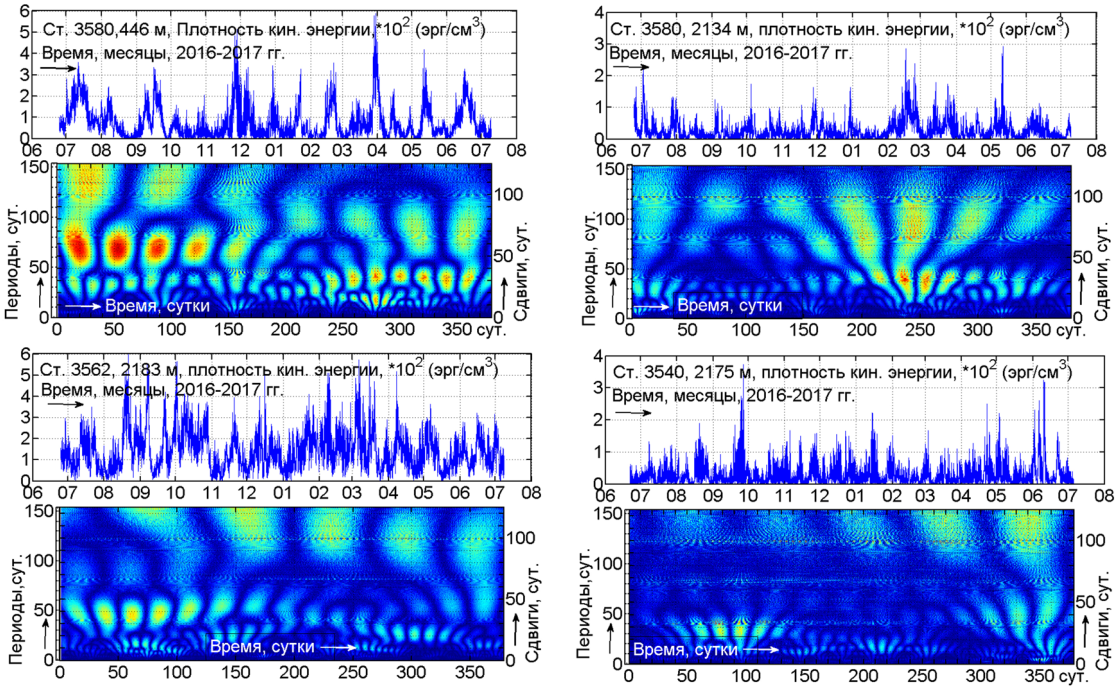

Рис. 4. Вейвлет-диаграммы плотности кинетической энергии течений на станциях 3580 (446 м), 3580 (2134 м), 3562 (2183 м) и 3540 (2175 м), в период с июля 2016 г. по июль 2017 г. Ядро вэйвлет-преобразования – функция Морле. Красные и желтые участки на диаграммах соответствуют высокой вэйвлет-плотности.

«хаотическую» составляющую добавляются разномасштабные (различной амплитуды и продолжительности) «вспышки» колебаний, которые возникают в случайные моменты времени. Такая хаотичность известна под названием «перемежаемость» (Ott, 2002). Перемежаемость существенным образом сказывается на средних величинах, которые часто используют для характеристики системы «в среднем». В нашем случае можно предположить, что наблюдаемая перемежаемость колебаний обусловлена частично изменениями средних (низкочастотных) течений, которые могут приводить к сдвигу частоты ω_0 циклических составляющих спектра, так как по измерениям в фиксированной точке наблюдается доплеровская частота $\omega = \omega_0 + U \cdot k$, где U – скорость течения, k – волновое число пространственной неоднородности поля. Указанная особенность хорошо заметна на вэйвлет-диаграммах ПКЭ течений, рис. 4.

Особенности флуктуаций придонной температуры воды в течение года

Средняя (за год) придонная температура на станции 3540 ($T_{ср.}$ = 3.369°C) была выше на 0.469±0.001°C (колебания в пределах 0.1–0.8°C), чем на станции 3562. Амплитуда флуктуаций температуры за год составила на станциях 3540 и 3562 по среднеквадратическому отклонению 0.07–0.10°C. Температура придонного потока воды на станции 3562 в течение года изменялась в пределах от 2.64°C до 3.21°C, при средней температуре $T_{ср.}$ = 2.901°C. Некоторое потепление воды наблюдалось на обеих станциях в апреле–мае 2017 г.

Сезонный ход придонной температуры не просматривается. Однако на обеих станциях заметен тренд с потеплением на ~(0.10–0.15)±0.01°С за год.

Выводы

1. В точках постановки ПБС по альтиметрическим данным был определен средний за 25 лет дрейф поверхностных вод в северо-восточном секторе направлений с плотностью кинетической энергии течений 41, 3.5, 8.0(±3) эрг/см^3 (средние скорости по модулю 9.1, 2.7, 4.0 см/с) для станций 3540, 3562, 3580. За счет разномасштабных циклических составляющих средняя интенсивность суммарных течений на станциях составляет 109, 45, 97(±3) эрг/см^3 соответственно.

2. Поверхностное течение на станции 3540 соответствует продолжению главной ветви Северо-Атлантического течения с направлением в сторону Исландско-Фарерского поднятия. Станции 3580 оказалась в области направленной к Исландии ветви Северо-Атлантического течения, которая образует восточную часть Субарктического циклонического круговорота. Между двумя главными ветвями САТ в области промежуточных вод (станция 3562) наблюдаются более слабые течения с переменными направлениями: от северо-западного до северо-восточного.

3. Долговременные циклические колебания течений на поверхности океана на всех станциях имеют периоды: 13.7 ±1.2 лет; 9.6±3.6 лет; 3.0±1.6 года; 1.1±0.35 год. Отмечаются значимые внутригодовые периоды 220–230, 120–130 и 40–60 суток, которые соответствуют внутригодовой, сезонной и межмесячной изменчивости.

4. Придонные течения на обоих склонах хребта Рейкьянес (ст. 3580, 3562) противоположны по направлению Северо-Атлантическому течению. Вне Субарктического круговорота (ст. 3540, около банки Хэттон) направление течений не меняется до дна. Средние за год скорости придонных течений – 2.6, 15.3 и 5.0 см/с, а средняя за год плотность кинетической энергии суммарных течений около дна составляет 31,143, 27(±3) эрг/см^3 для станций 3540, 3562, 3580. В зоне придонных промежуточных вод на восточном склоне хребта Рейкьянес имеет место мощный реверсивный поток вод на юго-запад, со средней скоростью ~15 см/с. На поверхности моря и на горизонте 446 м наблюдался циклонический вихрь масштабом порядка 350 км.

5. ПКЭ придонных течений над хребтом Рейкьянес изменяется в широких пределах: от нуля до ~600 эрг/см^3. Общая изменчивость обусловлена циклическими вариациями и перемежаемостью («вспышками») течений. Выделяются сезонные колебания, синоптические вариации с периодами в интервале 30–300 суток, а также инерционные колебания и полусуточные приливные волны. Наблюдаемая перемежаемость колебаний предположительно обусловлена изменениями средних (низкочастотных) течений.

6. Средняя (за год) придонная температура на станции 3540 ($T_{ср.}$ = 3.369°С) была выше на 0.469±0.001°С температуры на станции 3562 ($T_{ср.}$ = 2.901°С). На обеих станциях обнаружено потепление на ~ (0.10–0.15)±0.01°С за год. Амплитуда флуктуаций температуры за год составила на станциях 3540 и 3562 по среднеквадратическому отклонению 0.07–0.10±0.01°С.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ №18-05-01107.

Литература

Алексеев Г.В. Исследования взаимодействия океана и атмосферы в северной полярной области по программам крупномасштабных натурных экспериментов «НЭВ», «ПОЛЭКС-СЕВЕР», «РАЗРЕЗЫ» в 1960–1980-е годы // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 1(99). С. 41–52.

Вязилова А.Е., Алексеев Г.В., Смирнов А.В. Связь термохалинных аномалий в северо-западной Атлантике и Северо-европейском бассейне с колебаниями климата // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 3(101). С. 48–61.

Дианский Н.А., Володин Е.Н., Гусев А.В. Воспроизведение современного климата в совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 4. С. 448–466.

Марчук Г.И., Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Саркисян А.С., Хворостьянов В.И. Энергоактивные зоны: концептуальные вопросы // Итоги науки и техники. Сер. Атмосфера, Океан, Космос, программа Разрезы. 1989. Т. 10. 240 с.

Мельников В.А. Особенности разномасштабных вариаций в геофизических сплошных средах // Процессы в геосредах. М.: ИПМех. РАН, 2015. Т. 2. № 3. С. 49–61.

Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан // М.: Триада, 2013. 144 с.

Сарафанов А.А., Фалина А.С., Соков А.В. Многолетние изменения характеристик ициркуляция глубинных вод на севере Атлантического океана: роль региональных и внешних факторов // ДАН. 2013. Т. 450. № 4. С. 470–473.

Саркисян А.С. Крупномасштабные океанографические эксперименты // Вестник АН СССР. 1983. № 10. С. 83–89.

Berx B., Payne M.R. The Sub-Polar Gyre Index – a community data set for application in fisheries and environment research // Earth System Science Data. 2017. Vol. 9. P. 259–266.

Bower A.S., Le Cann B., Rossby T., Zenk W., Gould J., Speer K., Richardson P.L., Prater M.D., Zhang H.M. Directly measured mid-depth circulation in the northeastern North Atlantic Ocean // Nature. 2002. Vol. 419. P. 603–607.

Broecker W.S. The biggest chill // Natural History. 1987. Vol. 96. P. 74–82.

Broecker W.S. The great ocean conveyor // Oceanography. 1991. Vol. 4. No. 2. P. 79–89.

Broecker W.S., Peng T.H. Tracers in the Sea // Eldigio Press, Palisades, New York. 1982. 690 p.

Buckley M.W., Marshall J. Observations, inferences, and mechanisms of Atlantic Meridional Overturning Circulation variability: A review // Rev. Geophys. 2016. Vol. 54. P. 1–59.

Cunningham S., Baringer M., Johns B., Toole J., Osterhus S., Fischer J., Piola A., McDonagh E. The Present and Future System for Measuring the Atlantic Meridional Overturning Circulation and Heat Transport // In: Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society (Vol. 2). Venice, Italy, 21–25 September 2009, Hall J., Harrison D.E., Stammer D., Eds. ESA Publication WPP–306, 2010. P. 1–16.

Cunningham S.A., Kanzow T.O., Rayner D., Barringer M.O., Johns W.E., Marotzke J., Longworth H.R., Grant E.M., Hirschi J.J.M., Beal L.M., Meinen C.S., Bryden H.L. Temporal variability of the Atlantic meridional overturning circulation at 26.5°N // Science. 2007. Vol. 317. P. 935–938.

Daniault N.,Mercier H., Lherminier P., Sarafanov A., Falina A., Zunino P., Pérez F.F., Ríos A.F., Ferron B., Huck T., Thierry V., Gladyshev S. The northern North Atlantic Ocean mean circulation in the early 21st century // Progress in Oceanography. 2016. Vol. 146. P. 142–158.

Diansky N.A., Sukhonos P.A. Multidecadal Variability of Hydro-Thermodynamic Characteristics and Heat Fluxes in North Atlantic // Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. 2018. P. 125–137.

Dickson R., Boscolo R. The Arctic-Subarctic Ocean Flux Study (ASOF): Rationale, Scope and Methods // CLIVAR Exchanges. 2002. No. 25. P. 1–2.

Dickson R.R., Meincke J., Rhines P. Arctic Sub-Arctic Ocean fluxes: Defining the role of the Northern Seas in Climate // Springer. 2008. 734 p.

Hurrell J.W., Visbeck M., Busalacchi A., Clarke R.A., Delworth T.L., Dickson R.R., Johns W.E., Koltermann K.P., Kushnir Y., Marshall D., Mauritzen C., McCartney M.S., Piola A., Reason C., Reverdin G., Schott F., Sutton R., Wainer I., Wright D. Atlantic climate variability and predictability: a CLIVAR perspective // J. Climate. 2006. Vol. 19. No. 24. P. 5100–5121.

Kanzow T., Zenk W. Structure and transport of the Iceland Scotland Overflow plume along the Reykjanes Ridge in the Iceland Basin // Deep-Sea Research, part I. 2014. Vol. 86. P. 82–93.

Kanzow T.O., Cunningham S.A., Rayner D., Hirschi J.J.M., Johns W.E., Barringer M.O., Bryden H.L,. Beal L.M., Meinen C.S., Marotzke J. Flow compensation associated with the MOC at 26.5°N in the Atlantic // Science. 2007. Vol. 317. P. 938–941.

Lavender K.L., Davis R.E., Owens W.B. Mid-depth circulation observed in the interior Labrador and Irminger Seas by direct velocity measurements // Nature. 2000. Vol. 407. P. 66–68.

Lavender K.L., Owens B.W., Davis R.E. The mid-depth circulation of the subpolar North Atlantic Ocean as measured by subsurface floats // Deep Sea Res. Part I. 2005. Vol. 52. P. 767–785.

Lozier M.S., Bacon S., Bower A.S., Cunningham S.A., Femke de Jong M., de Steur L., de Young B., Fischer J., Gary S.F.,Greenan B.J.W., Heimbach P., Holliday N.P., Houpert L.M.E., Johns W.E., Johnson H.L., Karstensen J., Li F., Lin X., Mackay N., Marshall D.P., Mercier H., Myers P.G., Pickart R.S., Pillar H.R., Straneo F., Thierry V., Weller R.A., Williams R.G., Wilson C., Yang J., Zhao J., Zika J.D. Overturning in the Subpolar North Atlantic Program: A New International Ocean Observing System // Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS). 2017. Vol. 98. No. 4. P. 737–752.

Lozier S., Send U., Kanzow T., Marotzke J., Rhein M., Garzoli S., Rintoul S., Sloyan B., Speich S., Talley L., Baehr J., Meinen C., Treguier A.M., Lherminier P. The Present and Future System for Measuring the Atlantic Meridional Overturning Circulation and Heat Transport // In:Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society (Vol. 2). Venice, Italy. 21–25 Sept. 2009. Hall J., Harrison D.E., Stammer D., Eds. ESA Publication WPP–306, 2010. P. 1–16.

Marzocchi A., Hirschi J.J.M., Holliday N.P., Cunningham S.A., Blaker A.T., Coward A.C. The North Atlantic subpolar circulation in an eddy-resolving global ocean model // Journal of Marine Systems. 2015. Vol. 142. P. 126–143.

Moshonkin S.N., Diansky N.A., Gusev A.V. Influence of the interaction between the Atlantic and the Arctic Ocean on the Gulf Stream // Oceanology. 2007. Vol. 47. Part 2. P. 178–190.

Ott E. Chaos in dynamical systems // Cambridge University Press. 2002. 323 p.

Richardson P.L. On the history of meridional overturning circulation schematic diagrams // Progress in Oceanography. 2008. Vol. 76. P. 466–486.

Sarafanov A., Falina A., Sokov A., Zapotylko V., Gladyshev S. Ship-Based Monitoring of the Northern North Atlantic Ocean by the Shirshov Institute of Oceanology. The Main Results // The Ocean in Motion. Springer Oceanography. M.G. Velarde et al. (eds.). 2018. P. 415–427.

Seager R., Battisti D.S., Yin J., Gordon N., Naik N., Clement A.C., Cane M.A. Is the Gulf Stream responsible for Europe's mild winters? // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2002. Vol. 128(586). P. 2563–2586.

Serreze M.C., Holland M.M., Stroeve J. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover // Science. 2007. Vol. 315. P. 1533–1536.

Smith W.H.F., Sandwell D.T. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings // Science. 1997. Vol. 277. P. 1957–1962.

Straneo F., Heimbach P. North Atlantic warming and the retreat of Greenland's outlet glaciers // Nature. 2013. Vol. 504. P. 36–43.

Sutton R.T., McCarthy G.D., Robson J., Sinha B., Archibald A.T., Gray L.J. Atlantic Multidecadal Variability and the U.K. ACSIS Program // Bulletin of the American Meteorological Society. 2018. Vol. 99(2). P. 415–425.

Thompson B.J., Crease J., Gould J. The Origins, Development and Conduct of WOCE // In: Ocean Circulation and Climate: Observing and Modelling the Global Ocean, edited by Siedler G., Church J., Gould J. International Geophysics Series. Academic Press, San Diego. 2001. Vol. 77. P. 31–43.

Treguier A.M., Theetten S., Chassignet E.P., Penduff T., Smith R., Talley L., Beismann J.O., Böning C. The North Atlantic subpolar gyre in four high-resolution models // J. Phys. Oceanogr. 2005. Vol. 35. P. 757–774.

Yeager S.G., Karspeck A., Tribbia G., Teng H.A decadal prediction case study: Late twentieth-century North Atlantic Ocean heat content // J. Climate. 2012. Vol. 25. P. 5173–5189.

Zhao J., Bower A., Yang J., Lin X., Holliday N.P. Meridional heat transport variability induced by mesoscale processes in the subpolar North Atlantic // Nature Communications 2018. Vol. 9.

Zhao J., Bower A., Yang J., Lin X., Zhou C. Structure and Formation of Anticyclonic Eddies in the Iceland Basin // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2018. Vol. 123. P. 1–19.

LONG-TERM VARIABILITY OF CURRENTS IN THE SUBARCTIC FRONT OF THE ATLANTIC OCEAN

Ambrosimov A.K.[1], Diansky N.A.[2], Kluvitkin A.A.[1], Melnikov V.A.[1]

[1]Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia, e–mail: ambrosimov@ocean.ru
[2]N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Kropotkinsky Lane, 6, Moscow 119034, Russia, e-mail: nikolay.diansky@gmail.com
Submitted 15.04.2019, accepted 30.05.2019

Based on time series of near-bottom current velocities and temperatures obtained in the period June, 2016 to July, 2017, at three points in the Atlantic Subarctic Front, along with the use of multi-year (since 1993 up to now) satellite ocean surface sounding data, multi-scale fluctuations of ocean surface and near-bottom flows over the western and eastern flanks of the Reykjanes ridge, as well as near Hatton Rise, on the Rokoll plateau, are studied. Hydrological profiles were carried out from the ocean surface to the bottom with readings every 10 m, when setting and retrieving the buoy stations. Using data from the Bank of hydrological stations (WOD13), SST satellite arrays (Pathfinder), long-term sea level and geostrophic velocities time series (AVISO), and bottom topography (model ETOPO-1), features of long-term cyclical fluctuations of SST, sea level, geostrophic currents on the ocean surface were defined in the sub-polar North Atlantic. It is shown that, in accordance with the large-scale thermohaline structure of the Subarctic front, two branches of the North Atlantic Current are detected on the ocean surface.One is directed from the Hatton towards the Icelandic-Faroese Rise, and the other – alomg the western flank of the Reykjanes Ridge toward Iceland. For

the first branch, which is the main continuation of the North Atlantic Current, the average (for 25 years) water drift at a speed of 9.1±0.1 cm/s is determined to the northeast. The second branch, which forms the eastern part of the Subarctic cyclonic gyre, has the average water drift at a speed of 4.0±0.1 cm/s is directed north-northeast, along the western flank of the Reykjanes Ridge. In the intermediate waters of the frontal zone, an average water flow is observed at a speed of 2.7±0.1 cm/s to the north-northeast, along the eastern slope of the Reykjanes ridge.Due to the multy-scale components of the total variability, the average kinetic energy densities(KED) of total currents (109, 45, 97, (±3) erg/cm^3, at station points from east to west) are much greater than the mean drift KED. The near-bottom flows on the Reykjanes ridge flanks are opposite to the direction of the North Atlantic Current. Outside the Subarctic gyre, the direction of average transport is maintained from the ocean surface to the bottom. The average (per year) KED of near-bottom currents are 31, 143, 27 (±3 erg/cm^3), for three stations from east to west, respectively. In the intermediate waters of the frontal zone, above the eastern slope of the Reykjanes Ridge, there is a powerful reverse (relative to the North Atlantic Current) near-bottom water flow to the south-west, with a high average speed of ~ 15 cm/s. The KED of the currents during the year varies widely from zero to ~ 600 erg/cm^3. The overall variability is due to cyclical variations and intermittency ("flashes") of currents. Perennial cycles, seasonal variations, synoptic fluctuations with periods in the range of 30–300 days, as well as inertial oscillations and semi-diurnal tidal waves are distinguished. The intermittency of oscillations is partly due to changes in low-frequency flows, which can lead to a dopler frequency shift in the cyclic components of the spectrum. The amplitude of temperature fluctuations in the bottom layer for the year was (0.07–0.10) ± 0.01°C by the standard deviation. The seasonal changes of the bottom temperature are not detected. However, a linear trend with a warming of ~ (0.10–0.15) ± 0.01°C per year is noticeable.

Keywords: North Atlantic Current, Subarctic Front, Icelandic Basin, Reykjanes Ridge, near-bottom currents, ocean surface temperature, sea level anomalies, geostrophic currents, long-term fluctuations, mesoscale variability

References

Alekseev G.V. Issledovaniya vzaimodeistviya okeana i atmosfery v severnoi polyarnoi oblasti po programmam krupnomasshtabnykh naturnykh eksperimentov "NEV", "POLEKS-SEVER", "RAZREZY" v 1960–1980-e gody (Studies of the interaction of the ocean and atmosphere in the northern polar areas under the programs of large-scale field experiments of the "NEW", "POLEKS-SEVER" and "RAZREZY" in the 1960–1980s), *Problemy Arktiki i Antarktiki,* 2014, No. 1(99), pp. 41–52.

Berx B. and Payne M.R. The Sub-Polar Gyre Index – a community data set for application in fisheries and environment research. *Earth System Science Data,* 2017, Vol. 9, pp. 259–266.

Bower A.S., Le Cann B., Rossby T., Zenk W., Gould J., Speer K., Richardson P.L., Prater M.D., and Zhang H.M. Directly measured mid-depth circulation in the northeastern North Atlantic Ocean. *Nature*, 2002, Vol. 419, pp. 603–607.

Broecker W.S. and Peng T.H. Tracers in the Sea. Eldigio Press, Palisades, New York, 1982, 690 p.

Broecker W.S. The biggest chill. *Natural History*, 1987, Vol. 96, pp. 74–82.

Broecker W.S. The great ocean conveyor. *Oceanography*, 1991, Vol. 4, No. 2, pp. 79–89.

Buckley M.W. and Marshall J. Observations, inferences, and mechanisms of Atlantic Meridional Overturning Circulation variability. A review, *Rev. Geophys,* 2016, Vol. 54, pp.1–59.

Cunningham S., Baringer M., Johns B., Toole J., Osterhus S., Fischer J., Piola A., and McDonagh E. The Present and Future System for Measuring the Atlantic Meridional Overturning Circulation and Heat Transport. In: Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean

Observations and Information for Society (Vol. 2), Venice, Italy, 21–25 September 2009, Hall, J., Harrison, D.E., Stammer D., Eds., ESA Publication WPP–306, 2010, pp. 1–16.

Cunningham S.A., Kanzow T.O., Rayner D., Barringer M.O., Johns W.E., Marotzke J., Longworth H.R., Grant E.M., Hirschi J.J.M., Beal L.M., Meinen C.S., and Bryden H.L. Temporal variability of the Atlantic meridional overturning circulation at 26.5°N. *Science,* 2007, Vol. 317, pp. 935–938.

Daniault N., Mercier H., Lherminier P., Sarafanov A., Falina A., Zunino P., Pérez F.F., Ríos A. F., Ferron B., Huck T., Thierry V., and Gladyshev S. The northern North Atlantic Ocean mean circulation in the early 21st century. *Progress in Oceanography*, 2016, Vol. 146, pp. 142–158.

Dianskii N.A., Volodin E.N., and Gusev A.V. Vosproizvedenie sovremennogo klimata v sovmestnoi modeli obshchei tsirkulyatsii atmosfery i okeana (Reproduction of the modern climate in a joint model of the general circulation of the atmosphere and the ocean). *Izvestiya RAN, Fizika atmosfery i okeana*, 2010, Vol. 46, No. 4, pp. 448–466.

Diansky N.A. and Sukhonos P.A. Multidecadal Variability of Hydro-Thermodynamic Characteristics and Heat Fluxes in North Atlantic. *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes,* 2018, pp. 125–137.

Dickson R. and Boscolo R. The Arctic-Subarctic Ocean Flux Study (ASOF): Rationale, Scope and Methods. *CLIVAR Exchanges,* 2002, No. 25, pp. 1–2.

Dickson R.R., Meincke J., and Rhines P. Arctic Sub-Arctic Ocean fluxes: Defining the role of the Northern Seas in Climate. Springer, 2008, 734 p.

Hurrell J.W., Visbeck M., Busalacchi A., Clarke R.A., Delworth T.L., Dickson R.R., Johns W.E., Koltermann K.P., Kushnir Y., Marshall D., Mauritzen C., McCartney M.S., Piola A., Reason C., Reverdin G., Schott F., Sutton R., Wainer I., and Wright D. Atlantic climate variability and predictability: a CLIVAR perspective. *J. Climate,* 2006, Vol. 19, No. 24, pp. 5100–5121.

Kanzow T. and Zenk W. Structure and transport of the Iceland Scotland Overflow plume along the Reykjanes Ridge in the Iceland Basin. *Deep-Sea Research, part I,* 2014, Vol. 86, pp. 82–93.

Kanzow T.O., Cunningham S.A., Rayner D., Hirschi J.J.M., Johns W.E., Barringer M.O., Bryden H.L. Beal L.M., Meinen C.S., and Marotzke J. Flow compensation associated with the MOC at 26.5°N in the Atlantic. *Science*, 2007, Vol. 317, pp. 938–941.

Lavender K.L., Davis R.E., and Owens W.B. Mid-depth circulation observed in the interior Labrador and Irminger Seas by direct velocity measurements. *Nature*, 2000, Vol. 407, pp. 66–68.

Lavender K.L., Owens B.W., and Davis R.E. The mid-depth circulation of the subpolar North Atlantic Ocean as measured by subsurface floats. *Deep Sea Res. Part I,* 2005, Vol. 52, pp. 767–785.

Lozier M.S., Bacon S., Bower A.S., Cunningham S.A., Femke de Jong M., de Steur L., de Young B., Fischer J., Gary S.F., Greenan B.J.W., Heimbach P., Holliday N.P., Houpert L., Inall M.E., Johns W.E., Johnson H.L., Karstensen J., Li F., Lin X., Mackay N., Marshall D.P., Mercier H., Myers P.G., Pickart R.S., Pillar H.R., Straneo F., Thierry V., Weller R.A., Williams R.G., Wilson C., Yang J., Zhao J., and Zika J.D. Overturning in the Subpolar North Atlantic Program: A New International Ocean Observing System. *Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS),* 2017, Vol. 98, No. 4, pp. 737–752.

Lozier S., Send U., Kanzow T., Marotzke J., Rhein M., Garzoli S., Rintoul S., Sloyan B., Speich S., Talley L., Baehr J., Meinen.C, Treguier A.M., and Lherminier P. The Present and Future System for Measuring the Atlantic Meridional Overturning Circulation and Heat Transport. In: Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for

Society (Vol. 2). Venice, Italy. 21–25 Sept. 2009, Hall J., Harrison D.E., Stammer D., Eds., ESA Publication WPP–306, 2010, pp. 1–16.

Marchuk G.I., Kondrat'ev K.Ya., Kozoderov V.V., Sarkisyan A.S., and Khvorost'yanov V.I. Energoaktivnye zony: kontseptual'nye voprosy (Energy-active zones: conceptual issues). Itogi nauki i tekhniki. Ser. Atmosfera, Okean, Kosmos, programma Razrezy, 1989, Vol. 10, 240 p.

Marzocchi A., Hirschi J.J.M., Holliday N.P., Cunningham S.A., Blaker A.T., and Coward A.C. The North Atlantic subpolar circulation in an eddy-resolving global ocean model. *Journal of Marine Systems,* 2015, Vol. 142, pp. 126–143.

Mel'nikov V.A. Osobennosti raznomasshtabnykh variatsii v geofizicheskikh sploshnykh sredakh (Features of multi-scale variations in geophysical continuous media). *Protsessy v geosredakh,* Moskva: IPMekh. RAN, 2015, Vol. 2, No. 3, pp. 49–61.

Moshonkin S.N., Diansky N.A., and Gusev A.V. Influence of the interaction between the Atlantic and the Arctic Ocean on the Gulf Stream. *Oceanology*, 2007, Vol. 47, Part 2, pp. 178–190.

Nesterov E.S. Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i ocean (North Atlantic Oscillation: Atmosphere and Ocean), Moskva: Triada, 2013, 144 p.

Ott E. Chaos in dynamical systems. Cambridge University Press, 2002, 323 p.

Richardson P.L. On the history of meridional overturning circulation schematic diagrams. *Progress in Oceanography,* 2008, Vol. 76, pp. 466–486.

Sarafanov A., Falina A., Sokov A., Zapotylko V., and Gladyshev S. Ship-Based Monitoring of the Northern North Atlantic Ocean by the Shirshov Institute of Oceanology. The Main Results. The Ocean in Motion. Springer Oceanography, M.G. Velarde et al. (eds.), 2018, pp. 415–427.

Sarafanov A.A., Falina A.S., and Sokov A.V. Mnogoletnie izmeneniya kharakteristik itsirkulyatsiya glubinnykh vod na severe Atlanticheskogo okeana: rol' regional'nykh i vneshnikh faktorov (Perennial changes in characteristics and circulation of the deep waters of the North Atlantic Ocean: the role of regional and external factors). DAN, 2013, Vol. 450, No. 4, pp. 470–473.

Sarkisyan A.S. Krupnomasshtabnye okeanograficheskie eksperimenty (Large-scale oceanographic experiments). *Vestnik AN SSSR*, 1983, No. 10, pp. 83–89.

Seager R., Battisti D.S., Yin J., Gordon N., Naik N., Clement A.C., and Cane M.A. Is the Gulf Stream responsible for Europe's mild winters? *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,* 2002, Vol. 128(586), pp. 2563–2586.

Serreze M.C., Holland M.M., and Stroeve J. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover. *Science,* 2007, Vol. 315, pp. 1533–1536.

Smith W.H.F. and Sandwell D.T. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, 1997, Vol. 277, pp. 1957–1962.

Straneo F. and Heimbach P. North Atlantic warming and the retreat of Greenland's outlet glaciers. *Nature,* 2013, Vol. 504, pp. 36–43.

Sutton R.T., McCarthy G.D., Robson J., Sinha B., Archibald A.T., Gray L.J. Atlantic Multidecadal Variability and the U.K. ACSIS Program. *Bulletin of the American Meteorological Society,* 2018, Vol. 99(2), pp. 415–425.

Thompson B.J., Crease J., and Gould J. The Origins, Development and Conduct of WOCE. In: Ocean Circulation and Climate: Observing and Modelling the Global Ocean, edited by Siedler G., Church J., Gould J. International Geophysics Series. Academic Press, San Diego, 2001, Vol. 77, pp. 31–43.

Treguier A.M., Theetten S., Chassignet E.P., Penduff T., Smith R., Talley L., Beismann J.O., and Böning C. The North Atlantic subpolar gyre in four high-resolution models. *J. Phys. Oceanogr*, 2005, Vol. 35, pp. 757–774.

Vyazilova A.E., Alekseev G.V., and Smirnov A.V. Svyaz' termokhalinnykh anomalii v severo-zapadnoi Atlantike i Severo-evropeiskom basseine s kolebaniyami klimata (Connection of thermohaline anomalies in the northwestern Atlantic and North European Basin with climate fluctuations). *Problemy Arktiki i Antarktiki,* 2014, No. 3(101), pp. 48–61.

Yeager S.G., Karspeck A., Tribbia G., and Teng H. A decadal prediction case study: Late twentieth-century North Atlantic Ocean heat content. *J. Climate*, 2012, Vol. 25, pp. 5173–5189.

Zhao J., Bower A., Yang J., Lin X., and Holliday N.P. Meridional heat transport variability induced by mesoscale processes in the subpolar North Atlantic. *Nature Communications,* 2018, Vol. 91.

Zhao J., Bower A., Yang J., Lin X., and Zhou C. Structure and Formation of Anticyclonic Eddies in the Iceland Basin. *Journal of Geophysical Research: Oceans,* 2018, Vol. 123, pp. 1–19.