

УДК 551.465

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛУБОКОВОДНЫХ ЖЕЛОБОВ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

© 2015 г. А. Г. Зацепин¹, С. Г. Поярков¹, В. В. Кременецкий¹, А. А. Недоспасов¹,
С. А. Шука¹, В. И. Баранов², А. А. Кондрашов², А. О. Корж²

¹Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва

e-mail: zatsepin@ocean.ru

²Атлантическое отделение Института океанологии им. П.П. Шишова РАН, Калининград

Поступила в редакцию 30.09.2014 г., после доработки 25.02.2015 г.

В 59-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” в сентябре–октябре 2011 г. на основе использования широкого арсенала технических средств получен уникальный по пространственному разрешению и объему данных материал, позволяющий исследовать динамику вод и гидрологическую структуру в глубоководных желобах западной части Карского моря. Анализ этого материала показал, что в центральном отроге желоба Святой Анны имеется проникающее до дна циклоническое течение над глубинами 150–300 м. Данное течение может играть роль динамического барьера и препятствовать проникновению вод из западной части Карского моря в высокие широты. В восточном отроге желоба Святой Анны это течение существенно ослабевает и уже не представляет преграды на пути распространения шельфовых вод Карского моря к северу. Самые слабые и знакопеременные течения зарегистрированы в Новоземельской впадине, в южной части которой обнаруживаются следы баренцевоморских вод.

DOI: 10.7868/S0030157415040164

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа является продолжением исследований, начатых в 54-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” (сентябрь–октябрь 2007 г.) в Карское море. В этом рейсе на основе использования широкого арсенала технических средств, обеспечивающих: а) непрерывную регистрацию гидрофизических характеристик вод приповерхностного слоя на ходу судна; б) сканирование водной толщи 150–200 м на ходу судна с измерением вертикального профиля скорости течения; в) получение вертикальных профилей гидрофизических и биооптических характеристик на станциях; г) прием спутниковых снимков (температура поверхности моря, содержание хлорофилла “а”, яркость восходящего излучения), был собран уникальный по пространственно-временному разрешению и объему данных научный материал, позволивший получить важные сведения о динамике и гидрологической структуре в юго-западной части Карского моря. Было показано, что основными элементами общей циркуляции вод на обследованной акватории моря являются Ямальское течение, Восточное Новоземельское течение, течение в центральном отроге желоба Святой Анны, а также течение, связанное с линзой опресненных речным стоком вод [5]. Первые три из вышеперечисленных течений являются топографически привязанными, т.е. они следуют изобатам, распространяясь вдоль склона

дна. Ямальское течение зарождается у пролива Карские Ворота и следует в циклоническом направлении по изобате 100 м вдоль побережья Ямала. Было обнаружено, что Восточное Новоземельское течение, приуроченное к западному склону Новоземельской впадины, вопреки существующим представлениям [16], направлено не на юго-запад, а на северо-восток. Вблизи северной оконечности Новой Земли в области перешейка, разделяющего центральный отрог желоба Святой Анны и Новоземельскую впадину, оно сталкивается с контурным течением в отроге желоба, отрывается от берега и распространяется далее практически на восток. При взаимодействии этих течений образуется резкий фронт, разделяющий относительно теплые и соленые воды контурного течения и более холодные и опресненные воды западной части Карского моря. На основании проведенных наблюдений был сделан вывод, что этот перешеек, над которым глубина моря не превышает 100–150 м, является барьером, ограничивающим проникновение трансформированных атлантических вод Арктического бассейна через желоб Святой Анны в западную часть Карского моря [5].

В данной работе на основе анализа данных, собранных в 59-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” в сентябре–октябре 2011 г., ранее полученные представления уточняются и дополняются. В частности, проводится сравнение динамики

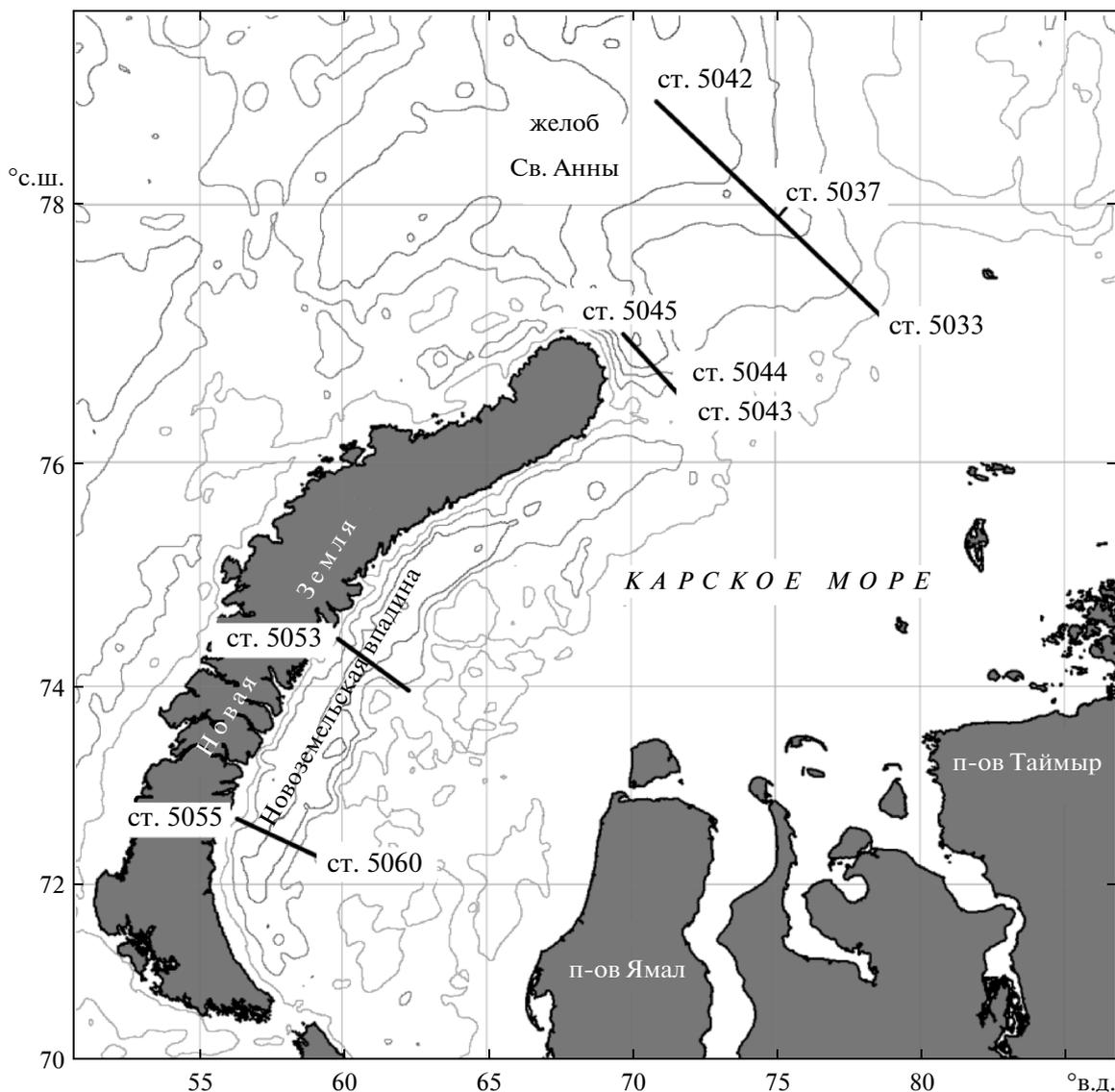


Рис. 1. Районы исследований в Карском море в сентябре–октябре 2011 г.

и структуры вод в двух отрогах желоба Святой Анны — центральном и восточном. Уточняется вопрос о влиянии топографически привязанных динамических фронтов в отрогах желоба на распространение вод поверхностного опресненного слоя (ПОС, [3]) у побережья Новой Земли. Приводятся измерения профилей скорости течения, а также температуры, солёности и плотности воды над перешейком, разделяющим центральный отрог желоба Святой Анны и Новоземельскую впадину с помощью заякоренного автономного зонда-профилографа “Аквалог” [8, 9, 13]. Также проверяется наличие над западным склоном впадины Восточного Новоземельского течения и уточняется его направление.

РАЙОНЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЯ

Карта района описываемых исследований с выполненными разрезами гидрофизическим буксируемым сканирующим зондом (БСЗ) “Рыбка”, океанологическими станциями с STD-зондированиями и буксируемым ADCP приведена на рис. 1.

Исследования 2011 г. проводились с применением приблизительно того же аппаратного комплекса, что и в 54-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2007 г., подробно описанного в [3, 5]. В настоящей работе использовались данные: а) вертикальных распределений гидрофизических и биооптических характеристик, полученных на океанологических станциях STD-зондом SBE-19plus, оснащённым дополнительными

датчиками прозрачности и флуоресценции; б) сканирования водной толщи по вертикали на ходу судна буксируемым гидрофизическим STD-зондом Idronaut (БСЗ “Рыбка”); в) скорости течения, измеренной на ходу судна буксируемым акустическим доплеровским измерителем течений ADCP RDI (300 кГц) в обтекаемой гондоле в режиме “bottom tracking”; г) скорости течения, температуры, солёности и плотности, измеренных автономным зондом-профилографом “Аквалог” на заякоренной станции [8, 9, 13].

Разрез вдоль центрального отрога желоба Святой Анны. На данном разрезе, на переходе в отрог желоба с юга на север, выполнялась буксировка БСЗ “Рыбка” и ADCP (до изобаты примерно 200 м), а на пути обратно с севера на юг – комплексные океанологические станции с STD-зондированием. Разрезы в полях температуры и солёности, построенные по данным БСЗ “Рыбка”, приведены на рис. 2а и 2б.

Обращает на себя внимание ярко выраженный “надвиг” с юго-востока опресненных (22–26 psu) и прогретых (более 6°C) поверхностных вод в тонком 10–15-метровом слое, который маркируется фронтальным разделом, выходящим на поверхность у ст. 5044 (см. ниже).

Рассчитанные по данным БСЗ “Рыбка” геострофические скорости течения на разрезе вдоль центрального отрога желоба Святой Анны вместе с T, S -соотношениями для разрезов вдоль обоих отрогов желоба представлены на рис. 2в и 2г. За отсчетный горизонт нулевых скоростей здесь и далее принималась глубина места. Обоснованность такого выбора нулевого горизонта подтверждается данными прямых измерений скоростей течений на отдельных (реперных) участках района работ, полученных с помощью ADCP. Эти измерения, выполненные на протяжении как минимум нескольких приливных циклов, показали, что в период проведения работ придонные течения со скоростью более 5 см/с определялись, по существу, баротропной компонентой прилива.

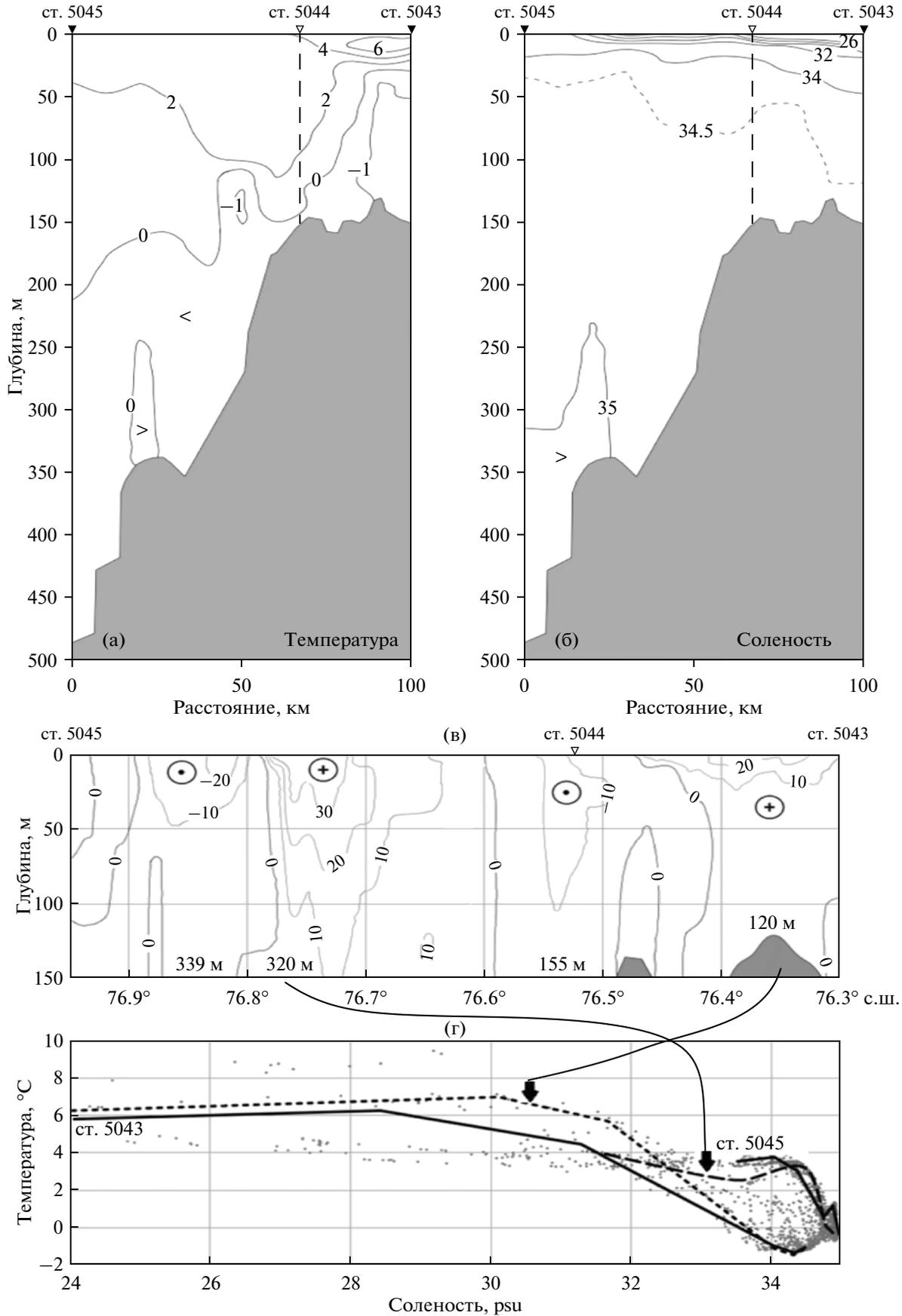
Наиболее интенсивная струя северо-восточного переноса на 76.7°–76.8° с.ш. (рис. 2в) принадлежит контурному течению центрального отрога желоба Святой Анны. Оно хорошо идентифицируется на разрезе в поле температуры (рис. 2а), где над склоном располагается более чем стометровый слой более теплой воды (2.0–4.0°C), тогда как фоновые значения температуры на этих глу-

бинах как минимум на 1°C ниже. Течение, геострофическая скорость в стрессе которого у поверхности доходит до 35 см/с, располагается над крутым склоном над глубинами 170–320 м, причем оно, по-видимому, проникает до самого дна. Другая область течения северо-восточного направления на 76.3°–76.4° с.ш. над глубинами 120–130 м ограничивается, за исключением верхнего 20–30-м слоя, почти вертикальной стенкой холодных вод (рис. 2а), которые обладают отрицательной температурой и являются “собственными” водами Карского моря. По данным 54-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш”, в сентябре 2007 г. именно в этом районе был выявлен хорошо выраженный фронтальный раздел, связанный с зоной конвергенции между контурным течением в центральном отроге желоба Святой Анны и Восточным Новоземельским течением, переносящим опресненные воды [5]. Для условий наблюдений в 2011 г. это течение, скорее всего, не индуцировано фронтальной зоной ПОС, а существует независимо, поскольку толщина слоя, охваченного ярко выраженным северо-восточным переносом, значительно превышает 20 м (примерную толщину ПОС), а его скорость на поверхности достигает 25 см/с (рис. 2в). Вместе с тем оно ограничивает распространение опресненной воды в поверхностном слое дальше на север. Поэтому, возможно, это течение является продолжением отрывающегося от северо-восточного берега Новой Земли Восточного Новоземельского течения. И если это так, тогда в 2011 г., в отличие от 2007 г., оно не контактировало с контурным течением центрального отрога желоба Святой Анны, а было отделено от него юго-западным противотечением (рис. 2в). Последнее проникло достаточно глубоко (до 150 м) и имело на поверхности скорость до 20 см/с.

Природа этого противотечения не вполне ясна. Возможно, оно не является стационарным, а связано с вариациями интенсивности контурного течения в желобе. Представим себе, что течение в желобе усиливается, поднимается вверх по склону и даже выходит на порог, разделяющий центральный отрог желоба Святой Анны и Новоземельскую впадину. Тогда из закона сохранения потенциальной завихренности следует, что вокруг поднятия должна возникать антициклоническая циркуляция – течение юго-западного направления, что и наблюдается на рис. 2в. Не исключено также, что наличие юго-западного

Рис. 2. Разрез вдоль центрального отрога желоба Святой Анны по данным БСЗ “Рыбка”:

(а) – температура, °C; (б) – солёность, psu. Белый треугольник – место постановки заякоренного профилографа “Аквалог”; (в) – распределение геострофической скорости течения (в см/с) в слое 0–150 м. Оперение стрелы (в рисунок) – перенос вод на северо-восток, наконечник стрелы (из рисунка) – перенос вод на юго-запад. Внизу обозначены глубины, над которыми выделяются струи течения; (г) – T, S -соотношения для обоих разрезов вдоль центрального и восточного отрогов желоба Святой Анны. Сплошные линии – T, S -кривые для начала (ст. 5043) и конца (ст. 5045) разреза вдоль центрального отрога. Пунктиры – T, S -кривые для двух выделенных струй северо-восточного переноса.



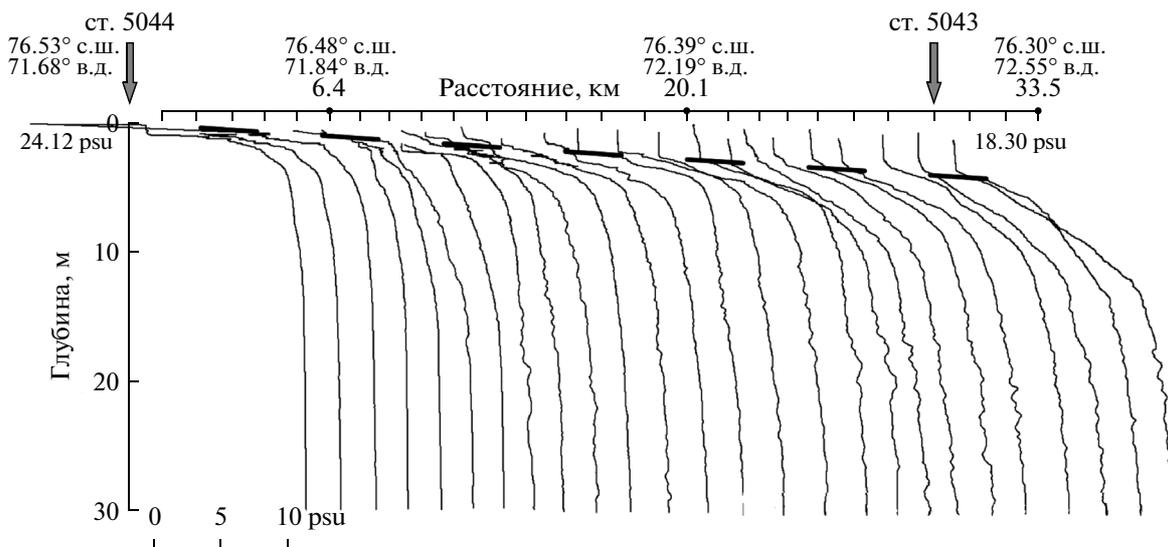


Рис. 3. Последовательное распределение вертикальных профилей солёности в слое 0–30 м по данным БСЗ “Рыбка” на участке разреза от ст. 5043 к ст. 5044 в центральном отроге желоба Святой Анны. Пунктир маркирует фронтальный раздел поверхностного опресненного слоя (ПОС) Карского моря. Внизу рисунка – масштаб изменения солёности (в psu) по вертикали.

переноса между струями течения северо-восточного направления, как и на 76.8° – 76.9° с.ш., связано с мезомасштабными вихревыми образованиями.

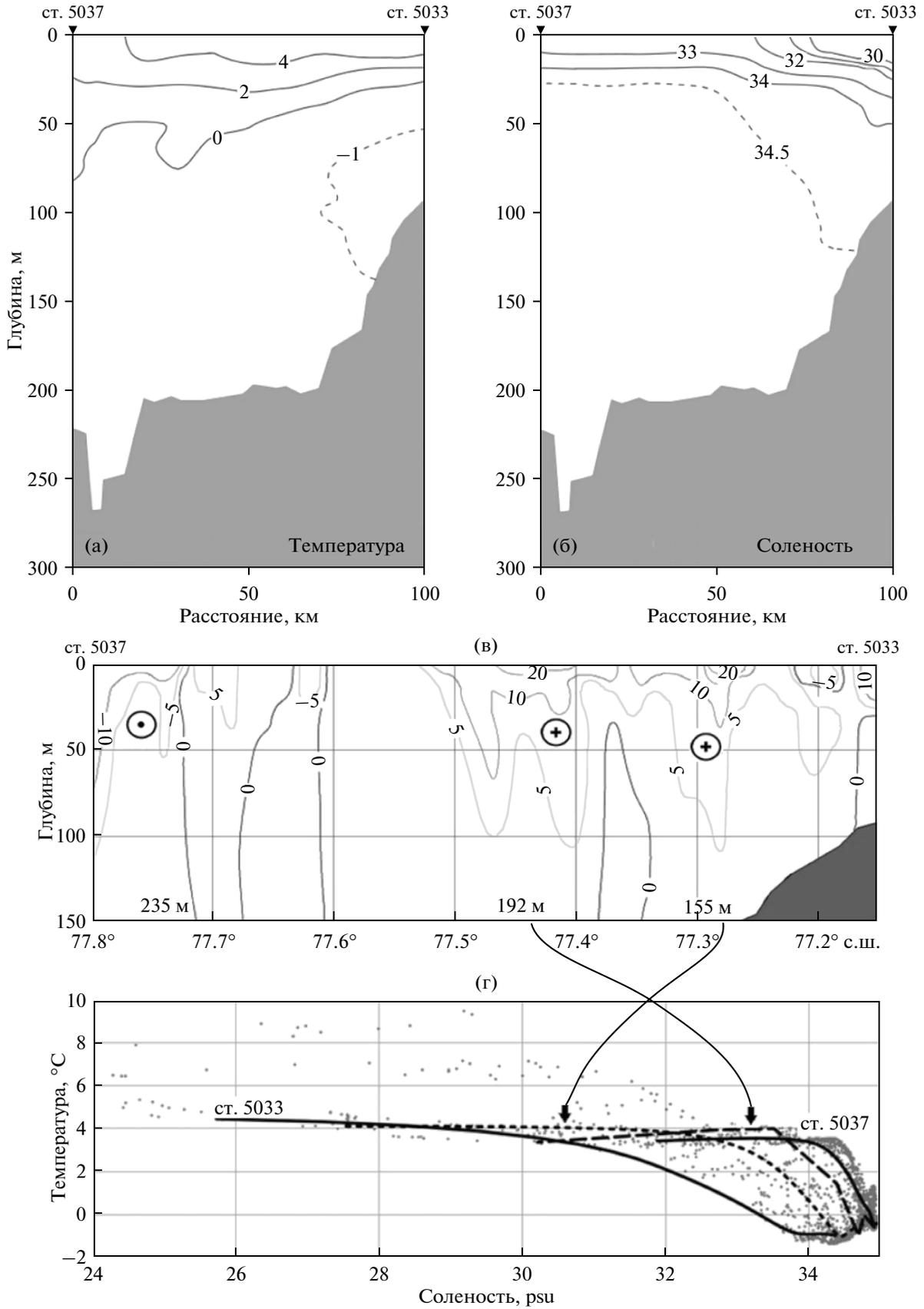
Как уже указывалось, динамическая фронтальная зона, образованная отошедшим от северной оконечности Новой Земли северо-восточным течением и соседствующим с ним противотечением, ограничивает область распространения ПОС на север. На рис. 3 приведено последовательное распределение (“частокол”) вертикальных профилей солёности по данным БСЗ “Рыбка” в верхнем 30-метровом слое вод на участке разреза от ст. 5043 к ст. 5044. Видно, что именно между этими станциями расположен фронтальный раздел ПОС, выходящий на поверхность у ст. 5044. Регистрация поверхностной солёности в проточной системе на борту судна зафиксировала, что ее перепад на фронте ПОС составил приблизительно 10 psu (с 22 до 32 psu), причем ширина фронтальной зоны не превышала 200 м. Следует отметить, что такой резкий фронт наблюдался в условиях маловетренной погоды, продолжавшейся не менее одной недели до проведения наблюдений. При следовании спустя двое суток в обратном направлении при ветре, усилившемся до 12–14 м/с, пересечение этого участка акватории характери-

зовалось отсутствием резких фронтальных разделов. Подобное обстоятельство является косвенным подтверждением гипотезы о радикальной трансформации фронтальных зон ПОС в Карском море под воздействием сильного ветра [4].

Разрез вдоль восточного отрога желоба Святой Анны. На данном разрезе протяженностью около 100 км на переходе в отрог желоба с юга на север выполнялись станции STD-зондирования, а на пути обратно с севера на юг – буксировка БСЗ “Рыбка” и ADCP (от изобаты 200 м к меньшим глубинам). Разрезы в полях температуры и солёности, построенные по данным БСЗ “Рыбка”, приведены на рис. 4а и 4б.

На этом разрезе, так же как и в центральном отроге желоба, более пресные (менее 30 psu) и теплые (около 4°C) воды с юга акватории прослеживались в поверхностном 10–20-метровом слое на расстоянии до 30 км от ст. 5033. В целом вертикальная структура вод над верхней частью склона отрога до 100–130 м соответствовала структуре вод юго-западной части Карского моря вплоть до примерно 77.35° с.ш. Центральная же область разреза между 77.4° – 77.6° с.ш. над глубинами порядка 200 м была занята арктическими водами.

Рис. 4. Участок разреза вдоль восточного отрога желоба Святой Анны по данным БСЗ “Рыбка”: (а) – температура, $^{\circ}\text{C}$; (б) – солёность, psu; (в) – распределение геострофической скорости течения (в см/с) в слое 0–150 м. Оперение стрелы (в рисунок) – перенос вод на северо-восток, наконечник стрелы (из рисунка) – перенос вод на юго-запад. Внизу обозначены глубины, над которыми выделяются струи течения; (г) – T,S -соотношения для обоих разрезов вдоль центрального и восточного отрогов желоба Святой Анны. Сплошные линии – T,S -кривые для ст. 5033 и ст. 5037 восточного разреза. Пунктиры – T,S -кривые для двух выделенных струй северо-восточного переноса.



Детальная картина геострофических течений, рассчитанных по данным БСЗ “Рыбка”, вместе с T, S -соотношениями для обоих разрезов вдоль центрального и восточного отрогов желоба, приведена на рис. 4в и 4г. Видно, что на участке разреза между 77.2° и 77.6° с.ш. направленное на северо-восток течение не является когерентным, а состоит из двух близкорасположенных струй, скорость которых в тонком поверхностном 10-метровом слое составляет 20–25 см/с. Следует отметить, что картина геострофических течений, рассчитанных по данным STD-зондирований на станциях разреза, из-за большей дискретности (расстояние между станциями составляло порядка 10 миль) показывала не две, а одну струю течения поперек желоба. Таким образом, данные БСЗ “Рыбка” сыграли принципиальную роль в выявлении истинной структуры течений над восточным отрогом желоба.

Одна из струй на 77.3° с.ш. (рис. 4в), расположенная над верхней частью склона восточного отрога желоба и проникающая практически до дна, судя по T, S -соотношениям (рис. 4г), переносит на северо-восток преимущественно воды, характерные для юго-западной акватории Карского моря. Так, в ее глубинной части между 50 и 130 м наблюдается холодный промежуточный слой (ХПС) с температурой $-1.1...-1.3^\circ\text{C}$ и соленостью 34.0–34.5 psu (рис. 4а и 4б), весьма типичный для этой части моря [7]. Можно предположить, что данная струя является продолжением Ямальского и/или Восточного Новоземельского течения и не связана по происхождению с контурным течением в желобе Святой Анны.

Напротив, другая струя на $77.4^\circ-77.5^\circ$ с.ш., ядро которой расположено над более глубокой (190–200 м) частью склона и бароклинная составляющая которой не проникает глубже 100 м, имеет, по-видимому, принадлежность к контурному течению в желобе, поскольку переносит более теплую и соленую воду (рис. 4а и 4б). В ее пределах ХПС, присущий водам юго-западной части Карского моря, вырождается, однако появляются воды с залеганием холодного промежуточного слоя (арктический ХПС) на глубинах 160–240 м. Температура и соленость арктических промежуточных вод несколько выше ($-0.4...-0.6^\circ\text{C}$ и 34.7–35.0 psu соответственно), чем у промежуточных вод юго-западной части Карского моря [7].

Следует отметить, что на разрезе через восточный отрог желоба Святой Анны воды ПОС наблюдаются в поверхностном 10–20-м слое над верхней частью склона и распространяются лишь до области ядра струи контурного течения (северо-восточного переноса) у 77.4° с.ш. (рис. 4б и 4в). По-видимому, эта струя ограничивает дальнейшее продвижение опресненных вод к северу, и

поэтому фронтальная зона ПОС располагается именно здесь (рис. 5).

То, что в восточном отроге желоба Святой Анны не обнаружено глубоко проникающего контурного течения, означает отсутствие в придонном слое динамического барьера, препятствующего водообмену между отрогом и шельфовой областью моря. Возможно, именно этим объясняется наблюдаемое широкое распространение бентосных видов биоты Карского моря в восточном отроге и их единичное присутствие в центральном [1, 11], где таковой барьер существует (см. выше).

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОСТАНОВКИ ПРОФИЛОГРАФА “АКВАЛОГ”

Место постановки заякоренной буйковой станции с автономным зондом-профилографом “Аквалог” на перешейке между центральным отрогом желоба Святой Анны и Новоземельской впадиной показано на рис. 2. Профилограф был установлен во фронтальной зоне (рис. 2а и 2б), разделяющей относительно теплые и соленые воды контурного течения в желобе и относительно холодные и опресненные воды юго-западной части Карского моря. Координаты точки постановки: $76^\circ 32.5'$ с.ш., $71^\circ 39.9'$ в.д.; глубина места – 157 м; интервал зондирования – от 10 до 155 м. Прибор был установлен 28 сентября в 16:00 и поднят 30 сентября в 06:00. Он проработал, таким образом, чуть более полутора суток. Профилограф должен был проводить цикл (вверх–вниз) зондирования толщи вод каждый час со скоростью движения около 20 см/с, причем перерыв между его подъемом и опусканием был одинаковым. Однако из-за неисправности датчика давления, управляющего движением зонда, было выполнено всего 2 полноценных цикла зондирования в самом начале постановки 28 сентября (в период между 16:30 и 18:30) и еще 4 цикла – в конце постановки 29–30 сентября (в период между 19:00 и 04:30). Остальное время прибор находился у нижнего горизоннта 155 м, где периодически (раз в 20 минут) включался и на протяжении 3-х минут производил репрезентативные измерения скорости течения.

На рис. 6 представлены профили температуры, солености, модуля и направления скорости течения по данным измерения зонда-профилографа “Аквалог” в начальный период его работы. Видно, что до глубины 110 м зонд находился в относительно теплой воде, а глубже 120 м – в существенно более холодной, имеющей, скорее всего, карскоморское происхождение. Следует отметить, что, по данным измерений, перенос вод в верхнем 100-метровом слое имел преимущественно западное направление (соответствующее расчету геострофической скорости, представленному на рис. 2в), а в нижнем слое 120–155 м – се-

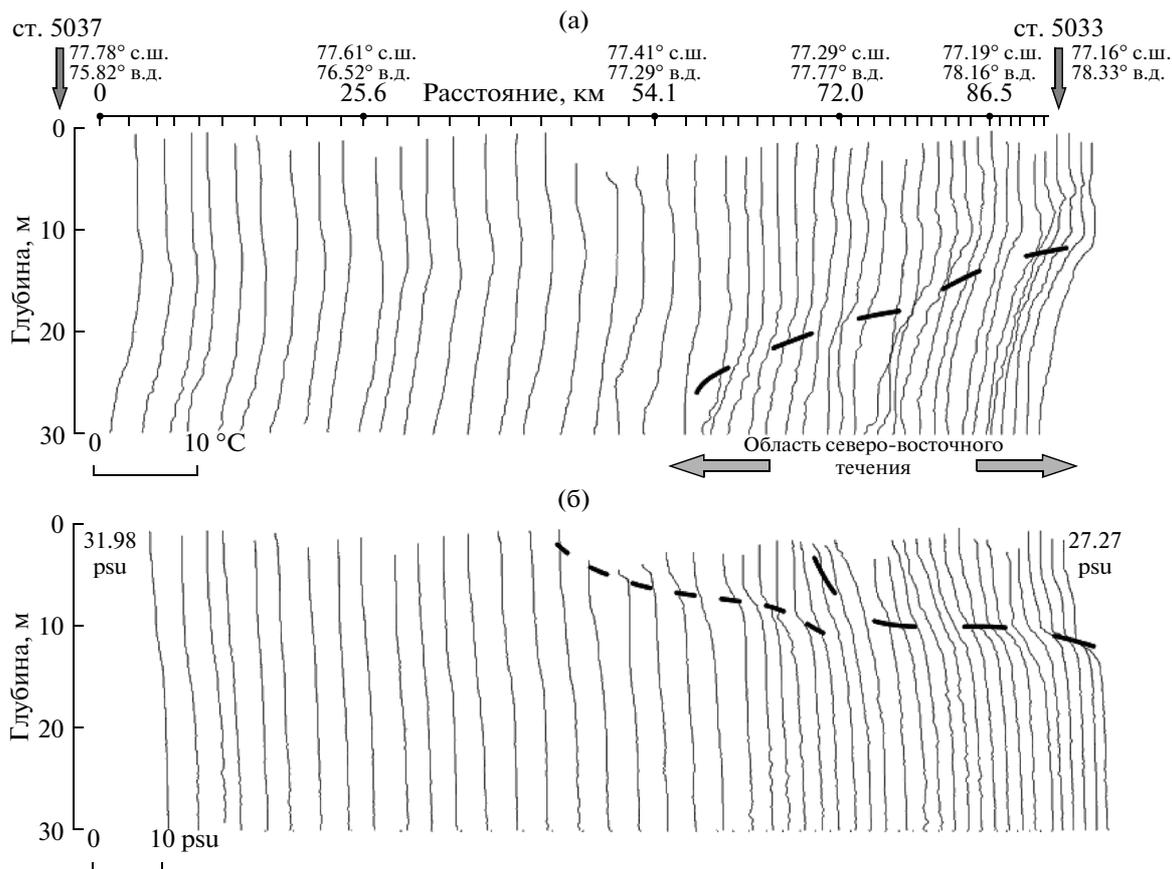


Рис. 5. (а) – Последовательное распределение вертикальных профилей температуры и (б) – солёности в слое 0–30 м по данным БСЗ “Рыбка” на участке разреза от ст. 5033 к ст. 5037 в восточном отроге желоба Святой Анны. Пунктир маркирует фронтальные разделы, связанные со струями северо-восточного переноса вод. Внизу – масштабы изменения температуры (°С) и солёности (psu) по вертикали.

верное. Другими словами, придонное течение было направлено поперек перешейка между Новоземельской впадиной и центральным отрогом желоба Святой Анна и могло осуществлять водообмен между ними. Однако для того, чтобы этот водообмен был бы существенным, течение должно иметь квазистационарный характер. Данные измерений за период более 36 часов, представленные на рис. 7, подтверждают, что придонное течение северного направления являлось достаточно продолжительным в сравнении с приливным циклом. При этом скорость северного переноса имела характерную величину 0.1–0.2 м/с и возрастала от начала к концу измерений (рис. 7). Видно, что направление течения сохранялось, несмотря на наличие колебаний, связанных с приливом и имеющих размах порядка 0.1 м/с. Схожие оценки скорости баротропной компоненты приливных течений для реальных координат точки постановки и моментов времени измерений течения с помощью ADCP, установленному на зонде-профилографе “Аквалог”, были получены при расчете по приливной модели Арктики [14].

Северный разрез через Новоземельскую впадину. Данный разрез выполнялся с помощью БСЗ “Рыбка” от побережья Новой Земли перпендикулярно берегу от 74°29' с.ш. до 73°56' с.ш. (рис. 1). Было выявлено, что над западным склоном Новоземельской впадины солёность в верхнем тонком 6–7-метровом слое оказалась значительно ниже (23–24 psu), чем над восточным склоном (около 29 psu) (рис. 8б).

С учетом того, что разрез начинался на глубине около 70 м примерно в 9 км от берега (ст. 5053), это можно объяснить как присутствием около Новой Земли в поверхностном слое опресненных таянием береговых ледников и снежников вод, так и распространением вдоль берега архипелага на юго-запад вод ПОС, опресненных стоком Оби и Енисея. По спутниковым снимкам, воды ПОС к сентябрю 2011 г. достигли Новой Земли и, вследствие геострофического приспособления, должно было возникнуть вдольбереговое течение юго-западного направления (см., например, [12, 15]), что и наблюдалось в действительности [4].

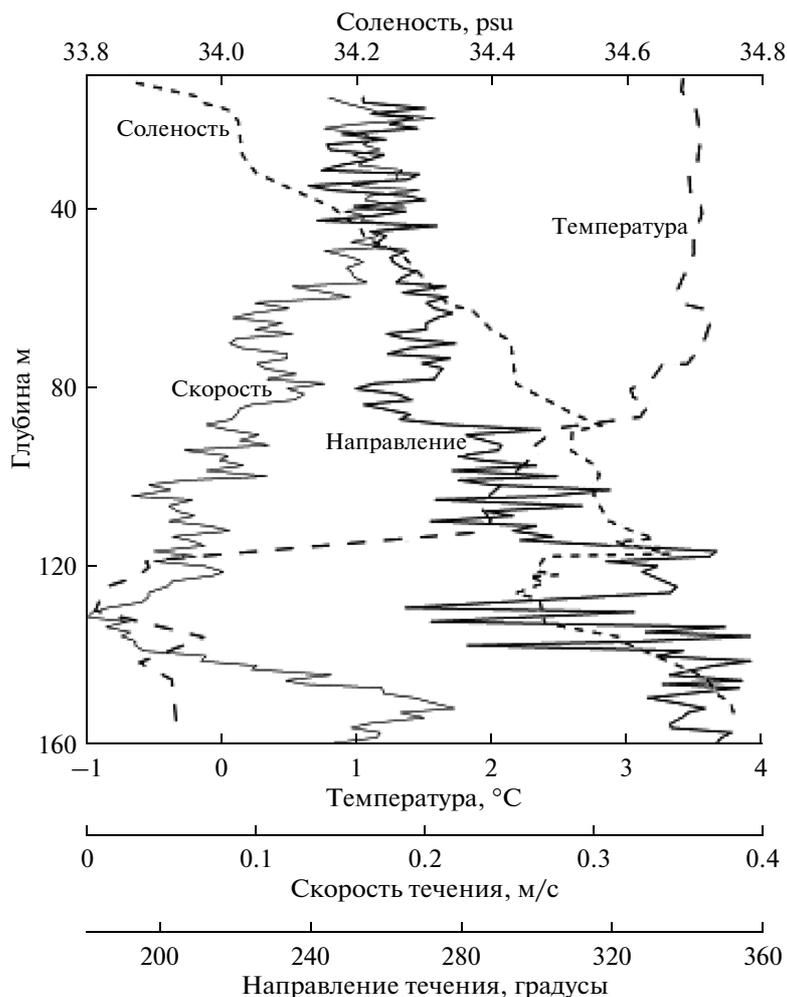


Рис. 6. Распределения температуры ($^{\circ}\text{C}$), солености (psu), направления (град) и скорости (м/с) течения в слое 10–155 м над перешейком между центральным отрогом желоба Святой Анны и Новоземельской впадиной по данным измерений профилографа “Аквалог”.

При изучении особенностей гидрохимической структуры вод в прибрежной зоне архипелага Новая Земля в сентябре 2007 г. было показано, что влияние берегового стока в верхнем 10-метровом слое сказывается на удалении вплоть до 20 км в море [6]. В нашем случае, в начале октября 2011 г., распространение опресненных вод от берега прослеживается в поверхностном слое значительно дальше — более чем на 40 км (рис. 8б). Примечательно, что более пресные воды на западной стороне Новоземельской впадины наблюдались и на другом поперечном разрезе, расположенном значительно южнее (рис. 1). Очевидно, подобное обстоятельство связано с существованием переноса в поверхностном слое вдоль Новой Земли опресненных вод (как Обь-Енисейских, так и сточных с берегов архипелага) к югу (Новоземельское течение по [2]), зафиксированного на спутниковых снимках, датируемых концом августа—началом сентября. После смены направления доминирую-

щего ветра с северных на южные румбы во второй декаде сентября можно было ожидать исчезновения следов опреснения над западным склоном впадины. Однако они наблюдались даже в начале октября, что может свидетельствовать о приспособлении фронтальных разделов ПОС к изменившемуся ветровому воздействию.

Геострофические течения на северном разрезе через Новоземельскую впадину, рассчитанные по данным БСЗ “Рыбка”, и T,S -соотношения для обоих разрезов (северного и южного) через впадину представлены на рис. 8в и 8г соответственно.

Характерной особенностью этого разреза является достаточно пестрая картина разнонаправленных геострофических течений, скорость которых не превышает 15 см/с. Практически во всей 200-метровой толще вод над центральной и восточной частями впадины доминировал юго-западный перенос со скоростью порядка 5–7 см/с, который не являлся когерентным, а состоял как

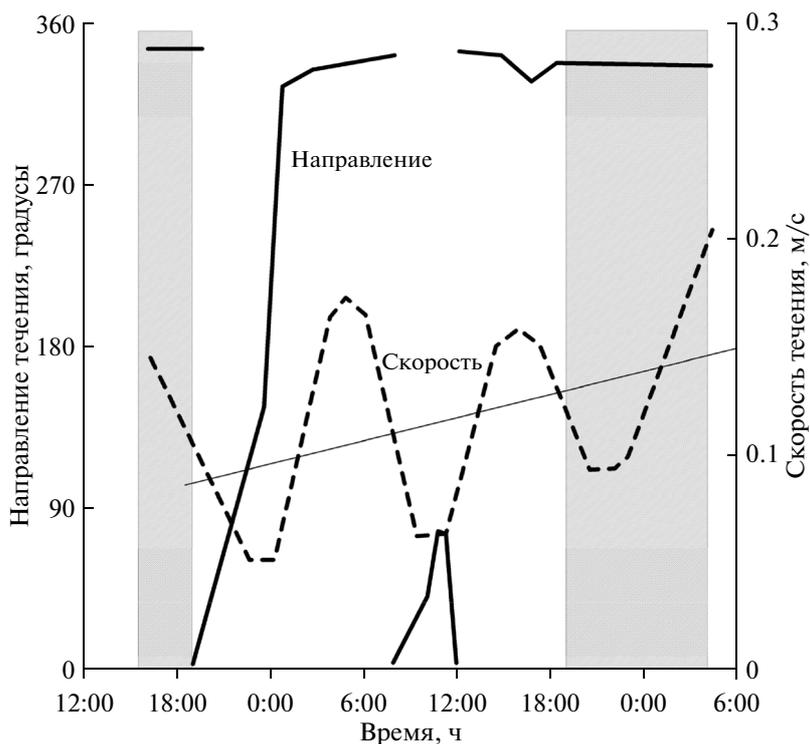


Рис. 7. Изменение во времени направления (град) и скорости (м/с) течения в придонном слое над перешейком между центральным отрогом желоба Святой Анны и Новоземельской впадиной по данным измерений профилографа “Аква-лог”. Заштрихованы периоды выполнения STD-зондирований в толще 10–155 м, тонкая линия — тенденция изменения скорости течения.

минимум из двух областей, разделенных противотечением (рис. 8в). Юго-западное течение с осью на 60.6° в.д. прослеживалось примерно до 100–120 м, скорость его у поверхности моря достигала 12–15 см/с. Другая область юго-западного переноса располагалась между 61° и 61.5° в.д., простиралась вглубь до 70–80 м и у поверхности характеризовалась скоростью 10–12 см/с. Северо-восточная струя противотечения на 60.9° в.д. была локализована лишь в 15-метровом поверхностном слое, где ее скорость составляла те же 10–12 см/с.

Над западным склоном впадины, на фоне наблюдаемого превалирования северо-восточного переноса, у 60° в.д., в полном соответствии со спутниковыми снимками, в поверхностном 15–20-метровом слое было зафиксировано юго-западное течение (Новоземельское по [2]), которое со скоростью 2–3 см/с переносило вдоль побережья Новой Земли опресненные воды. Наличие подобного медленного вдольберегового юго-западного переноса, охватывающего верхний 30-метровый слой, было отмечено ранее в [15].

Южный разрез через Новоземельскую впадину.

Как уже говорилось выше, на данном разрезе на западной стороне впадины в поверхностном слое было выявлено наличие менее соленой и более холодной воды, по сравнению с ее восточной сто-

роной (рис. 9а, 9б). Ясно, что опреснение и охлаждение поверхностного слоя прибрежных вод (разрез начинался примерно в 3 км от берега Новой Земли) происходило под влиянием стока с берегов залива талых вод, формирующихся в это время года при таянии находящихся там малых ледников и снежников. Подобное предположение об определяющем влиянии пресного стока с берегов архипелага нашло свое подтверждение в наблюдаемых здесь распределениях гидрохимических характеристик [10]. Действительно, если над западным склоном впадины (станции 5055–5057) в поверхностном 10-метровом слое была обнаружена вода с соленостью около 30 psu и температурой примерно 6.5°C , то с восточной ее стороны (ст. 5060) квазиоднородный слой расширился до 12–15 м, соленость воды в нем достигала 32.5 psu, а температура — почти 7°C . Нижележащий пикноклаклон распространялся до 25–30 м, при этом перепад значений термохалинных параметров на его границах составлял около $4\text{--}5^\circ\text{C}$ для температуры и примерно 2 psu по солености. Глубже соленость относительно плавно росла вплоть до 34.5 psu на глубинах 100–120 м, достигая значеный 34.7–34.8 psu у дна впадины.

Распределение температуры воды глубже градиентного слоя над западной и центральной частями впадины характеризовалось монотонным

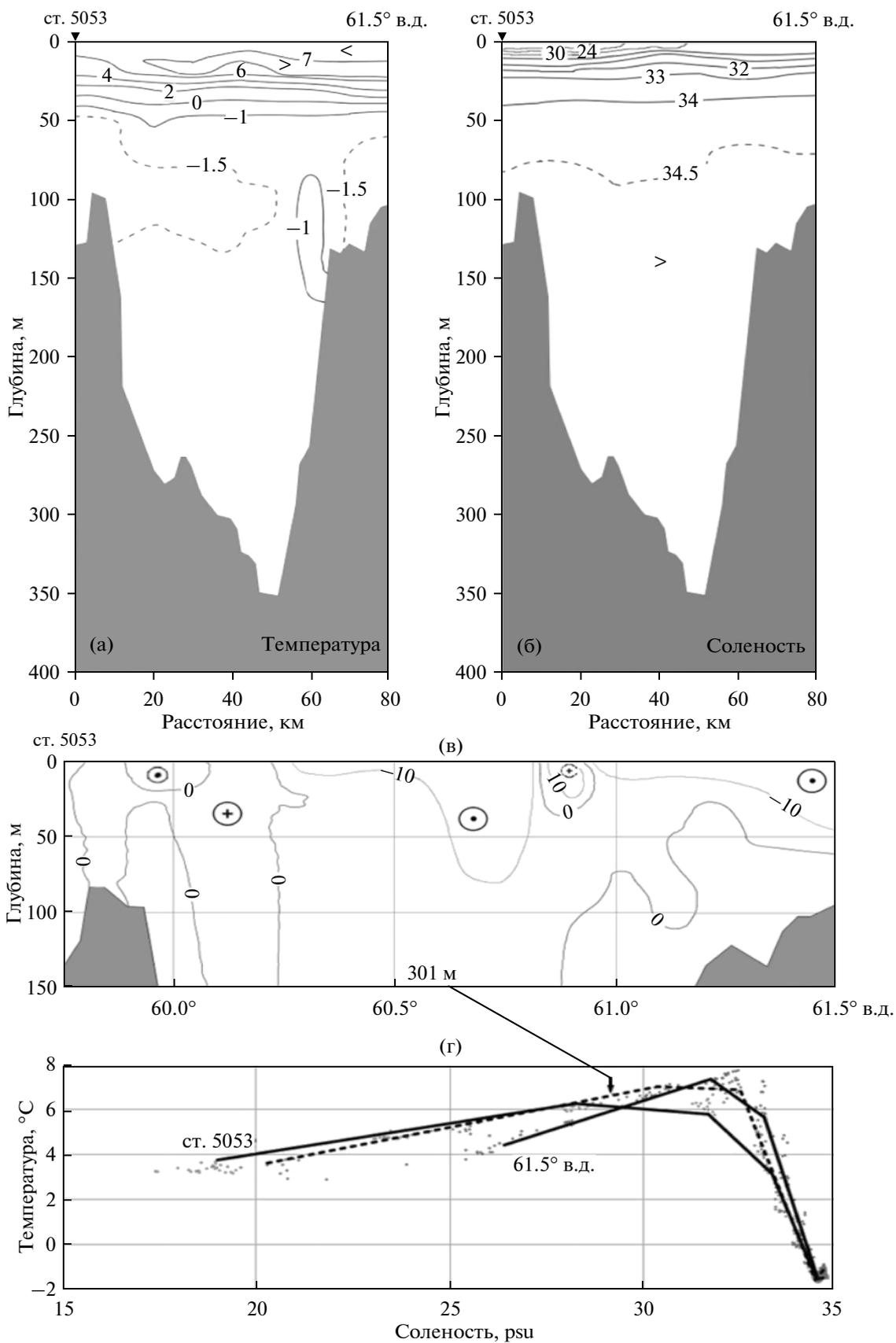


Рис. 8. Северный разрез через Новоземельскую впадину по данным БСЗ “Рыбка”:

(а) — температура, °С; (б) — соленость, psu; (в) — распределение геострофической скорости течения (в см/с) в слое 0–150 м. Оперение стрелы (в рисунок) — перенос вод на северо-восток, наконечник стрелы (из рисунка) — перенос вод на юго-запад. Внизу обозначена глубина, над которой преобладает юго-западный перенос; (г) — T, S -соотношения для обоих разрезов (северного и южного) через впадину. Сплошные линии — T, S -кривые для начала (ст. 5053) и конца (61.5° в.д.) разреза. Пунктир — T, S -кривая для области юго-западного переноса.

ее уменьшением до -1.7 °С на глубинах 60–80 м. Такая холодная и слегка опресненная вода образовалась, вероятно, в процессе зимней конвекции в присклоновой области шельфа. На восточном же склоне котловины глубже пикно-халоклина примерно до глубины 200 м прослеживалась более теплая и соленая вода баренцевоморского происхождения (рис. 9а, 9б).

На западной стороне впадины, на удалении 10–15 км от начала разреза (ст. 5055), во всей толще вод над глубинами 100–125 м было зафиксировано геострофическое течение юго-западного направления, скорость которого, однако, не превышала 2–3 см/с (рис. 9в, см. также [15]). Над восточным склоном впадины в верхнем 50-метровом слое отмечался перенос вод на юго-запад со скоростью до 7–9 см/с. Глубже, вплоть до дна наблюдалось слабое (2–3 см/с) северо-восточное течение, которое и переносило с юга более теплую и соленую баренцевоморскую воду (рис. 9а, 9б). Это подтверждается и T, S -кривыми, представленными на рис. 9г. Так, например, температура и соленость в диапазоне глубин от 50 до 100 м для станций 5059 и 5060 над восточным склоном впадины имеют значения существенно большие, чем для станций 5055–5057 над ее западным склоном. Следует отметить, что формирование подобного подповерхностного северо-восточного течения вдоль восточного склона Новоземельской впадины, которое сливалось с основной ветвью потока баренцевоморских вод, втекающих в море через пролив Карские Ворота, было получено при расчетах летней циркуляции [15], а также наблюдалось в лабораторной модели [12].

Можно заключить, что циркуляция вод в Новоземельской впадине, по сравнению с желобом Святой Анны, является слабой и характеризуется довольно пестрой структурой течений. При этом, как правило, над восточным склоном впадины превалирует северо-восточный перенос, а над западным склоном — юго-западный. Однако на основании полученных данных нельзя с уверенностью говорить о существовании осенью 2011 г. когерентной струи Восточного Новоземельского течения и судить о его направлении.

ВЫВОДЫ

1. В центральном отроге желоба Святой Анны обнаружено, как и ранее, в 2007 г., достаточно сильное геострофическое течение (со скоростью

до 0.35 м/с) над глубинами 150–300 м. Данное течение (вероятно, контурное и топографически привязанное) может играть роль динамического барьера и препятствовать проникновению вод из юго-западной части Карского моря в высокие широты.

2. В восточном отроге желоба Святой Анны наблюдалось существенно более слабое и менее баротропное течение, которое не могло представлять преграды на пути распространения шельфовых вод Карского моря к северу. Возможно, именно этим объясняется широкое распространение пелагических и бентосных видов карско-морской биоты в восточном отроге желоба и их единичное присутствие в центральном, где таковой барьер существует.

3. По данным заякоренного автономного зонда-профилографа “Аквалог” на перешейке между Новоземельской впадиной и центральным отрогом желоба Святой Анны в придонном 20–30-м слое на протяжении более 1.5 суток периода наблюдений существовало устойчивое течение северного направления, переносящее холодную (около -1 °С) и соленую (34.6–34.7 psu) воду. Этот факт может свидетельствовать о существовании в придонном слое ограниченного водообмена между Новоземельской впадиной и центральным отрогом желоба Святой Анны. Кроме того, прямое измерение скорости течения подтвердило наличие в верхней 120-метровой толще над перешейком юго-западного переноса вод, выявленного первоначально по геострофическим расчетам.

4. Над западным склоном Новоземельской впадины, на акватории между 72.5° и 74.5° с.ш. вдоль побережья Новой Земли в тонком поверхностном 10-метровом слое была обнаружена более пресная и холодная вода, происхождение которой связано как со стоком с берегов архипелага талых вод с находящихся там малых ледников и снежников, так и с водами ПОС, достигшими Новой Земли к началу сентября.

5. Перенос опресненных вод (как Обь-Енисейских, так и сточных с берегов архипелага) вдоль берега Новой Земли с севера на юг осуществляется над западным склоном Новоземельской впадины поверхностным течением, которое было выражено, судя по спутниковым данным, в период с середины августа по первую декаду сентября.

6. В южной части Новоземельской впадины над восточным ее склоном глубже пикно-халоклина и примерно до глубины 200 м прослежи-

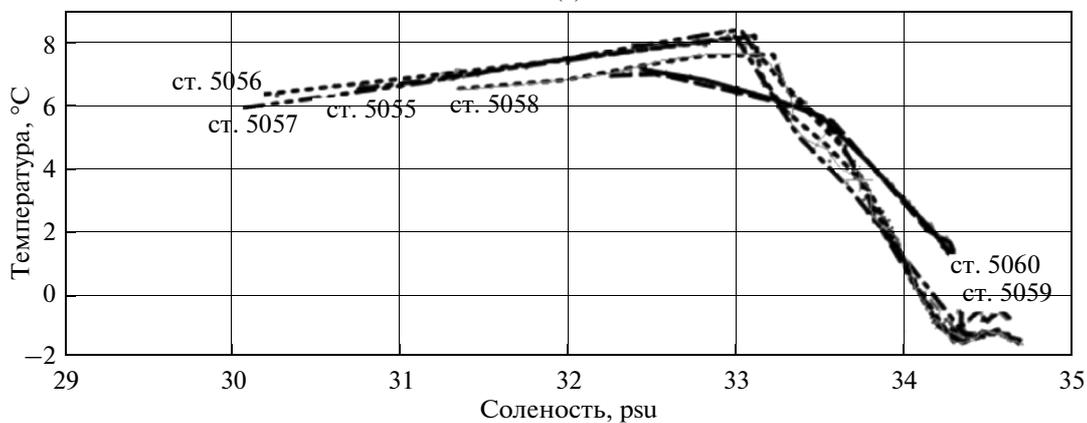
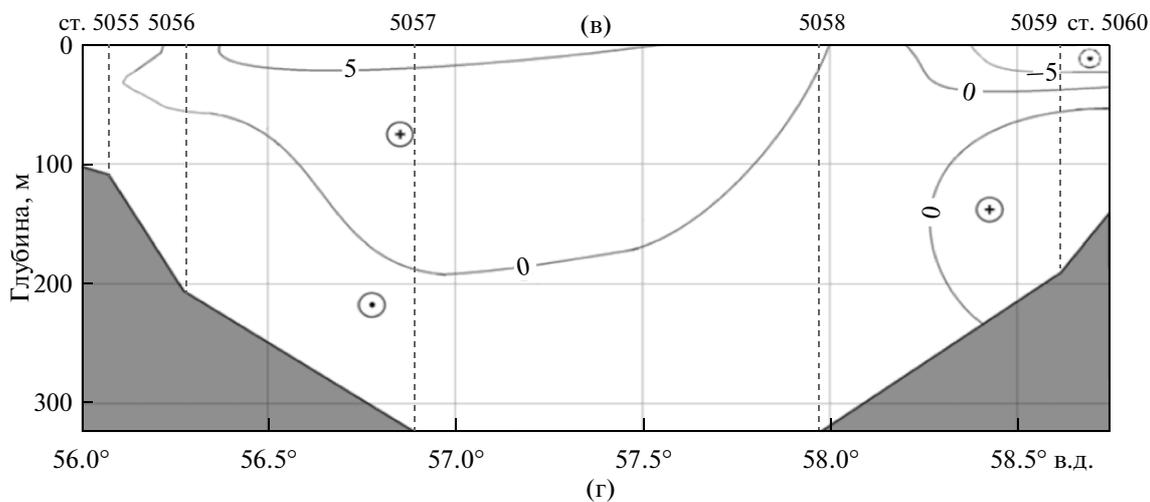
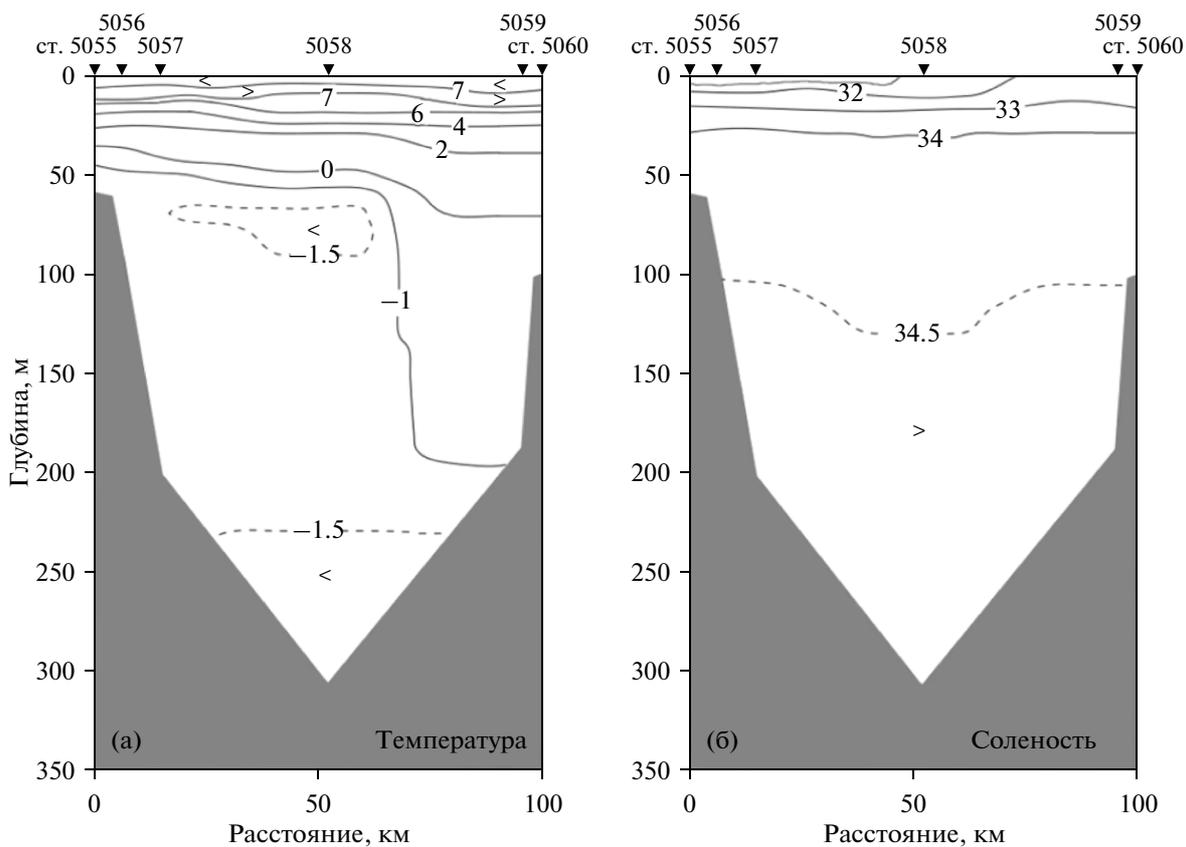


Рис. 9. Южный разрез через Новоземельскую впадину по данным STD-зондирований на станциях: (а) — температура, °С; (б) — соленость, psu; (в) — распределение геострофической скорости течения (см/с). Оперение стрелы (в рисунок) — перенос вод на северо-восток, наконечник стрелы (из рисунка) — перенос вод на юго-запад; (г) — T,S -кривые станций разреза.

валась относительно теплая и соленая вода баренцево-морского происхождения. В северной части впадины эта водная масса не была обнаружена.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проекты №14-17-00681, полевые исследования и №14-50-00095, обработка материалов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галкин С.В., Веденин А.А., Минин К.Я. и др. Макробентос южной части желоба Святой Анны и прилегающих районов Карского моря // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 677–686.
2. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Мысль, 1965. 351 с.
3. Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В. и др. Поверхностный опресненный слой в Карском море // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 698–708.
4. Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Кубряков А.А. и др. Распространение и трансформация вод поверхностного опресненного слоя в Карском море // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 502–513.
5. Зацепин А.Г., Морозов Е.Г., Пака В.Т. и др. Циркуляция вод в юго-западной части Карского моря в 2007 г. // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 683–697.
6. Маккавеев П.Н., Полухин А.А., Хлебонашев П.В. Поверхностный сток биогенных элементов с берега залива Благополучия (архипелаг Новая Земля) // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 5. С. 610–617.
7. Никифоров Е.Г., Шнайхер А.О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 269 с.
8. Островский А.Г., Зацепин А.Г., Иванов В.Н. и др. Заякоренная профилирующая океанская обсерватория // *Подводные исследования и робототехника*. 2009. № 2/7. С. 50–59
9. Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьев В.А. и др. Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 2. С. 259–268.
10. Полухин А.А., Маккавеев П.Н., Хлебонашев П.В. Биогенный сток с Новой Земли в Карское море // *Геология морей и океанов: Материалы XX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии*. Т. IV. М.: ГЕОС, 2013. С. 97–101.
11. Флинт М.В., Дриц А.В., Арашкевич Е.Г. и др. Структура зоопланктонных сообществ в области континентального склона западного отрога желоба Святой Анны // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 643–655.
12. McClimans T.A., Jonson D.R., Krosshavn M. et al. Transport processes in the Kara Sea // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № C6. P. 14,121–14,139.
13. Ostrovskii A.G., Zatsepin A.G. Short-term hydrophysical and biological variability over the north-eastern Black Sea continental slope as inferred from multiparametric tethered profiler surveys // *Ocean Dynamics*. 2011. V. 61. P. 797–806.
14. Padman L., Howard S., Erofeeva L. Arctic Barotropic Tide Model // www.esr.org/ptm_index.html
15. Pantelev G., Proshutinsky A., Kulakov M. et al. Investigation of the summer Kara Sea circulation employing of variational data assimilation technique // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. № C04S15. doi: 10.1029/2006JC003728.
16. Pavlov V.K., Pfirman S.L. Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution // *Deep-Sea Res. Pt. II*. 1995. V. 42. № 6. P. 1369–1390.

Hydrophysical Features of Deep Water Troughs in the Western Kara Sea

A. G. Zatsepin, S. G. Poyarkov, V. V. Kremenetskiy, A. A. Nedospasov, S. A. Shchuka, V. I. Baranov, A. A. Kondrashov, A. O. Korzh

In the 59th cruise of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh” (September–October, 2011) large amount of hydrophysical data was obtained by the usage of an arsenal of measuring technical means. The data allow to study dynamics and hydrological structure of deep-sea troughs of the western part of the Kara sea with high spatial resolution. Particularly, the analysis of this material showed the existence of the penetrating to the bottom cyclonic jet in the central spur of the trough of St. Anne that separates the waters of the Kara Sea origin from the waters of the Arctic origin. Thus, this jet plays a role of a dynamic barrier that prevents the penetration of water from the southwestern part of the Kara Sea to the high latitudes. In the eastern spur of the trough of St. Anne’s the jet weakens and becomes less barotropic and could no longer be a barrier to the spreading of the shelf waters of the Kara Sea to the north. Weak and not coherent currents were recorded in the Novaya Zemlya trough, in the southern part of which the waters of the Barents Sea origin were traced.