

РАСПРОСТРАНЕНИЕ АТЛАНТИЧЕСКИХ ВОДНЫХ МАСС В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

М.С. Махотин¹, В.В. Иванов^{1,2}

*¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург;*

*²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации
m-makhotin@mail.ru, vladimir.ivanov@aari.ru*

Введение

Баренцево море занимает особое место среди окраинных морей Северного Ледовитого океана (СЛО) благодаря его пограничному положению между Арктическим бассейном и Северной Атлантикой. В силу преобладающего направления зональных переносов в умеренных широтах Северного полушария – с запада на восток, Баренцево море оказывается на пути атмосферных вихрей и океанских течений, приносящих тепло и влагу/соль в Арктический бассейн и восточную Арктику. Благодаря этому Баренцево море представляет наиболее чувствительную часть СЛО, процессы в которой быстро реагируют на изменения, происходящие в умеренных широтах. С другой стороны, гидрологические и ледовые условия в Баренцевом море играют значимую роль в формировании обратных воздействий СЛО на Северную Атлантику и климат Евразийского континента [16, 18]. Крупномасштабная адвекция теплой и соленой воды из Северной Атлантики является основным внешним источником тепла и соли для СЛО [5]. Именно с возрастанием количества океанского тепла, поступающего из умеренных широт, связывают существенное сокращение зимней площади льда в Баренцевом море, наблюдаемое в последнее десятилетие [7].

Несмотря на то, что по общему количеству выполненных в разные годы инструментальных наблюдений Баренцево море можно отнести к наиболее изученным морям не только СЛО, но и Мирового океана, покрытие акватории наблюдениями весьма неравномерно. Большая часть экспедиционных исследований приходится на западную и центральную часть моря, что связано с очевидной причиной отсутствия в этих районах ледяного покрова в течение большей части года или круглогодично. С другой стороны, как будет показано в следующем разделе, теоретический и практический интерес представляют процессы в северной и северо-восточной частях моря, поскольку именно там происходит формирование новых водных масс, которые в дальнейшем выносятся в Арктический бассейн, воздействуя на ледовые условия, термохалинную и гидрохимическую структуру вод и их биопродуктивность.

Резкие и быстрые изменения состояния ледяного покрова в Баренцевом море, произошедшие в последнее десятилетие, дополнительно повысили интерес к нему не только со стороны ученых, но и со стороны государственных и коммерческих структур. Прикладным аспектом аномального сокращения площади ледяного покрова является реальная возможность интенсификации различных видов хозяйственной деятельности, включая коммерческое мореплавание, рыболовство, разведку и добычу полезных ископаемых и др. Принимая во внимание, что бесконтрольное освоение особо уязвимых с точки зрения экологии северных территорий чрезвычайно опасно, роль государства как регулятора хозяйственной и социально-экономической деятельности неизбежно должна возрасти. Последнее потребует надежных оценок состояния среды и прогноза возможных будущих изменений с различной заблаговременностью. Применительно к океанским процессам эту задачу призвана решать оперативная океанография – активно развивающийся раздел океанологии с явно выраженной прикладной составляющей. Основным методическим подходом в этой дисциплине является применение различных комплементарных методов анализа данных наблюдений и результатов численного моделирования [например, 17].

В предлагаемой статье исследуется применимость численного моделирования с высоким пространственным разрешением для диагноза термохалинной структуры вод в Баренцевом море с особым акцентом на сложный в динамическом отношении район северо-восточной части моря. Краткое описание известных сведений о распространении и трансформации атлантических вод в Баренцевом море представлено в следующем разделе. Выполненные летом 2012, 2013 и 2014 гг. подробные гидрологические съемки, описанные в разделе 2, позволили достаточно детально проследить взаимодействие двух ветвей атлантической воды за три последовательных года (раздел 3). Анализ результатов модельной реконструкции термохалинной структуры вод в зоне активного взаимодействия двух ветвей атлантической воды представлен в разделе 4. Обсуждение результатов и основные выводы завершают статью.

1. Роль атлантической воды в формировании гидрологического режима северо-восточной части Баренцева моря

Чтобы лучше понять, каким образом поступающие из Северной Атлантики воды влияют на гидрологический режим северо-восточной части Баренцева моря, необходимо кратко описать их трансформацию на пути к исследуемому району. После пересечения Фареро-Исландского порога продолжение Северо-Атлантического течения – Норвежское течение следует на северо-северо-восток вдоль берегов Норвегии. В северо-западной части Норвежского моря поток разделяется на Западно-Шпицбергенское течение, втекающее в Арктический бассейн через пролив Фрама, и Нордкапское течение, втекающее в Баренцево море между о. Медвежий и Скандинавским п-вом (рис. 1).

В прикомочных ледовых зонах к северу и северо-востоку от Шпицбергена контактирующая с поверхностью часть атлантической воды (АВ) охлаждается и распределяется в процессе взаимодействия с атмосферой и ледяным покровом [2]. В итоге верхняя часть АВ теряет свою идентичность, трансформируясь в поверхностную Арктическую водную массу с отрицательной температурой и пониженной соленостью [22]. Сохранившая положительную температуру и высокую соленость глубинная часть АВ, которую

принято называть фрамовской ветвью атлантической воды (ФАВ), вместе с трансформированным верхним слоем переносятся пограничным течением в генеральном направлении на восток вдоль континентального склона Евразии.

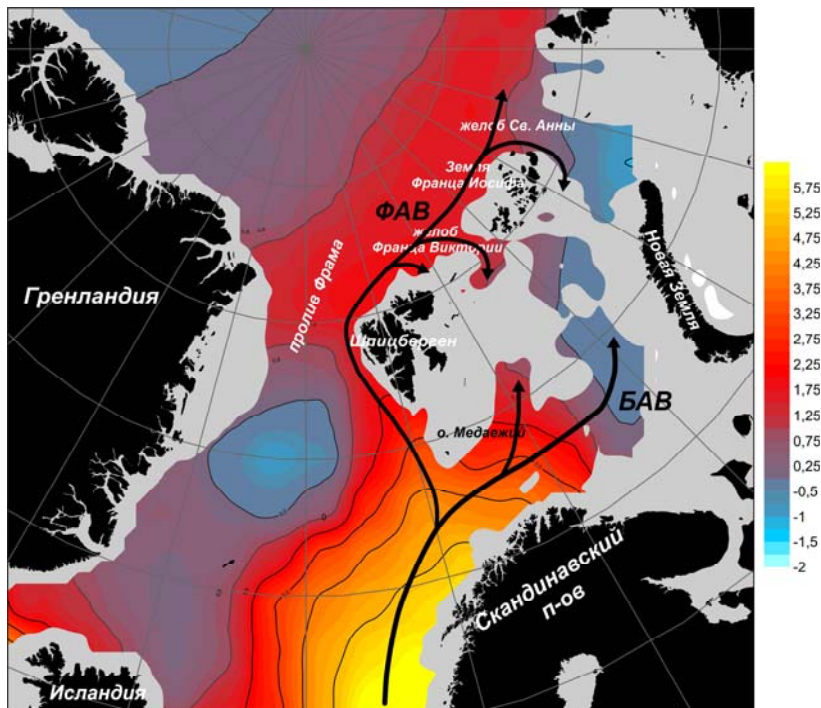


Рис. 1. Распределение температуры воды (°C) на глубине 250 м в зимний сезон (EWG, 1997). Схема распространения атлантической воды показана черными стрелками.

Вследствие фундаментальных законов геофизической гидродинамики, отдельные струи течения, следуя неоднородностям рельефа дна, распространяются по циклонической траектории вдоль периметра глубоководных каньонов, пересекающих континентальный склон. Частично эти воды достигают Баренцева моря, поступая в него с севера через желоба Виктория и Франц-Виктория, расположенные между архипелагами Шпицберген и Земля

Франца-Иосифа (ЗФИ) [14], и с северо-востока через желоб Святой Анны в северной части Карского моря и пролив между ЗФИ и Новой Землей [23].

Атлантическая вода, поступающая с Нордкапским течением в Баренцево море, так называемая баренцевоморская атлантическая вода (БАВ), сильно охлаждается по всей толще в зимний сезон. Это объясняется тем, что в сравнительно мелком Баренцевом море (средняя глубина 230 м) зимняя конвекция часто достигает дна, следствием чего является интенсивная теплоотдача в атмосферу и низкая ледовитость моря [7, 8]. Основной сток БАВ из Баренцева в Карское море происходит через пролив между архипелагами Новая Земля и ЗФИ. В Карском море БАВ переносится на север вдоль восточного склона желоба Святой Анны, откуда попадает в Арктический бассейн [3].

В зонах контакта ФАВ и БАВ в северной и в северо-восточной частях Баренцева моря происходит интенсивное перемешивание и формирование новых водных масс, часть из которых впоследствии попадает в Арктический бассейн. В частности, это относится к недавно выделенным в отдельную водную массу шельфовым атлантическим водам (ШАВ) [6]. Образование ШАВ происходит в прикромочной ледовой зоне, расположенной в летний сезон в северной части Баренцева моря, где верхняя часть поступающей с юга атлантической воды охлаждается и распресняется, образуя тонкий квазиоднородный слой. Зимняя конвекция углубляет этот слой, однако малая (вследствие пониженной солености) плотность у поверхности препятствует проникновению конвекции ниже подстилающего слоя ФАВ. В результате формируется охлажденная и распресненная водная масса, охватывающая диапазон глубин от поверхности до 50–100 м [20]. Направленное на восток течение, обусловленное преобладающим ветровым режимом и особенностями донной топографии, выносит ШАВ через пролив между архипелагами Земля Франца Иосифа и Новая Земля. В Карском море ШАВ движется вдоль восточного склона желоба Святой Анны, стекает в котловину Нансена и, опустившись до уровня эквивалентной плотности (150–250 м), переносится пограничным течением в генеральном восточном направлении. Взаимодействие

БАВ с холодными уплотненными водами, продуцируемыми зимой на мелководных банках и западном шельфе Новой Земли [11], формирует донные воды Баренцева моря. Предполагается, что в зависимости от внешних условий (атмосферный форсинг, сплоченность льда, термохалинные параметры БАВ) плотность донных вод Баренцева моря может достигать экстремальных значений, превышающих плотность глубинных вод Арктического бассейна. Благодаря этому донные воды, формирующиеся в Баренцевом море, после прохождения желоба Святой Анны способны опуститься вдоль континентального склона на большую глубину, вентилируя глубинную структурную зону Арктического бассейна [12, 21].

2. Методы исследования и исходные данные

Для исследования распространения и трансформации атлантических вод по натурным данным использовались выполненные в ходе комплексных экспедиций по проекту «Арктический плавучий университет» в июне-июле 2012–2014 гг. на НИС «Профессор Молчанов» вертикальные измерения температуры и электропроводности (солености) толщи морской воды на океанографических станциях вдоль выбранных для исследования разрезов. Измерения производились при нахождении судна в дрейфе с помощью STD-зондов SBE 19plus производства компании SeaBird Electronics Inc. (США). Все зонды на момент выполнения измерений имели действующие поверочные сертификаты. Точность измерений электропроводности и температуры составили 0,0005 См/м и 0,005 °С соответственно. Расположение океанографических разрезов и станций, на которых выполнялось вертикальное зондирование, показано на рис. 2.

Модельные реконструкции термохалинной структуры вод для лета 2012 г. были выполнены с использованием результатов расчета на численной модели MITgcm (Massachusetts Institute of Technology general circulation model) с пространственным разрешением 4 км [26]. Краткое описание технологии численных экспериментов приведено в статье Е.В. Блошкиной и В.В. Иванова в настоящем сборнике. Результаты сравнения средних распределе-

ний температуры и солености по всему СЛО, рассчитанных по натурным данным и результатам моделирования на MITgcm, приведены в [1].

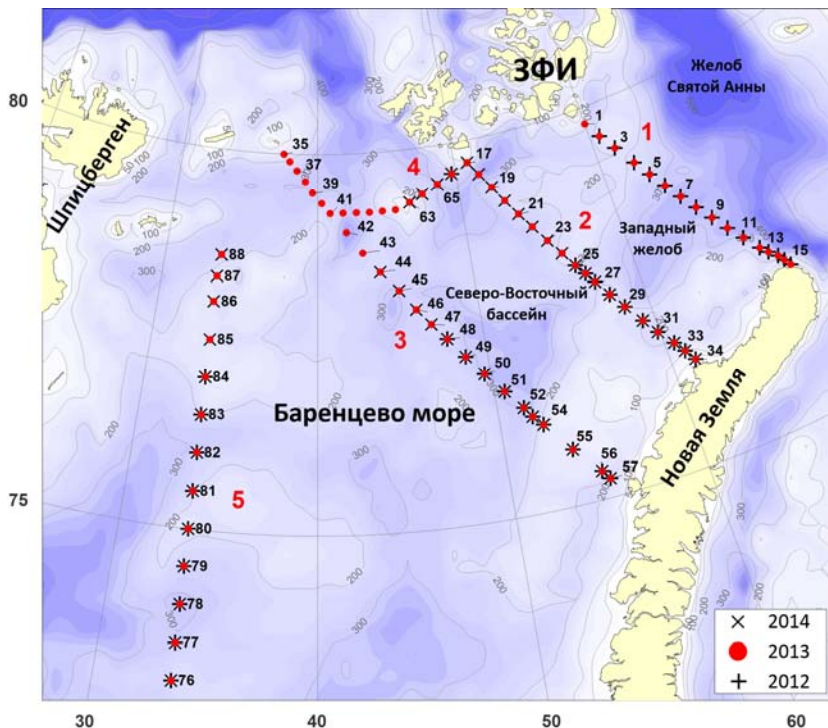


Рис. 2. Расположение океанографических станций и разрезов, выполненных в июне-июле 2012, 2013 и 2014 гг. Красными цифрами показаны номера разрезов, черными – номера океанографических станций.

Для количественной оценки трансформации движущихся водных масс применялся традиционный метод TS-анализа [4]. Несмотря на свою простоту, этот метод позволяет надежно определять изменение параметров вод по измерениям на последовательных океанографических разрезах.

3. Распространение атлантических вод по данным наблюдений

Атлантическая водная масса входит на акваторию Баренцева моря с запада несколькими струями Нордкапского течения (разрез № 5 «Кольский меридиан», рис. 3). Температура воды максимальна в ядре самой южной струи и постепенно уменьшается к северу. Наибольшие значения температуры в ядрах восточного переноса на глубинах от 50 до 300 м наблюдались в 2012 г. и составили 5,4 °С (июнь) (в 2013 и 2014 гг. в аналогичный период – 5,0 и 5,1 °С соответственно).

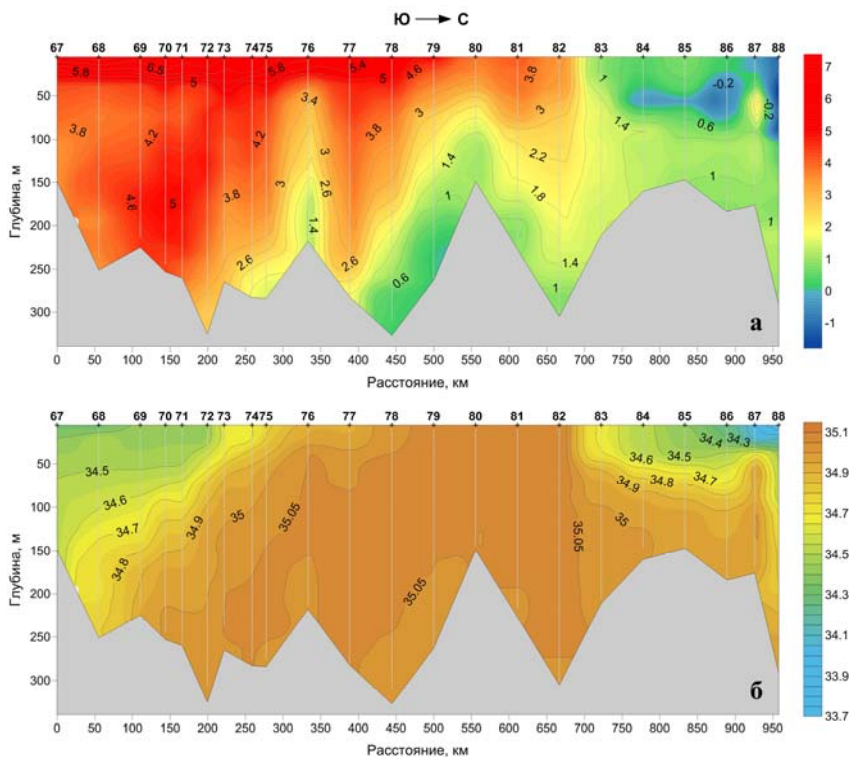


Рис. 3. Распределение температуры (°С) (а) и солёности (PSU) (б) на разрезе № 5 «Кольский меридиан» в июне 2013 г.

На поверхности в результате интенсивного радиационного прогрева наибольшие значения температуры воды с соленостью более 34,7 PSU достигли в 2013 г. и составили 6,5 °С. Максимальные значения солености воды (35,05 PSU) наблюдаются в центральной части разреза и сохраняются по всей водной толще от поверхности до дна.

По мере движения через Баренцево моря в восточном и северо-восточном направлении БАВ расходует до 88 % своего исходного теплосодержания на теплоотдачу в атмосферу, плавление льда и перемешивание с окружающими более холодными водами [24]. Интенсивной теплоотдаче в атмосферу, в частности, способствует малая скорость адвективного переноса, около 4–5 см/с [24]. Благодаря этому время транзита БАВ через Баренцево море превышает 1 год и вся поступающая с запада вода «зимует» на акватории моря, когда турбулентный теплообмен с атмосферой достигает экстремальных значений – 500–600 Вт/м² [8]. В результате в северо-восточной части Баренцева моря на границе с Карским морем температура БАВ оказывается близкой к нулю или слабо отрицательной. На разрезе № 1 БАВ залегает в юго-восточной части со стороны Новой Земли и характеризуется значениями (2013 г.) температуры от -0,2 до 0 °С и солености 34,95 PSU в ядре водной массы (рис. 4).

Часть потока ФАВ, проникающей в желоб Святой Анны, вдоль западного склона желоба проникает в Баренцево море [9, 15, 24]. Эта водная масса выделяется в центральной части разреза № 1 (ЗФИ – мыс Желания, Новая Земля) максимальной температурой +1,4 °С (2013 г.) на глубине около 125–130 м. Следует отметить, что соленость ядра ФАВ (34,8–34,85 PSU), втекающей в Баренцево море из желоба Святой Анны, меньше солености в придонном слое у побережья Новой Земли на станциях 13–15 (34,9–34,95 PSU), где распространяются уже остывшие и трансформированные БАВ.

В [13] на основе океанографических данных 2008 г. было предположено, что ФАВ, втекающая в Баренцево море из желоба Святой Анны, распространяется только в пределах Западного желоба, после чего, описав траекторию незамкнутого циклонического круговорота, возвращается в желоб Святой Анны.

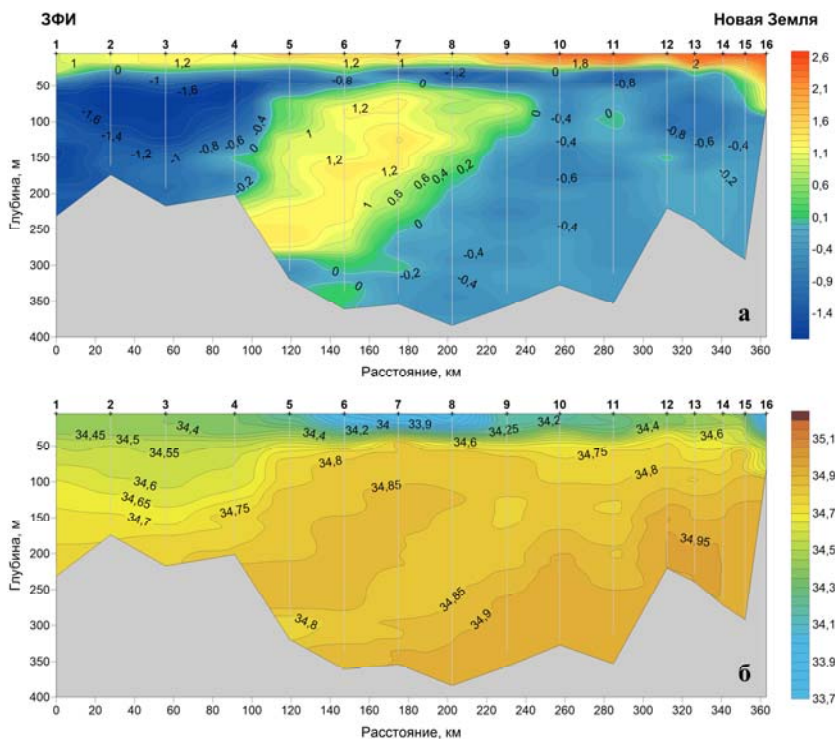


Рис. 4. Распределение температуры (°С) (а) и солёности (PSU) (б) на разрезе № 1 в июне 2013 г.

Следы такого возвратного потока прослеживаются по локальному максимуму температуры воды на станции 11 на глубине 100 м. Однако по данным съёмок 2012 и 2013 гг. ФАВ была также обнаружена на разрезе № 2, находящемся на границе Западного желоба и Северо-Восточного бассейна Баренцева моря между архипелагами ЗФИ (мыс Флора) и Новая Земля (Русская Гавань) (рис. 5).

Со стороны Новой Земли в юго-восточной части разрезазалегают два ядра БАВ (станции 28–30 и 32 соответственно) со значениями температуры в ядре на глубине 70–120 м, достигающей 0,7 °С, и солёности, превышающей 34,95 PSU.

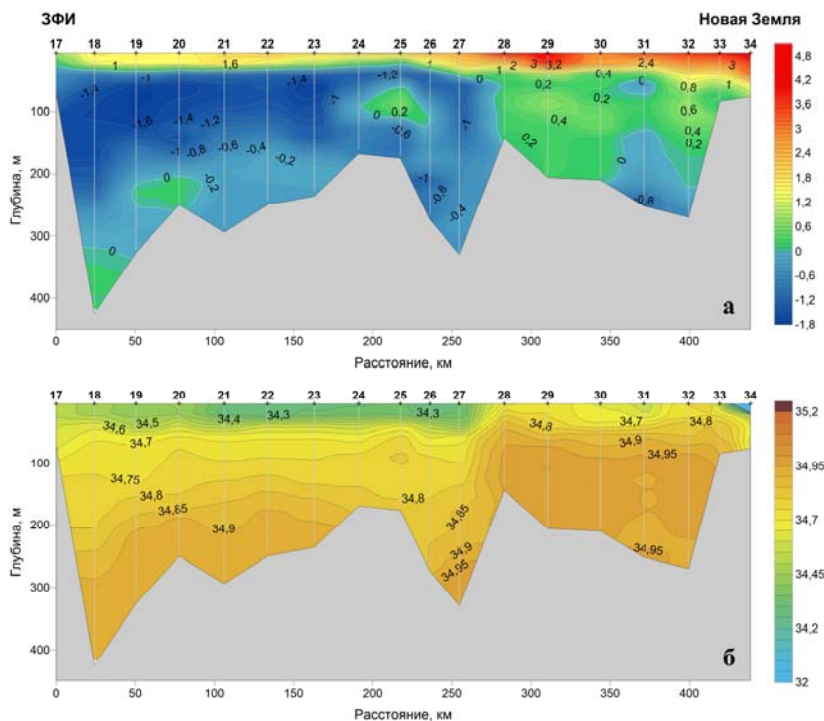


Рис. 5. Распределение температуры (°C) (а) и солёности (PSU) (б) на разрезе № 2 в июне 2013 г.

Оба ядра характеризуются значениями относительного содержания растворенного в воде кислорода, превышающими 92 %. В районе станции № 25 на глубине 60–110 м выделяется теплая струя вод с максимальной температурой 0,5 °C (2013 г.), солёностью в диапазоне 34,75–34,8 PSU и относительным содержанием растворенного кислорода 84–85 %. Термохалинные характеристики данной струи отличаются от характеристик БАВ в юго-восточной части разреза и близки к характеристикам ФАВ, зафиксированной в центральной части разреза № 1. Приведенные доводы позволяют утверждать, что атлантические воды, обнаруженные в центральной части разреза № 2, относятся к ФАВ, пришедшей в данный район из желоба Святой Анны. По мере продвижения

в юго-западном направлении от разреза № 1 к разрезу № 2 ФАВ теряет тепло и охлаждается на $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (от $1,4$ до $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) (2013 г.). Следует отметить, что на разрезе № 2 не наблюдается возвратного потока ФАВ в сторону желоба Святой Анны. Этот факт может быть объяснен двумя причинами. Либо струя ФАВ, пересекающая разрез № 2 в районе станции № 25, не рециркулирует в сторону желоба Святой Анны, либо к юго-западу от этого разреза ФАВ полностью теряет свою идентичность в результате перемешивания с окружающими водными массами, что делает невозможным ее дальнейшее выделение в поле термохалинных характеристик. В любом случае поступившая в Баренцево море из желоба Святой Анны ФАВ, пройдя Западный желоб и разрез № 2, проникает и распространяется как минимум в Северо-Восточном бассейне Баренцева моря. В 2012 г. температура в ядре ФАВ на станции 25 разреза № 2 достигла $+0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда как в 2014 г. она была отрицательной ($-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$), т. е. по формальным признакам эта водная масса в 2014 г. не могла быть отнесена к атлантической воде. Можно предположить, что именно по этой причине авторы [13] не смогли идентифицировать дальнейшее продвижение ФАВ в Северо-Восточном бассейне Баренцева моря по данным 2008 г. В северо-западной части разреза № 2 на станциях 18–20 на глубинах от 170 м наблюдаются воды ФАВ, затекающие в Баренцево море с севера через желоб Франц-Виктория (см. предыдущий раздел). Эти воды уже сильно перемешаны с окружающими и характеризуются близкими к нулю положительными температурами ($0\text{--}0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) и относительным содержанием растворенного кислорода менее 79 %.

Одной из основных целей экспедиционных исследований было установление путей распространения ФАВ к западу и к югу от Западного желоба. На разрезе № 3, пересекающем практически всю акваторию Баренцева моря от о. Виктория (на севере) до п-ва Адмиралтейства арх. Новая Земля (на юге), следов поступления ФАВ со стороны желоба Святой Анны, обнаружено не было (рис. 6).

В южной части разреза № 3 со стороны Новой Земли на станции 54 выделяется ядро БАВ с максимальной температурой поверхности ($1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$). Значения солености превышают $34,95\text{ PSU}$.

Со стороны Новой Земли атлантические воды граничат с плотными и холодными, близкими к температуре замерзания, водами, образующимися в осенне-зимний период в результате процессов ледообразования [11]. С северной стороны от теплого и соленого ядра БАВ большая часть площади разреза занята холодными водами с температурой ниже нуля.

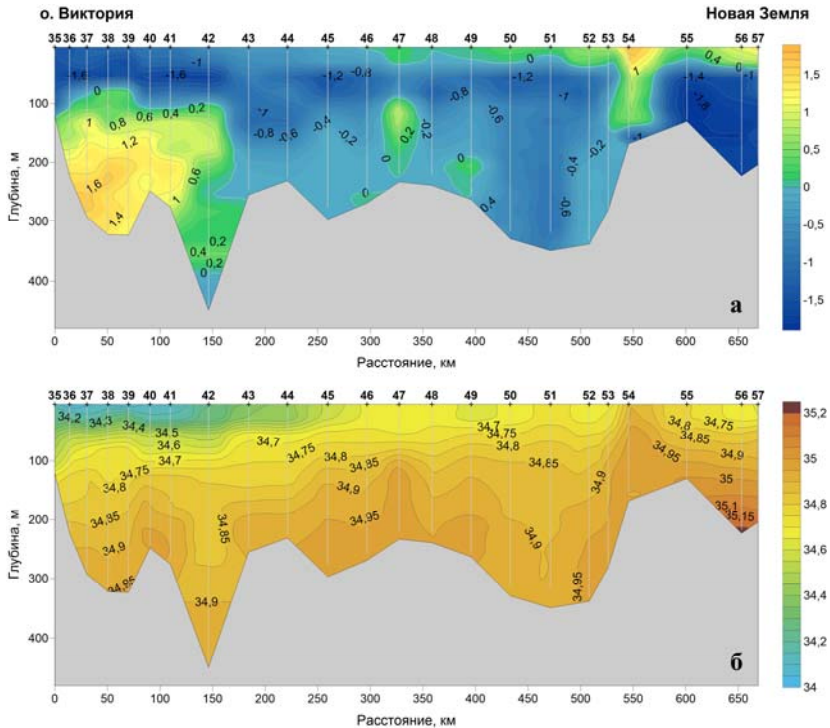


Рис. 6. Распределение температуры (°С) (а) и солёности (PSU) (б) на разрезе № 3 в июне 2013 г.

По данным 2012 г., в районе станции 48 в глубинном слое была обнаружена струя теплых вод с максимальной температурой 1,2 °С. По данным 2013 г., также наблюдается локальный температурный максимум в глубинном слое на станции № 47, но меньшей интенсивности (0,9 °С). Ядро этой водной массы с солёностью 34,98 PSU находилось в 2013 г. на глубине 120 м. Особенностью

рассматриваемой теплой струи является также высокое, по сравнению с окружающими водами, относительное содержание растворенного кислорода (95 %). Повышенные значения солености при сравнительно высокой температуре, а также высокое относительное содержание растворенного кислорода на станции 47 разреза № 3 дают достаточные основания для отнесения этой водной массы к БАВ, пришедшей в центральный район Баренцева моря с запада с Нордкапским течением.

Дополнительным аргументом в пользу такого вывода является то, что схожая струя вод с высоким относительным содержанием растворенного кислорода была обнаружена в центральной части разреза № 5 «Кольский меридиан» на станции 81. В северной части разреза № 3 на глубинах более 100 м залегают ФАВ, поступающие на акваторию Баренцева моря с севера по глубоководным желобам, расположенным между архипелагами Шпицберген и Земля Франца-Иосифа [14]. Следует добавить, что небольшое количество БАВ проникает на север Баренцева моря с запада. В результате интенсивной теплоотдачи в атмосферу этот поток АВ обладает невысокими температурами (от 0 до 0,5 °С) и залегают под более теплыми ФАВ, пришедшими с севера [19]. Данный поток БАВ был обнаружен в северной части разреза № 3 в районе станции 40 на глубине 220–260 м.

В результате выполненного анализа данных натуральных наблюдений было установлено, что ФАВ, поступающая в Баренцево море из желоба Святой Анны, пересекает Западный желоб и проникает в Северо-Восточный бассейн. Поскольку в центральной части Баренцева моря (на разрезе № 3) поток ФАВ с северо-востока не выявляется, можно предположить его поворот к северу вдоль неоднородностей донной топографии. Распределения температуры и солености на разрезе № 4, выполненном в 2013 г. в северной части Баренцева моря подтверждают такой вывод: на горизонте 80–90 м присутствует локальный максимум температуры (0–0,2 °С) с соленостью, немногим превышающей 34,75 PSU (рис. 7). Эта относительно теплая прослойка вод лежит на той же изопикнической поверхности, что и ФАВ, поступившая в Баренцево море из желоба Святой Анны, и вероятно относится к этой же водной массе.

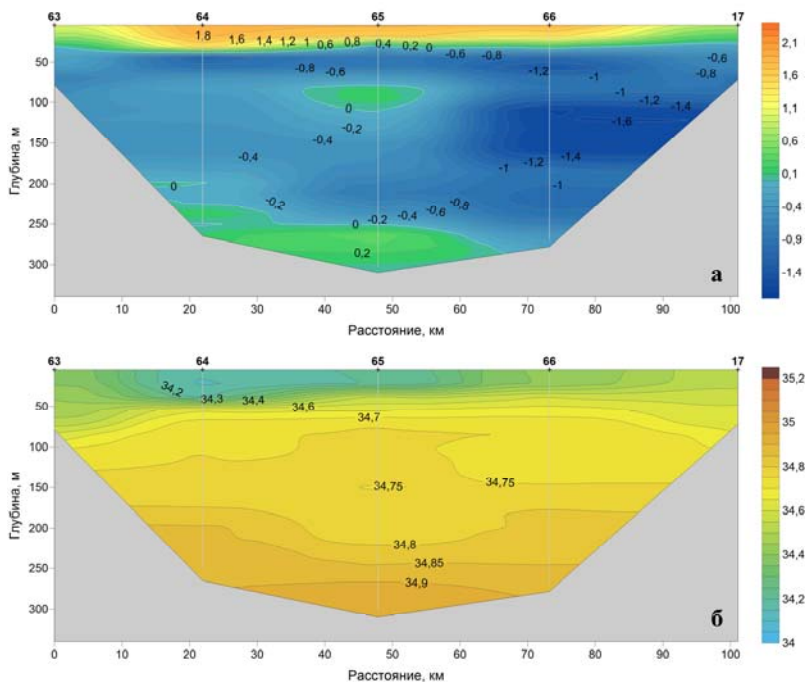


Рис. 7. Распределение температуры (°C) (а) и солёности (PSU) (б) на разрезе № 4 в июне 2013 г.

На рис. 8 представлена TS-диаграмма, демонстрирующая эволюцию характеристик ФАВ и БАВ в северо-восточной части Баренцева моря. На основе этой диаграммы и предшествующего анализа термохалинных характеристик вод на последовательных гидрологических разрезах была построена схема движения атлантических вод в исследуемом районе (рис. 9). Двигаясь вдоль желоба Святой Анны на юг, часть потока ФАВ затекает в Западный желоб Баренцева моря и в дальнейшем может проникать в Северо-Восточный бассейн в сильно трансформированном состоянии. Проникшая на акваторию Баренцева моря ФАВ из желоба Святой Анны, вероятнее всего смешивается с поступающими с севера через желоб Франц-Виктория более теплыми и солёными ФАВ, охлаждая и распресняя возвратный поток этих вод в котловину Нансена.

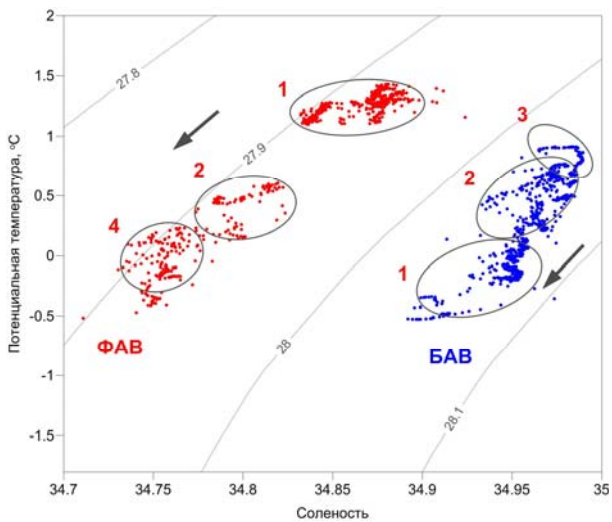


Рис. 8. TS-диаграмма, иллюстрирующая трансформацию ФАВ и БАВ на последовательных разрезах.

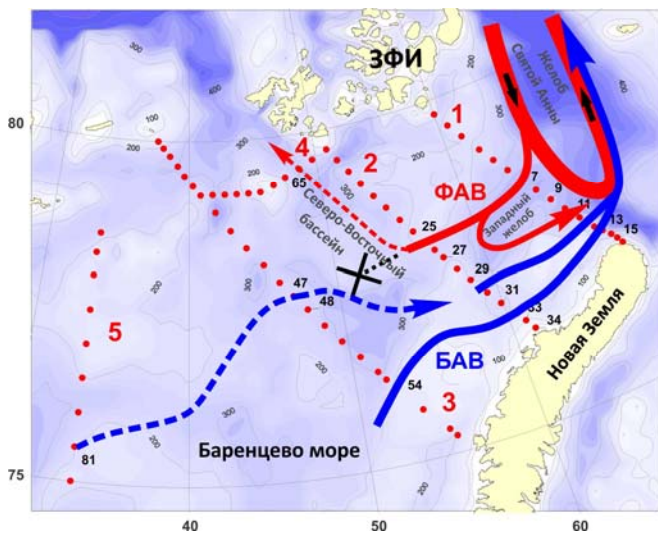


Рис. 9. Схема циркуляции АВ в северо-восточной части Баренцева моря.

4. Реконструкция термохалинных полей Баренцева моря по результатам моделирования

Результаты реконструкции термохалинных полей Баренцева моря на модели MITgcm проиллюстрированы картами распределения температуры и солёности на уровне максимума расчётной температуры в слое с солёностью более 34,7 PSU в июне 2012 г. (рис. 10). Первое, что обращает на себя внимание, это положительный сдвиг температуры в среднем на 2 °C по сравнению с данными наблюдений. Максимальные расчётные значения солёности в модели, наоборот, оказались меньше, чем наблюдаемые. В частности, на границе Баренцева и Норвежского морей максимальная расчётная солёность не превышает 34,85 PSU, тогда как измеренные значения были более 35 PSU. Принимая во внимание, что 2012 год – первый в ряду анализируемых натуральных данных, сравнивается с завершающим годом модельного эксперимента, можно предположить, что подобное сравнение является в известном смысле максимально «жестким» для модели. Как известно, в любом модельном эксперименте отклонение расчётных результатов от данных наблюдений возрастает с увеличением продолжительности расчёта, если в модели не применяются специальные техники, искусственно «притягивающие» решение к климатической норме [10]. Поэтому можно ожидать, что в краткосрочных численных экспериментах, которые актуальны для решения задач оперативной океанографии, согласованность наблюдаемых и расчётных величин окажется более удовлетворительной. Общая структура циркуляции атлантической воды, проявляющаяся в распределениях температуры и солёности, воспроизведена в модели достаточно адекватно существующим представлениям, включая разделение Норвежского течения на Западно-Шпицбергенское и Нордкапское течения, траектории переноса отдельных ветвей и трансформацию вод. Быстрое охлаждение БАВ без заметного изменения солёности происходит у западного побережья Новой Земли, что связано формированием в этом районе холодных и солёных шельфовых вод, стекающих вдоль уклонов рельефа дна и смешивающихся с БАВ. Поскольку солёность шельфовых вод способна достигать экстремально высоких значений, благодаря интенсивному выделению рассола при многократном ледообразовании продукт

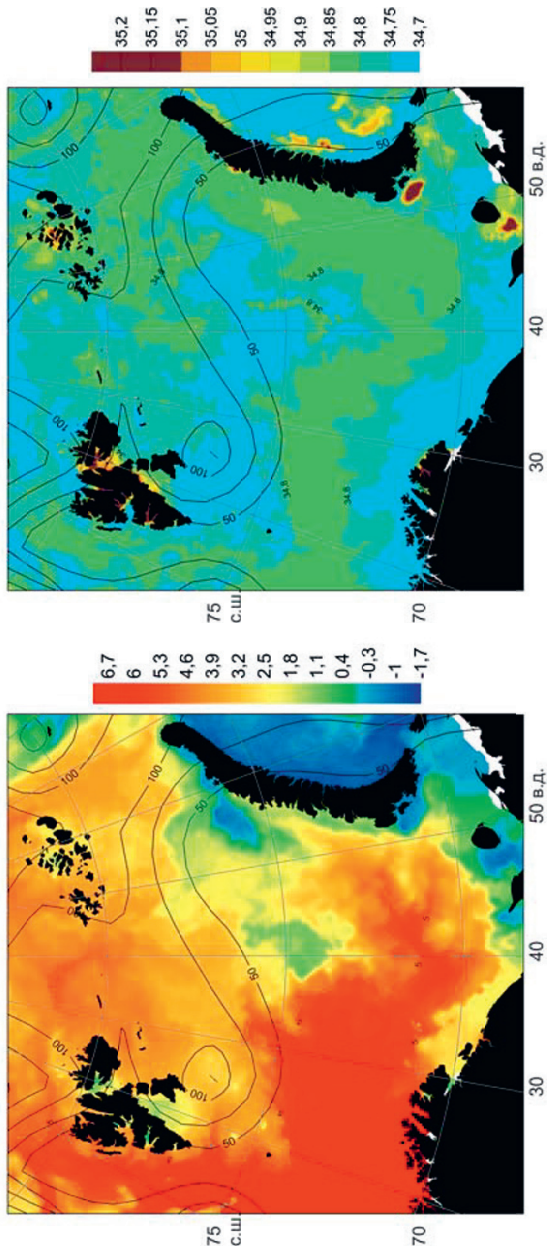


Рис. 10. Среднее модельное распределение термоалинных характеристик на уровне максимальной температуры воды в слое с соленностью более 34,7 PSU за период 13–20 июня 2012 г.: температура (°C) (а); соленность (PSU) (б). Глубина залегания слоя максимальной температуры воды показана изогинсами.

смешения шельфовых вод с БАВ может приобретать соленость, превышающую исходную соленость БАВ [25]. Судя по всему, модель успешно воспроизводит вызванную ледообразованием шельфовую конвекцию, о чем свидетельствуют локальные пятна холодных и высокосолёных вод, наблюдаемые в мелководных заливах и бухтах от о. Колгуев на юге до ЗФИ и Шпицбергена – на севере. Здесь следует отметить, что покрыть мелководные прибрежные районы стандартными судовыми наблюдениями крайне проблематично, что делает модельный расчет основным источником информации о происходящих там процессах.

Разделительная зона между поступающими с запада БАВ и вторгающимися с севера и северо-востока ФАВ хорошо выделяется по локализованному минимуму температуры и солености, вытянутому от 75° с. ш., 40° в. д. на северо-восток. Северная граница этой зоны совпадает с резким заглублением слоя температурного максимума от 50 до 100 м. Модельные распределения термохалинных характеристик вокруг ЗФИ явно указывают на доминирование ФАВ в этом районе, т. е. подтверждают схему циркуляции, реконструированной на основе данных наблюдений (см. рис. 9). Несмотря на достаточно высокое пространственное разрешение, мезомасштабная структура переноса атлантических вод, характеризующаяся дроблением потока на отдельные струи (см. напр. рис. 3), моделью не воспроизводится. Как уже отмечалось выше, такого рода детализация в модельных расчетах, вероятно, возможна, но на более коротких интервалах расчета и/или с использованием методов ассимиляции данных.

Обсуждение и выводы

Совместный анализ результатов наблюдений на гидрологических разрезах и модельных реконструкций термохалинной структуры вод Баренцева моря позволил подтвердить известные особенности динамики атлантических вод и уточнить характер циркуляции и взаимодействия БАВ и ФАВ в малоизученном северо-восточном районе моря. Установлено, что наиболее быстрое охлаждение поступающей с Нордкапским течением БАВ происходит вдоль западного побережья Новой Земли, где атланти-

ческая вода смешивается с холодными плотными водами, образующимися на мелководном шельфе Новой Земли в зимний сезон. Трансформация БАВ в открытой части моря обусловлена зимними конвективными процессами и горизонтальным перемешиванием с поступающими с севера и северо-востока арктическими водами. Согласно результатам моделирования, ареал распространения ФАВ в северо-восточной части Баренцева моря охватывает всю северо-восточную часть моря от пролива между архипелагами ЗФИ и Новая Земля на востоке до Шпицбергена на западе. Граница распространения этой водной массы на юге проходит примерно по 77° с. ш. Данные наблюдений подтверждают проникновение ФАВ, поступившей со стороны желоба Святой Анны, в Северо-Восточный бассейн Баренцева моря и ее возможное дальнейшее распространение в северном направлении. В центральной части моря проникновение ФАВ с севера через желоба Виктория и Франц Виктория документировано в данных наблюдений (на разрезе № 3) примерно до широты 78° с. ш.

В целом следует признать, что несмотря на сдвиги расчетных значений температуры и солености по сравнению с наблюдаемыми в среднем на $+2^{\circ}\text{C}$ и $0,2$ PSU соответственно, на модели удалось воспроизвести основные черты наблюдаемой термохалинной структуры. Несомненным достоинством модели следует признать возможность проследить трансформацию водных масс, локализовать ее в пространстве и выявить механизмы, ответственные за трансформацию (например, шельфовая конвекция вдоль западного побережья Новой Земли). Соответствие результатов такого анализа выводам, получаемым при использовании традиционного TS-анализа, повышают общую достоверность сформулированных заключений.

Данное исследование выполнено в соответствии с рабочим планом гранта РФФИ 14–05–00039. Подготовка материалов к публикации поддержана грантом РФФИ 14–37–00053. Авторы благодарны организаторам экспедиций по проекту «Арктический плавающий университет» в Северном (Арктическом) федеральном университете им. М.В. Ломоносова и Северном УГМС за возможность принять участие в проекте и экипажу НИС «Профессор Молчанов»

за обеспечение дружеской рабочей обстановки в экспедициях. Авторы выражают признательность Денису Волкову за предоставленную возможность использовать результаты его расчетов и полезные обсуждения особенностей модели и полученных в статье результатов.

Список использованных источников

1. *Блошкина Е.В., Махотин М.С., Волков Д.Л., Колдунов Н.В.* Сравнение распределения термохалинных характеристик в Северном Ледовитом океане по данным измерений и по результатам расчета региональной конфигурации модели MITgcm // Ученые записки РГГМУ. (принято в печать, 2016 г.)

2. *Иванов В.В., Алексеев В.А., Репина И.А.* Возрастание воздействия атлантических вод на ледяной покров Северного Ледовитого океана // Турбулентность, динамика атмосферы и климата: Труды международной конференции памяти академика А.М.Обухова. – М.: ГЕОС, 2014. – С. 267–273.

3. *Кириллов С.А., Дмитренко И.А., Иванов В.В., Аксенов Е.О., Махотин М.С., дэ Куэвас Б.Э.* Влияние атмосферной циркуляции на динамику промежуточного слоя вод восточной части глубоководного желоба Святой Анны // Доклады Академии Наук. – 2012. – Т. 444, № 2. – С. 212–215.

4. *Мамаев О.И.* Термохалинный анализ вод Мирового океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 296 с.

5. *Тимофеев В.Т.* Водные массы Арктического бассейна. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 190 с.

6. *Aksenov Y.O., Ivanov V.V., Nurser A.J.G., Bacon S., Polyakov I.V., Coward A.C., Naveira-Garabato A.C., Beszczynska-Moeller A.* The Arctic Circumpolar Boundary Current // J. Geophys. Res. – 2011. – Vol. 116. – C09017. – P. 1–28.

7. *Årthun, M.A., Eldevik T., Smedsdrud L.H., Skagseth O., Ingvaldsen R.B.* Quantifying the influence of Atlantic heat on the Barents Sea ice variability and retreat // J. Clim. – 2012. – Vol. 25. – P. 4736–4743.

8. *Hakkinen S., Cavalieri D.J.* A study of ocean surface heat fluxes in the Greenland, Norwegian and Barents Seas // J. Geophys. Res. – 1989. – Vol. 94. – C5. – P. 6145–6157.

9. *Hanzlick D., Aagaard K.* Freshwater and Atlantic water in the Kara Sea // J. Geophys. Res. – 1980. – 85(C9). – P. 4937–4942.

10. He Z., Thompson K. R., Ritchie H., Lu Y., Dupont F. Reducing Drift and Bias of a Global Ocean Model by Frequency-Dependent Nudging // Atmosphere-Ocean. – 2014. – Vol. 52, Issue 3. – P. 242–255.
11. Ivanov V.V., Shapiro G.I. Formation of dense water cascade in the marginal ice zone in the Barents Sea // Deep Sea Research I. – 2005. – Vol. 52. – P. 1699–1717.
12. Ivanov V.V., Shapiro G.I., Huthnance J.M., Aleynik D.M., Golovin P.N. Cascades of dense water around the World Ocean // Progress in Oceanography. – 2004. – Vol. 60. – P. 47–98.
13. Lien V., Trofimov A.G. Formation of Barents Sea Branch Water in the north-eastern Barents Sea // Polar Res. – 2013. – Vol. 32. – P. 18905.
14. Lind S., Ingvaldsen R.B. Variability and impacts of Atlantic Water entering the Barents Sea from the north // Deep Sea Res. – 2012. – Vol. 62. – P. 70–88.
15. Loeng H., Ozhigin V., Ardlandsvik B. Water fluxes through the Barents Sea // ICES J. Mar. Sci. – 1997. – Vol. 54. – P. 310–317.
16. Luo D., Xiao Y., Yao Y., Dai A., Simmonds I., Franzke C. Impact of Ural blocking on winter warm Arctic–cold Eurasian anomalies. Part I: Blocking-induced amplification // J. Climate. 2016. – Vol. 29. – P. 3925–3947.
17. Panteleev G., Nechaev D., Ikeda M. Reconstruction of summer Barents Sea circulation from climatological data // Atmosphere-Ocean. – 2006. – Vol. 44, Issue 2. – P. 111–132.
18. Petoukhov V., Semenov V.A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // J. Geophys. Res. – 2010. – Vol. 115. – D21.
19. Pfirman S., Bauch D., Gammelsrød T. The northern Barents Sea: water mass distribution and modification // The Polar Oceans and their role in shaping the global environment. AGU Geophys. Monograph. – 1994. – Vol. 85. – P. 74–94.
20. Rudels B., Jones E.P., Schauer U., Eriksson P. Atlantic sources of the Arctic Ocean surface and halocline waters // Polar Res. 2004. – Vol. 23(2). – P. 181–208.
21. Rudels B., Muench R.D., Gunn J., Schauer U., Friedrich H.J. Evolution of the Arctic Ocean boundary current north of the Siberian shelves // J. Marine Syst. – 2000. – Vol. 25. – P. 77–99.
22. Rudels B., Anderson L. G., Jones E.-P. Formation and evolution of the surface mixed layer of the Arctic Ocean // J. Geophys. Res. – 1996. – Vol. 101(C4). – P. 8807–8821.

23. Schauer U., Rudels B., Jones E.P., Anderson L.G., Muench R.D., Björk G., Swift J.H., Ivanov V.V., Larsson A.-M. Confluence and redistribution of Atlantic Water in the Nansen, Amundsen and Makarov basins // *Annales Geophysicae*. – 2002. – Vol. 20. – P. 257–273.

24. Schauer U., Loeng H., Rudels B., Ozhigin V.K., Dieck W. Atlantic Water flow through the Barents and Kara Seas // *Deep-Sea Research I*. – 2002. – Vol. 49, Issue 12. – P. 2281–2298.

25. Shapiro G.I., Huthnance J.M., Ivanov V.V. Dense water cascading off the continental shelf // *J. Geophys. Res.* – 2003. – Vol. 108(C12). – P. 1–19.

26. Volkov D.L., Kubryakov A.A., Lumpkin R. Formation and variability of the Lofoten basin vortex in a high-resolution ocean model // *Deep Sea Research I*. 2015. – Vol. 105. – P. 142–157.

Поступила в редакцию 24.06.2016 г.