

Трофимов А.Г., Титов О.В., Педченко А.П.

Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н.М.Книповича (ПИНРО)

Введение

Циркуляция вод играет исключительно важную, во многих случаях, определяющую роль буквально во всех процессах, протекающих в водной среде, оказывая как прямое, так и косвенное влияние на гидрологические, метеорологические, биологические условия морей и океанов, а также на деятельность человека, осваивающего морские ресурсы.

Начало исследованиям движений вод в Баренцевом море было положено в 1810 г. Д.Скорсби, который высказал свои предположения о проникновении Гольфстрима далеко на север, основываясь на наблюдениях за температурой воды в районе к западу от Шпицбергена [Книпович, 1906]. Его примеру последовали Н.М.Книпович, упомянутые им А.Парри, Х.В.Дове, А.Петерманн, П.Яржинский, Ф.П.Литке, А.В.Григорьев, Н.П.Андреев, Ф.Нансен и ряд других исследователей. Позднее А.И.Танцюра [1959] добавил в этот список самого Н.М.Книповича, а также В.Ю.Визе, Б.Шульца и Г.Вюста. Они делали свои умозаключения, основываясь исключительно на косвенных фактах, являющихся следствием особенностей циркуляции вод.

Основателем направления теоретических расчетов в изучении циркуляции вод Баренцева моря явился Х.Мон [Mohn, 1887]. Впоследствии среди исследователей наиболее популярным из расчетных методов стал динамический, впервые использованный здесь в 1929 г., а затем усовершенствованный в 1935 г. Н.Н.Зубовым [Зубов, Мамаев, 1956]. В течение более чем полувека многие ученые [Танцюра, 1959; Березкин, 1930; Соколов, 1932, 1936; Новицкий, 1961] применяли его, изучая динамику вод Баренцева моря.

Математическое моделирование динамики вод Баренцева моря получило интенсивное развитие с середины 70-х гг. Авторы работ, выполненных в этой области, исследовали движения вод, взяв за основу систему уравнений гидротермодинамики, упрощая, преобразовывая и решая ее, используя для этого существующее многообразие разностных сеток, численных схем и методов их решения [Денисов, 1985; Денисов и др., 1979; Потанин, Коротков, 1988; Булушев, Сидорова, 1994; Семенов, Чвилев, 1996; Яковлев, 1998; Slagstad, 1987; Aadlandsvik, 1989; Slagstad et al., 1989; Трофимов, 2000].

Набор применяемых допущений, преобразований, вариантов численной реализации уравнений модели весьма разнообразен и полностью определялся требованиями, предъявляемыми к конечному результату моделирования.

Первые инструментальные наблюдения за течениями Баренцева моря были выполнены на пароходе “Андрей Первозванный” в 1901 г. [Книпович, 1906]. Более регулярные измерения стали проводиться, начиная с 4-ой экспедиции э/с “Персей”, состоявшейся в 1924 г. На основе этих данных было выполнено обстоятельное исследование динамики вод Баренцева моря, в том числе рассмотрены во взаимодействии приливные, постоянные и ветровые течения, результаты которого были опубликованы в монографии В.К.Агенорова [1946].

В последние десятилетия измерения течений выполняются усовершенствованными приборами различных модификаций, оснащенных внутренней памятью большой емкости [Loeng et al., 1989, 1994; Current measurements between..., 1993]. Инструментальные наблюдения предоставляют наиболее объективные и надежные сведения о течениях, но, к сожалению, из-за их дороговизны до сих пор остаются представленными в ограниченном объеме.

Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию циркуляции вод Баренцева моря, этот вопрос все еще остается открытым. При этом многие из применяемых подходов имеют существенные недостатки, присущие лишь им вследствие специфичности методологий, либо общие для всех ввиду использования недостаточно качественного и полного объема исходной информации. Это привело к многообразию представлений, иногда крайне противоречивых, о движении вод в Баренцевом море.

На рис. 1 представлена схема течений Баренцева моря, подготовленная на основе анализа существующих представлений о динамике вод Баренцева моря, данных измерений течений и модельных вычислений [Ozhigin et al., 2000].

Изучение термохалинной структуры и циркуляции вод в районе между арх. Новая Земля и Земля Франца-Иосифа (ЗФИ), направленное на исследование водообмена Баренцева моря с Арктическим бассейном, имеет важное значение для прогресса в научном обеспечении рациональной эксплуатации биоресурсов Баренцева моря и расширения научного сотрудничества России и Норвегии в области промыслово-океанографических исследований.

В 1985 г. Л.Мидттуном была разработана теория формирования плотных донных вод в зимний период в районе Центральной впадины Баренцева моря и их стока в

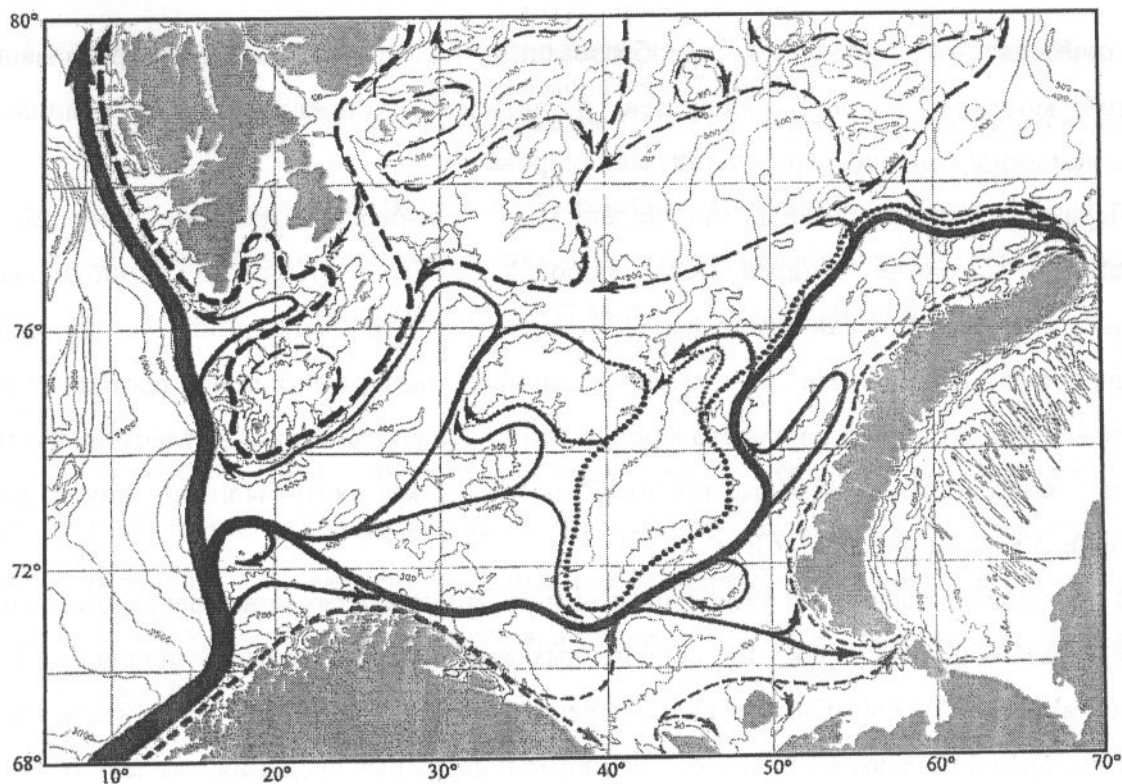


Рис. 1. Схема течений Баренцева моря [Ozhigin et al., 2000]. Стрелками показан перенос атлантических вод (сплошная линия), арктических вод (крупный пунктир), прибрежных вод (мелкий пунктир), плотных донных вод (точечный пунктир)

Арктический бассейн через северо-восточный пролив. Для подтверждения этой теории океанологи ПИНРО и Бергенского Института морских исследований (БИМИ, Норвегия) провели совместные инструментальные наблюдения за течениями в проливе между арх. Новая Земля и ЗФИ в 1991-1992 гг. В сентябре 1992 г. ученым удалось поднять четыре из пяти автономных буйковых станций (АБС), установленных ранее сроком на один год (Рис. 2). Были обработаны данные 16 регистраторов течений, отражающие изменения скорости и направления течений, температуры и солености воды [Current measurements between..., 1993; Current measurements in..., 1993]. Обработка данных годовых серий, проведенная российскими и норвежскими экспертами, показала, что результирующий перенос вод был направлен из Баренцева моря и изменялся от 0,8 до 3,1 Св с максимумом в конце осени - начале зимы. Среднегодовой отток через северо-восточную границу моря составлял 1,9 Св, что сопоставимо с притоком атлантических вод через юго-западную границу Баренцева моря (3,1 Св) [Loeng et al., 1997]. Остаточные течения оказались довольно сильными, а приливо-отливная компонента значительно слабее, чем в других районах Баренцева моря. На ряде участков разреза наблюдались довольно устойчивые течения (устойчивость превышала 90%) [Current measurements in..., 1993].

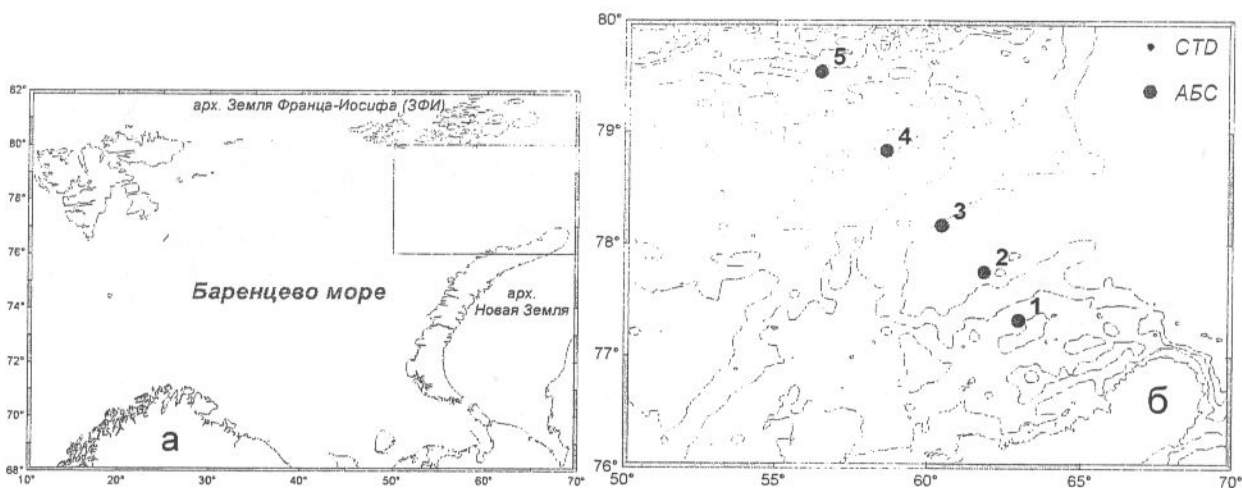


Рис. 2. Район исследований (прямоугольник, а) и положение АБС в 1991-1992 гг. (б)

Неоднократные попытки ученых повторить эти исследования увенчались успехом только через 15 лет. В 2007-2008 гг. океанологи ПИНРО и БИМИ повторили постановку АБС и выполнили несколько разрезов в северо-восточной части Баренцева моря в рамках проекта ВАС (Bipolar Atlantic Thermohaline Circulation), проводимого по программе III Международного полярного года [IPY III Project...].

Материалы статьи обобщают предварительные результаты исследований термохалинной структуры и циркуляции вод в районе между арх. Новая Земля и ЗФИ, которые послужат основой для исследования водообмена Баренцева моря с Арктическим бассейном, в том числе для оценки объемного переноса плотных донных вод из Баренцева моря в Арктический бассейн, его сезонных и межгодовых изменений и их влияния на короткопериодные изменения климата в регионе.

Материалы и методы

В сентябре 2007 г. в проливе между арх. Новая Земля и ЗФИ были выполнены океанографический разрез и установлены сроком на один год пять АБС с измерителями течений. Места установки АБС были выбраны с учетом результатов эксперимента 1991-1992 гг. (Рис. 3). В связи с ограничениями по времени океанографические наблюдения были выполнены на 26 станциях только на разрезе вдоль линии постановки АБС.

В состав каждой АБС входили 2-3 регистратора течений RCM 7 и один акустический доплеровский профилограф течений ADCP Continental 190 кГц с отдельным датчиком температуры и электропроводности. Измерители течений были оборудованы датчиками давления для контроля изменений глубины приборов под действием набегающего потока. Все данные записывались на внутренние носители и не были доступны для обработки до подъема АБС.

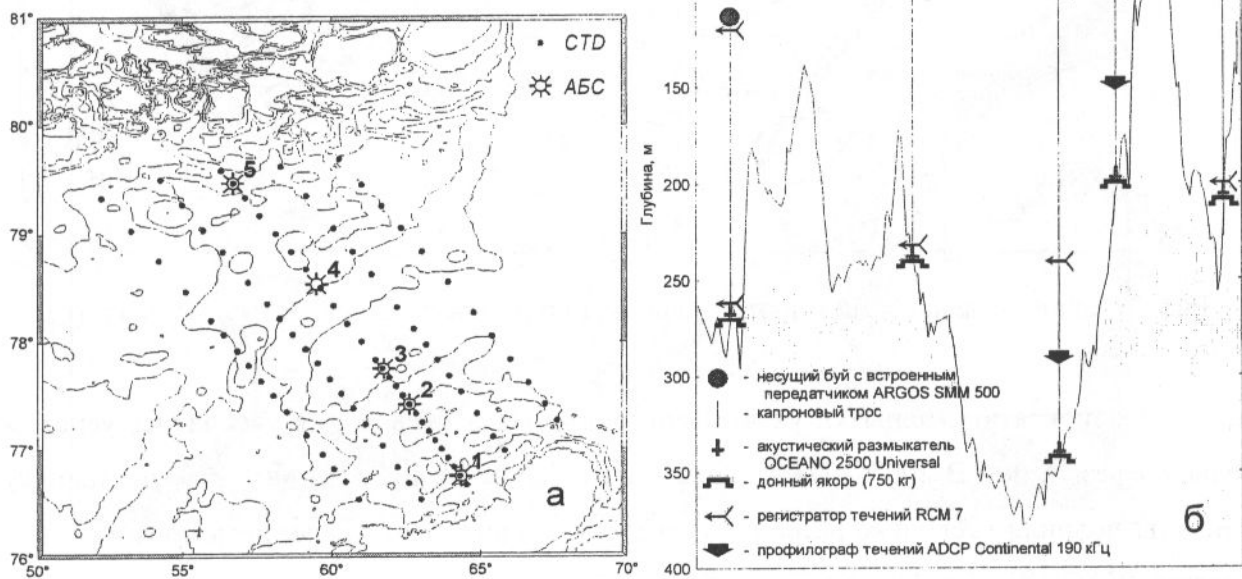


Рис. 3. Схема расположения океанографических станций (CTD) и АБС на акватории исследований (а) и в плоскости разреза (б) между арх. Новая Земля и ЗФИ в 2007-2008 гг.

При подъеме АБС в сентябре 2008 г. была выполнена океанографическая съемка (86 станций на пяти разрезах) в северо-восточной части Баренцева моря (см. Рис. 3).

Результаты

Анализ океанографических данных, собранных на разрезе, вдоль которого производилась постановка АБС в сентябре 2007 г., показал, что температура воды на разрезе изменялась от 4,1 до минус 1,8 °С (Рис. 4). Наиболее теплые (с температурой выше 3,0 °С) воды отмечались в верхнем 30-метровом слое в южной части разреза (южнее 77°40' с.ш.), наиболее холодные (ниже минус 1,5 °С) – в промежуточном слое 50-150 м в северной части разреза (севернее 78°20' с.ш.). Глубина залегания слоя скачка температуры увеличивалась с севера на юг в среднем от 20 до 40 м. Соленость воды на разрезе изменялась от 30,1 до 35,0 ‰. Наиболее солеными (34,9-35,0 ‰) были придонные воды южной половины разреза, наиболее распресненными (меньше 33,0 ‰) – воды верхнего 15-20-метрового слоя северной половины разреза и самого южного, прибрежного, участка, расположенного в непосредственной близости от о-ва Северный архипелага Новая Земля. На этих же участках на глубинах 20-30 м отмечался соответственно и максимальный вертикальный градиент солености (до 0,6 ‰ м⁻¹).

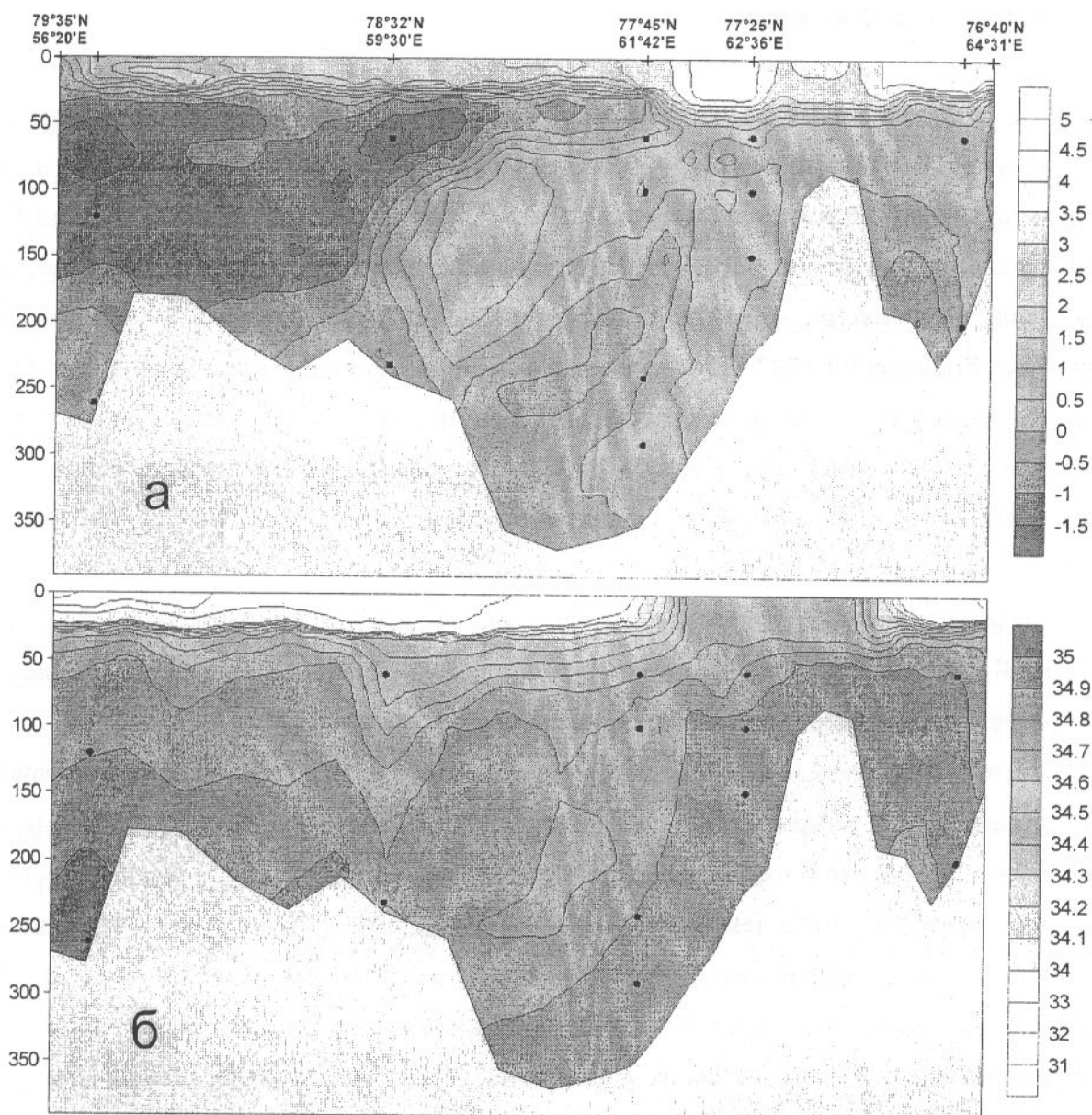


Рис. 4. Вертикальное распределение температуры ($^{\circ}\text{C}$, а) и солёности (б) воды на разрезе между арх. Земля Франца-Иосифа и Новая Земля 11-12 сентября 2007 г.

В средней части разреза, над максимальными глубинами, в слое 180-270 м отмечались воды с более низкой температурой (до минус $0,8^{\circ}\text{C}$) и солёностью (34,8 ‰), по сравнению с окружающими водными массами. Несколько севернее в слое 80-200 м, наоборот, выделялось ядро значительно более теплых (температура до $1,5^{\circ}\text{C}$) и сравнительно более солёных (солёность до 34,9 ‰) атлантических трансформированных вод. В относительно мелководной северной части разреза, глубже ядра холодных арктических вод, о котором шла речь выше, были обнаружены более теплые (выше минус $0,5^{\circ}\text{C}$) и солёные (более 34,9 ‰) воды. Возможно, на этих участках разреза происходит поступление арктических и атлантических трансформированных вод из Карского моря в Баренцево. Наиболее интенсивный вынос вод из Баренцева моря, по всей видимости, происходит в верхних слоях южной части разреза и вдоль южного склона желоба,

расположенного в центральной части пролива и имеющего максимальные глубины (до 380 м).

По сравнению с 1991-1992 гг. в сентябре 2007 г. на этом разрезе был выявлен ряд отличий в термохалинной структуре вод. Температура воды верхнего 20-метрового слоя на всем разрезе и всей толщии, от поверхности до дна, на его южном участке (южнее 77°40' с.ш.) была выше, чем в 1991 и 1992 гг. На остальной части разреза, глубже 20 м и севернее 77°40' с.ш., температура воды была в среднем на 0,5°С ниже, чем в 1991 г., и мало отличалась от значений 1992 г. Воды верхнего 20-метрового слоя в сентябре 2007 г. были более распресненными, чем в тот же период 1991-1992 гг. Исключение составил участок разреза между 77°35' и 77°05' с.ш., где вплоть до поверхности отмечались воды с соленостью более 34,5 ‰. Промежуточные и донные воды в сентябре 2007 г. были на 0,1-0,2 ‰ солонее, чем в 1991-1992 гг.

Детальная океанографическая съемка, выполненная в проливе от 52° до 68° в.д. и от 76°30' до 80°00' с.ш. в сентябре 2008 г., выявила важные особенности пространственного распределения вод в северо-восточной части Баренцева моря.

Температура воды поверхностного слоя изменялась от 4,8 °С в южной части района работ до 0,9 °С – в северной. Поле температуры поверхностного слоя было достаточно однородным в северной части акватории исследований, тогда как в южной части – горизонтальные градиенты температуры воды достигали 0,04 °С/км. Сложная халинная структура вод на поверхности обуславливалась распреснением верхнего слоя за счет материкового стока с о-вов Новая Земля и Земля Франца-Иосифа, переносом трансформированных атлантических вод системой теплых течений и арктических – системой холодных. Вследствие чего, в поверхностном слое на акватории съемки прослеживались халинные фронтальные зоны на границах раздела между разными по характеристикам водными массами, где, на отдельных участках, например, на северо-востоке района съемки, перепады солености достигали 2‰ на 30 морских миль. Соленость воды в верхнем слое изменялась от 32,9 ‰ в северо-восточной части района работ до 34,8 ‰ – в юго-западной.

Температура воды на горизонте 50 м изменялась в более широком диапазоне (от 3,2 до минус 1,7 °С), чем на поверхности. Наибольшая неоднородность вод на этом горизонте наблюдалась на мелководных участках южной части акватории съемки, где отмечалось поступление трансформированных атлантических вод. Севернее 78° с.ш. температура воды была отрицательной. Наличие атлантических трансформированных вод в южной части района работ на горизонте 50 м также подтверждается значениями солености, превышавшими 34,8 ‰. Поле солености на 50 м было более однородным по сравнению с поверхностью – значения солености изменялись от 34,4 до 35,0 ‰.

В придонном слое изменчивость температуры воды была небольшой – перепад ее значений в районе работ не превышал 2 °С. Положительные значения температуры воды отмечались в южной части акватории съемки, а положение нулевой изотермы практически совпадало с центральной осью желоба Святой Анны. Соленость вод у дна также обладала значительно меньшей изменчивостью (от 34,8 до 35,0 ‰) по сравнению с вышележащими горизонтами.

В сентябре 2008 г. температура воды на разрезе, вдоль которого были установлены АБС изменялась от минус 1,5 до 4,4 °С (Рис. 5). Наиболее теплые (с температурой выше 3,0 °С) воды отмечались в верхнем 30-метровом слое в южной части разреза (южнее 77°30' с.ш.), наиболее холодные (ниже минус 1,4 °С) – в промежуточном слое 75-100 м в северной части разреза (севернее 78°40' с.ш.). Глубина залегания слоя скачка температуры на всем протяжении разреза практически не изменялась и составляла в среднем 40 м. Максимальный градиент температуры воды в слое скачка достигал 0,17 °С/м. Наличие нескольких ядер теплых и холодных водных масс в плоскости разреза создают достаточно сложную картину, не позволяющую однозначно оценить направление движения вод в этом проливе. Вероятно, анализ данных измерений течений, полученных с помощью АБС, позволит прояснить сложившуюся ситуацию. Предположительно, холодные воды, ядро которых располагается в северной части разреза на глубинах 50-150 м, движутся по направлению в Баренцево море, также, как и теплые воды с ядром в центральной части разреза на глубинах 75-150 м. Тогда как воды вдоль южного склона желоба Святой Анны, вероятнее всего, вытекают из Баренцева моря. Холодные воды над банкой, расположенной в южной части разреза, возможно, имеют местное происхождение и их положение обуславливается местной антициклонической циркуляцией вод.

Соленость воды на разрезе изменялась от 33,5 до 35,0 ‰. Наиболее солеными (34,9-35,0 ‰) были придонные воды южной половины разреза, тогда как наиболее распресненными (33,5-33,7 ‰) – воды верхнего 20-метрового слоя в центральной части разреза. Максимальные вертикальные градиенты солености, достигавшие 0,06 ‰ м⁻¹, наблюдались в центральной части разреза на глубинах около 30 м. Средняя толщина халоклина при этом составляла в среднем 20 м.

В сентябре 2008 г. на «центральной» разрезе был выявлен ряд отличий в термохалинной структуре вод по сравнению с 2007 г. (Рис. 6). Максимальные положительные разности значений температуры воды между 2008 и 2007 гг. были отмечены в слое 20-40 м в северной части разреза, что, вероятно, обусловлено более интенсивным прогревом в 2008 г. вод верхнего слоя и, как следствие, заглублением границ термоклина. Воды в северной части разреза глубже 50 м оказались незначительно теплее по сравнению с прошлым годом (в среднем на 0,2-0,3 °С). Значительные изменения

температуры воды на глубинах 50-100 м в районе 78°20'-78°30' с.ш., по мнению авторов, связаны с подъемом и смещением к северу потока теплых вод (см. Рис. 4 и 5). Отмечено, что в 2008 г. ядра теплой воды в центральной части разреза и над южным склоном желоба Святой Анны были холоднее, чем в 2007 г., при этом изменение температуры составило в среднем минус 1,2 °С. В то же время, на глубинах более 200 м отмечено потепление воды на 0,2-0,4 °С, по сравнению с 2007 г. Также более теплыми по сравнению с прошлым годом были воды в южной части разреза.

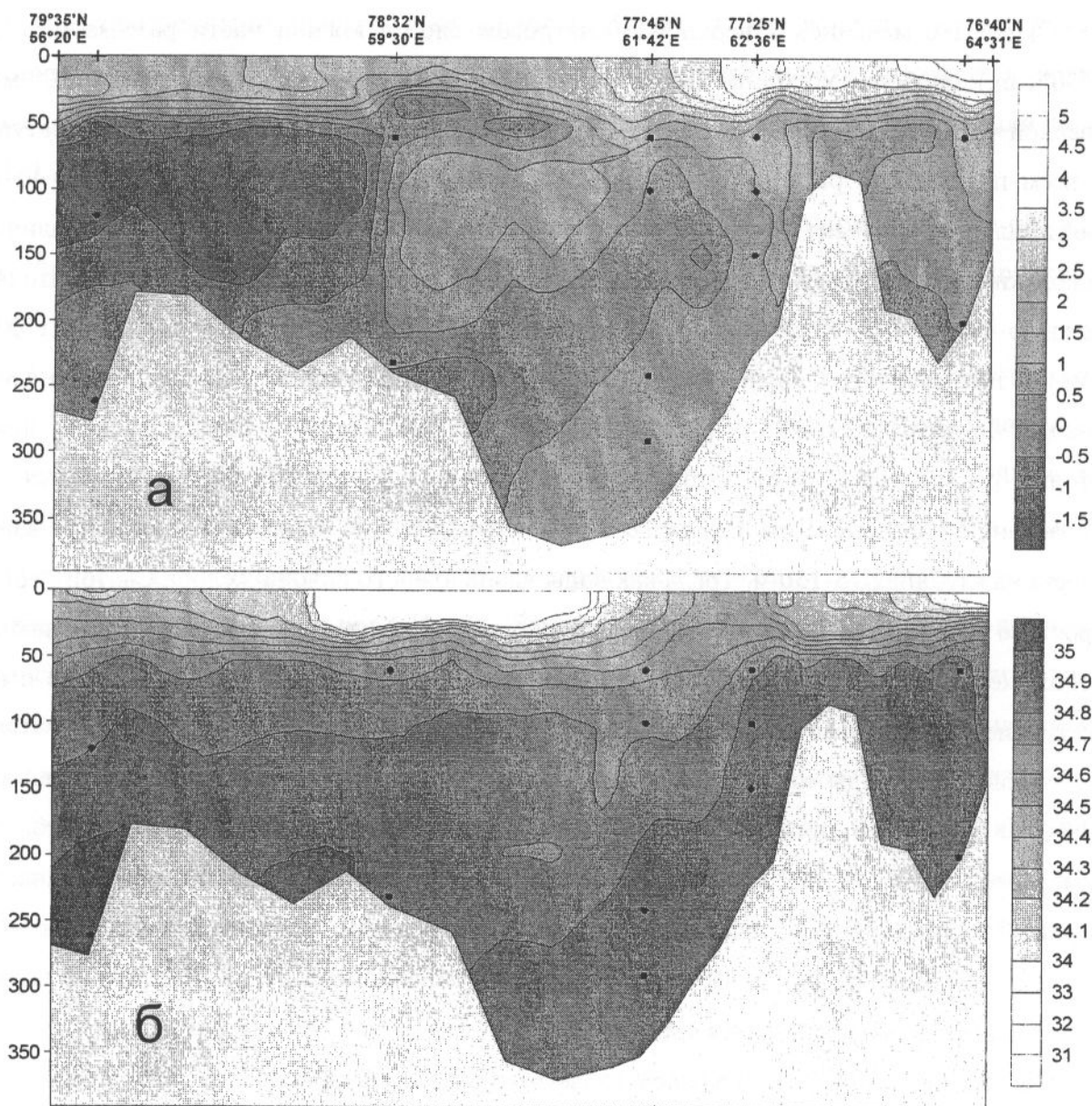


Рис. 5. Вертикальное распределение температуры (°С, а) и солёности (б) воды на разрезе между арх. Земля Франца-Иосифа и Новая Земля 12-13 сентября 2008 г.

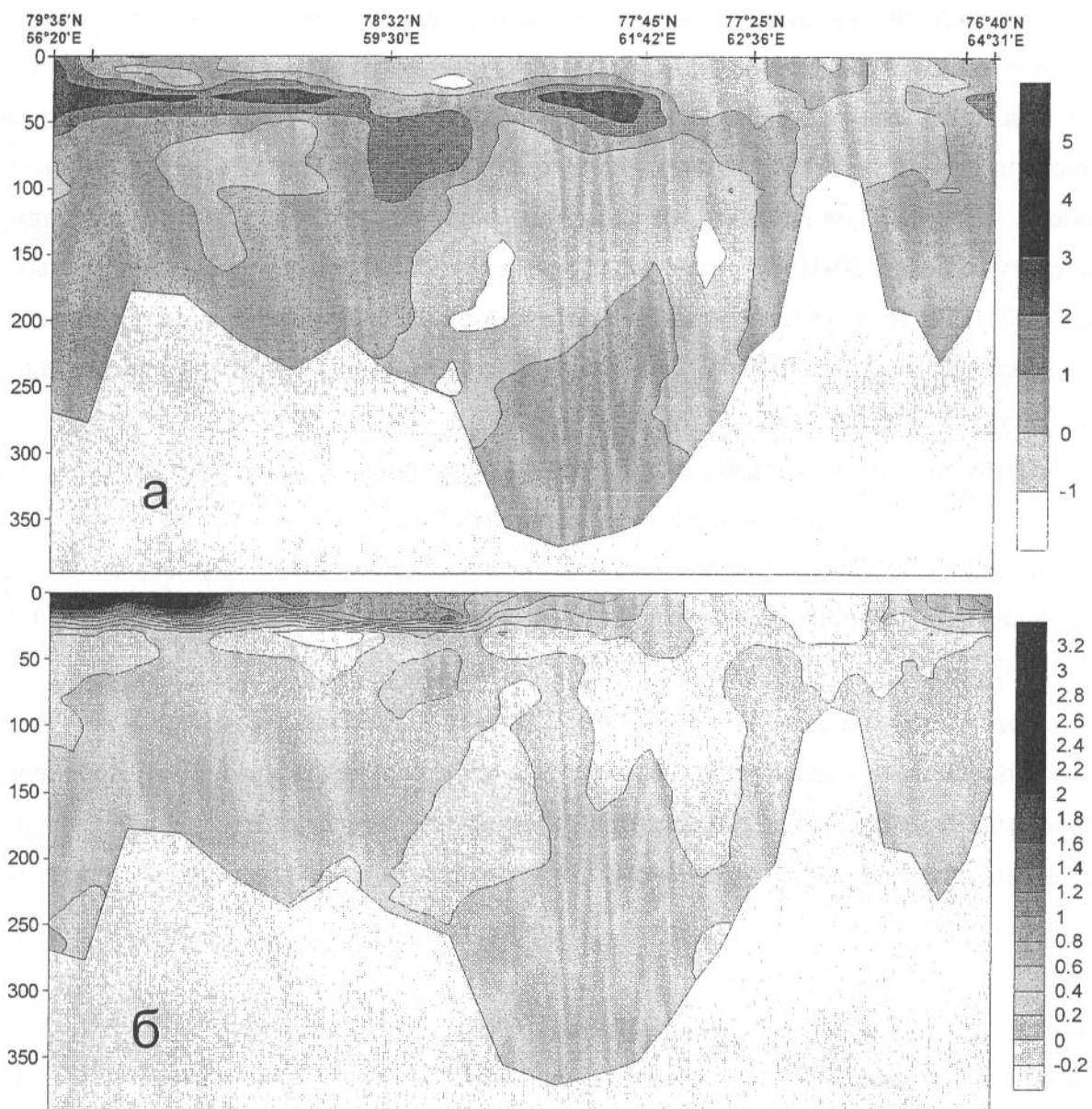


Рис. 6. Разность температуры (°С, а) и солёности (б) воды в сентябре 2008 и 2007 гг. на разрезе между арх. Земля Франца-Иосифа и Новая Земля

Характер вертикального распределения солёности в плоскости рассматриваемого разреза мало отличался от такового в 2007 г. Однако следует отметить значительное увеличение солёности (до 3,0 ‰) в верхнем 20-метровом слое к северу от 77°45' с.ш. по сравнению с тем же периодом 2007 г.

Заключение

В ходе совместных исследований ПИНРО и БИМИ в рамках проекта ВАС по программе III Международного полярного года собраны данные на пяти автономных буйковых станциях в проливе между архипелагами Новая Земля и Земля Франца-Иосифа в 2007-2008 гг.

Наблюдения на океанографическом разрезе вдоль линии установки автономных буйковых станций в сентябре 2007 г. и на пяти океанографических разрезах в сентябре 2008 г. в проливе между арх. Новая Земля и Земля Франца-Иосифа выявили сложную термохалинную структуру взаимодействующих вод арктического и атлантического происхождения. В частности, установлено наличие подповерхностного минимума температуры в слое 50-100 м в северной части акватории исследований и ядра теплых вод в слое 75-150 м в районе желоба Святой Анны. Практически на всей акватории исследований в слое 30-50 м отмечались значительные вертикальные градиенты температуры и солености воды.

Отмечено, что в сентябре 2008 г. теплые атлантические трансформированные воды были холоднее, а холодные арктические, наоборот, – теплее, чем в тот же период 2007 г. Воды верхнего 20-метрового слоя в северной части разреза, выполненного вдоль линии постановки АБС, были значительно солонее (увеличение солености достигало 3,0 ‰), чем в 2007 г.

Дальнейшая совместная обработка данных 13 уникальных годовых серий, полученных с измерителей течений АБС, позволит дополнить знания об особенностях водообмена Баренцева моря с Арктическим бассейном, сезонных изменениях скорости и направления течений, а также температуры и солености воды в северо-восточной части Баренцева моря.

Литература

- Агеноров В.К. О динамике вод Баренцева моря. - М.-Л.: Гидрометеиздат, 1946. -132 с.
- Березкин В.А. Течения Баренцева моря// Записки по гидрографии.-1930. -Т. 62. -С. 15-26.
- Булусhev М.Г., Сидорова А.Н. Расчет среднемесячной циркуляции в Баренцевом море// Метеорология и гидрология. -1994. -№. 4. -С. 78-86.
- Денисов В.В. Циркуляция вод Баренцева моря как реакция на перемещающиеся барические системы// Проблемы Арктики и Антарктики. - 1985. -Вып. 61. -С. 36-42.
- Денисов В.В., Зубакин Г.К., Зуев А.Н. Численный расчет движений вод в частично покрытом льдом море, вызванных прохождением циклонов// Тр./ ГОИН. -1979. - Вып. 144. -С. 49-59.
- Зубов Н.Н., Мамаев О.И. Динамический метод вычисления элементов морских течений. – Л.: Гидрометеиздат, 1956. – 115 с.
- Книпович Н.М. Основы гидрологии Европейского Ледовитого океана. -С.-Петербург, 1906. -1510 с.
- Новицкий В.П. Постоянные течения северной части Баренцева моря// Тр./ ГОИН. -1961. - Вып. 64. -С. 3-32.

- Потанин В.А., Коротков С.В. Внутригодовая изменчивость постоянных течений южной части Баренцева моря и ее водообмен с сопредельными районами// Геологические и географические проблемы освоения природных ресурсов северных морей. - Мурманск, 1988. -С. 81-90.
- Семенов Г.А., Чвилев С.В. Численное исследование межгодовой изменчивости циркуляции вод Баренцева моря в летний сезон// Океанология. -1996. -Т. 36. -№. 4. -С. 498-511.
- Соколов А.В. Динамическая карта Баренцева моря// Тр./ ГОИН. -1932. -Т. 2. -№. 2. -С. 59-73.
- Соколов А.В. Современные представления о гидрологии Баренцева моря (динамика вод Баренцева моря)// Природа. -1936. -№. 7. -С. 38-49.
- Танцюра А.И. О течениях Баренцева моря// Тр./ ПИНРО.-1959.-Вып. 11. - С. 35-53.
- Трофимов А.Г. Численное моделирование циркуляции вод в Баренцевом море. - Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2000. - 42 с.
- Яковлев Н.Г. Моделирование распространения атлантических вод в Северном Ледовитом океане// Метеорология и гидрология. -1998. -№. 2. -С. 73-84.
- Current measurements in the northeastern Barents Sea/Loeng H., Ozhigin V., Aadlandsvik B., Sagen H.// ICES C.M. -1993/C:41. -22 p.
- IPY III Project BIAC: Bipolar Atlantic Thermohaline Circulation. - <http://www.ipy.org/index.php?ipy/detail/biac/>
- Loeng H., Sundby S., Ostensen O. Drifting Argos buoys in the Barents Sea// ICES C.M. -1989/ C:19. -10 p.
- Loeng H., Midttun L., Sagen H. Current measurements between the Central, Great Banks in the Barents Sea// Fiskeri og havet. -1994. -Nr. 3. -21 p + 3 appendices.
- Loeng H., Ozhigin V., Aadlandsvik B. Water fluxes through the Barents Sea// ICES J. Mar. Sci. -1997. -Vol. 54. -P. 310-317.
- Mohn H. The North Ocean, its Depth, Temperature and Circulation: The Norwegian North-Atlantic Expedition, 1876-1878. -Christiania, 1887. -212 p.
- Ozhigin V.K., Trofimov A.G., Ivshin V.A. The Eastern Basin Water and currents in the Barents Sea// ICES C.M. -2000/L:14. -19 p.
- Slagstad D. A 4-Dimensional Physical Model of the Barents Sea. SINTEF Report. -Trondheim, 1987. -No. STF48 F87013. -34 p.
- Slagstad D., Stole-Hansen K., Loeng H. Density-driven currents in the Barents Sea calculated by numerical model// ICES C.M. -1989/ C:20. -14 p.