

ХОЛОДНЫЕ ШЕЛЬФОВЫЕ ВОДЫ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ ЛЕТОМ 2013 г.

*д-р физ.-мат. наук Л.А. ТИМОХОВ¹, канд. геогр. наук А.Ю. ИПАТОВ¹,
д-р Е. ХЁЛЕМАНН², д-р М. ЯНУТ², д-р Х. КАССЕНС³*

¹ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: ltim@aari.nw.ru

² — Институт морских и полярных исследований им. Альфреда Вегенера (AWI), Германия, e-mail: Jens.Hoelmann@awi.de, markus.janout@awi.de

³ — Институт морских наук (GEOMAR), Германия, e-mail: hkassens@geomar.de

Приводятся общие закономерности распределения температуры и солености в зимний и летний периоды на шельфе моря Лаптевых, осредненные для исторического периода 1950–1993 гг.

По данным российско-германской экспедиции «ЛАПЭК-2013/TRANSDRIFT-XXI» термохалинное состояние моря Лаптевых летом 2013 г. отличалось от климатического как в поверхностном слое, так и в придонном. На шельфе глубже 40 м сохранялась холодная вода с температурой от $-1,51$ до $-1,76$ °С и соленостью от 33,92 до 34,44 ‰. Толщина холодного слоя над бровкой склона шельфа составляла 28–53 м.

Конфигурации объема холодной шельфовой воды на шельфе и за бровкой шельфа на меридиональных гидрологических разрезах, построенных по данным уникальной мезомасштабной U-STD-съемки, указывают на бифуркацию слоя холодной шельфовой воды за бровкой шельфа. Верхняя часть слоя продолжала распространяться на север на горизонтах 40–50 м в Арктический бассейн, а вторая часть слоя сползала по склону шельфа в глубоководную часть бассейна.

Факты, установленные по историческим данным и исследованиям российско-германской экспедиции «ЛАПЭК-2013/TRANSDRIFT-XXI», позволяют сделать вывод о том, что холодные шельфовые воды моря Лаптевых как пополняют холодный нижний халоклин глубоководной части океана, так и служат источником формирования придонного слоя на материковом склоне.

Ключевые слова: море Лаптевых, холодные шельфовые воды, бифуркация слоя холодных шельфовых вод за бровкой шельфа, холодные шельфовые воды как источник пополнения холодного халоклина и донных вод материкового склона.

ВВЕДЕНИЕ

Холодные шельфовые воды составляют значительную часть термохалинной структуры арктических морей. Они выполняют важную роль в процессе вентиляции и обновления придонного слоя, а также занимают важное место в проблеме взаимодействия арктических морей и Арктического бассейна. По мнению многих ученых, шельфовые воды подпитывают слой промежуточных вод между верхним халоклином и подстилающими его водами атлантического происхождения, а в некоторых районах, опускаясь по материковому склону и трансформируясь, служат источником обновления донных вод Арктического бассейна (Никифоров, Блинов, Лукин, 1979; Aagaard, Coachman, Carmack, 1981; Rudels, Anderson, Jones, 1996).

Вместе с тем в научной литературе редко встретишь публикации, посвященные вопросу формирования и распределения в сезонном цикле холодных вод на шельфе арктических морей. Одной из причин такого положения является то обстоятельство, что в зимний период океанографические наблюдения немногочисленны и пространственное разрешение наблюдений, достигающее 150–200 км между станциями, является значительным ограничением для анализа пространственного распределения и вертикальной структуры этого слоя. Исключения составляют три океанографические съемки, выполненные в западной части моря Лаптевых (Головин, 2005; Walsh et al., 2007). Наблюдения в летний период более многочисленны, и пространственное разрешение на океанографических разрезах и площадных съемках в большинстве случаев составляло около 50 км, а в некоторых случаях и меньше. Тем более удивительно, что холодные воды в летний период, как самостоятельная структура гидрологического режима, не привлекли должное внимание исследователей. Поэтому исследования мезомасштабного распределения температуры и солености на океанографических разрезах в море Лаптевых, выполненные летом 2013 г. российско-германской экспедицией «ЛАПЭК-2013/TRANSDRIFT-XXI» с применением новой технологии зондирования, являются новаторскими и актуальными.

В данной статье по историческим данным приводятся общие сведения о холодных шельфовых водах зимой и летом. Во второй части описывается термохалинное состояние моря Лаптевых летом 2013 г. В третьей части анализируется состояние шельфовых зимних вод в летний период по данным экспедиции 2013 г., описывается структура, приводится детальная конфигурация слоя на океанографических разрезах, даются оценки некоторых характеристик слоя и обсуждается режим холодных вод.

ХОЛОДНЫЕ ВОДЫ НА ШЕЛЬФЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ ПО ИСТОРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Холодные шельфовые воды образуются зимой в результате конвекции при охлаждении и осолонении морской воды в период образования льда, которое в арктических морях наблюдается с конца сентября до середины мая. Но осолонение поверхностного слоя происходит и до середины июня при наличии льдов вследствие того, что при повышении температуры льда и воздействии солнечной радиации в порах льда возникает гравитационная миграция соли и происходит выделение ее из ледяной колонки в приледный слой морской воды.

На мелководье конвекция чаще всего достигает дна, образуя в зимний период квазиоднородный слой с температурой, близкой к температуре замерзания. По данным океанографических съемок экспедиций «Север» (Фролов и др., 2005), в марте–мае в юго-западной западной части моря Лаптевых гомогенность от поверхности до дна наблюдалась почти всюду в районах с глубинами меньше 40 м (южнее широты 76° с.ш.) в 1965, 1975–1976, 1980–1981, 1983, 1990 гг. В апреле и мае 1965 и 1969 гг. вертикальное распределение температуры и солености практически не менялось от нижней поверхности льда до дна (вертикальные профили 2 и 3 на рис. 1).

В марте и апреле 1976 и 1984 гг. (профили 1 и 4 на рис. 1) в западной части моря конвекция распространилась только до глубины 20 м и соленость в поверхностном слое была на 1–2‰ меньше, чем в 1965 и 1969 гг. В центральной части моря Лаптевых, которая и в зимний период подвержена влиянию стока реки Лены, конвективный слой в апреле 1969 г. наблюдался только до глубины 25 м и соленость в слое конвекции была меньше, чем в западной части моря (вертикальный профиль 5 на рис. 1). В более глубоких районах вертикальная структура была более сложной.

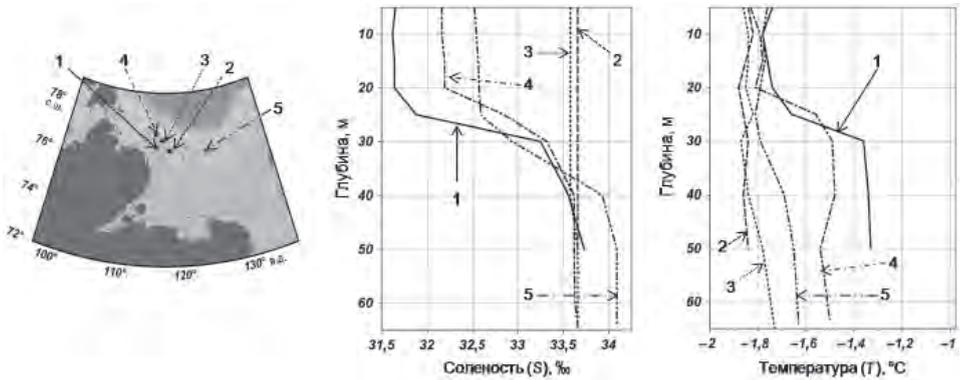


Рис. 1. Вертикальные профили солёности и температуры на шельфе моря Лаптевых в конце зимы по данным наблюдений экспедиций «Север» в различные годы. Дата выполнения и координаты (долгота/широта) океанографических станций следующие: 1 — 27 марта 1976 г., 115,00° в.д., 76,80° с.ш.; 2 — 5 апреля 1965 г., 117,50° в.д., 76,70° с.ш.; 3 — 5 мая 1969 г., 116,00° в.д., 77,20° с.ш.; 4 — 5 апреля 1984 г., 114,80° в.д., 77,40° с.ш.; 5 — 6 апреля 1969 г., 124,30° в.д., 76,60° с.ш.

Общее представление о термохалинной структуре вод на шельфе дают TS -диаграммы на рис. 2, построенные для зимнего (февраль–май) и летнего (июль–сентябрь) сезонов по данным наблюдений в 1950–1993 гг. в западной и центральной частях моря Лаптевых, ограниченных широтами 75–78° с.ш. и долготами 105–130° в.д.

В зимний период (рис. 2а) распределение точек имеет две отличительные области. Вдоль кривой температуры замерзания ($T_{\text{зам}}$) в диапазоне температуры от $T_{\text{зам}}$ до ($T_{\text{зам}} + (0,3...0,4 \text{ } ^\circ\text{C})$) и солёности от 22 до 35 ‰ располагаются точки измерений на

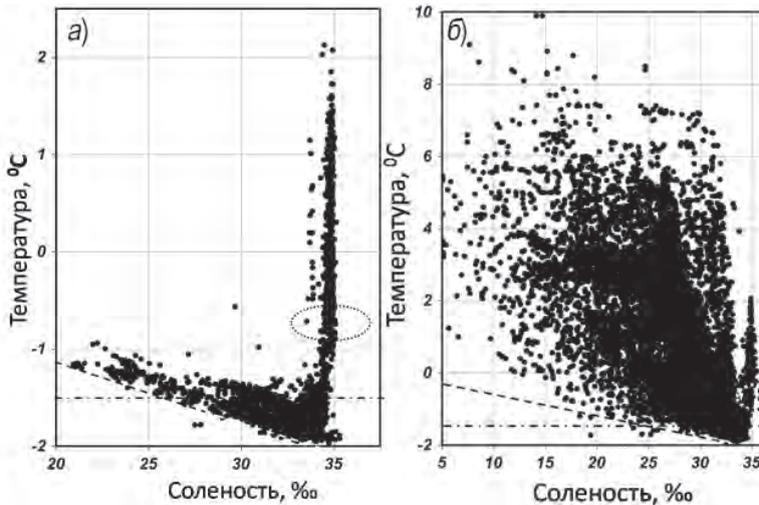


Рис. 2. Температурно-солёностные диаграммы (TS -диаграммы) для зимнего (а) (февраль–май) и летнего (б) (июль–сентябрь) сезонов по данным наблюдений 1950–1993 гг. экспедициями «Север» и «Ледовый патруль» и другими экспедициями в районе моря Лаптевых, ограниченном широтами 75–70° с.ш. и долготами 105–130° в.д. Пунктирной линией обозначена кривая температуры замерзания при данной солёности. Штрих-пунктирной линией показана температура $-1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$.

шельфе. Напомним, что температура замерзания при солености 28 ‰ равна $-1,52\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при солености 34,4 ‰ — $-1,93\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В области значений солености 33–34 ‰ и температуры ниже $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ облако точек делает резкий изгиб вверх. Эта группа точек в интервале значений солености 34,5–35 ‰ и температуры от $-1,5$ до $2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ относится к склону шельфа и глубоководной части моря, где наблюдаются атлантические воды с температурой выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отметим, что воды халоклина Арктического бассейна определяются на *TS*-диаграмме как совокупность точек с температурой от $-1,5$ до $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ в интервале солености 33,0–34,5 ‰ (Morison, Steele, Anderson, 1998). Из рис. 2а следует, что в зимний период холодные воды на шельфе имеют более широкий диапазон изменения температуры и солености. Поскольку установленные по *TS*-диаграмме на рис. 2 интервалы температуры и солености воды на шельфе совпадают с интервалами температуры и солености для холодного нижнего халоклина в Арктическом бассейне, то можно заключить, что шельфовые воды западной части моря Лаптевых могут служить одним из источников формирования холодного нижнего халоклина Арктического бассейна (Никифоров, Блинов, Лукин, 1979; Rudels, Anderson, Jones, 1996). Такой же вывод сделан и в работе (Vauch et al., 2011) на основе анализа распределения изотопа кислорода-18.

В летний период разброс точек на *TS*-диаграмме на рис. 2б значительно больший, чем в зимний период. Основная масса точек с температурой ниже $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ сосредоточена в интервале солености от 28,0 до 34,5 ‰. Более легкая вода с соленостью меньше 33 ‰ подвергается значительной трансформации от зимы к лету.

Для получения общих представлений об изменчивости термохалинной структуры с юга на север были построены меридиональные разрезы температуры и солености по всем историческим данным 1950–1993 гг. в полосе 35 км, выбранной между долготами 112 и 116° в.д. Несмотря на асинхронность данных наблюдений, вошедших в построение разрезов, удается установить общие закономерности широтного распределения температуры и солености в зимний и летний периоды на шельфе моря Лаптевых.

В зимний период в южной части разреза от широты 75° 30' до 75° 50' вертикальное распределение температуры и солености было близким к гомогенности (рис. 3, левая колонка). В остальной части разреза температура слабо повышалась с глубиной, а соленость увеличивалась. Температура водной колонки на шельфе была всюду ниже $-1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, причем до широты 76,30° с.ш. наблюдаемая температура была равна или на 0,01–0,02° выше температуры замерзания. Соленость в придонной части от южной станции до бровки шельфа изменялась в пределах 33–34 ‰. За бровкой шельфа глубже 80 м температура воды быстро повышается, и на глубине 150 м отмечается присутствие воды атлантического происхождения. Грубое пространственное разрешение не позволяет установить, касается ли атлантическая вода склона шельфа или между дном и атлантической водой по склону шельфа сползает холодная и более плотная шельфовая вода.

В летний период за счет распреснения и нагревания формируется поверхностный слой и сезонный халоклин и совпадающий с ним пикноклин. Но глубже 40 м на шельфе сохраняется холодная вода с температурой ниже $-1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и соленостью более 33 ‰ (рис. 3, правая колонка). Обратим внимание на конфигурацию изотермы $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, которая начинается в придонной части на широте около 75° с.ш. и фиксируется до бровки склона шельфа. Но затем ветвь воды с температурой ниже $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и соленостью 34–34,3 ‰ продолжается на север на горизонтах 40–50 м. Этот факт

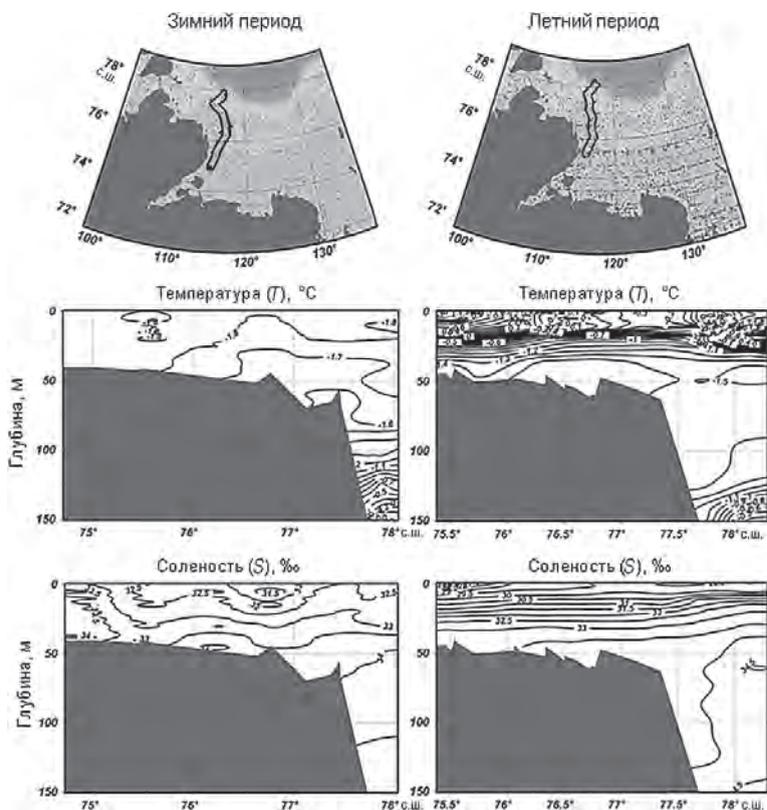


Рис. 3. Распределение океанографических станций и положение разрезов в полосе 35 км (черная линия) (верхний ряд), разрезы температуры (средний ряд) и солёности (нижний ряд) для зимнего (февраль–май, левая колонка) и летнего (июль–сентябрь, правая колонка) периодов, построенные по историческим данным 1950–1993 гг.

может служить указанием на адвекцию в Арктический бассейн шельфовой воды, пополняющей холодный нижний халоклин. При этом солёность воды этой ветви летом близка к солёности шельфовой воды в зимний период, а ее температура к лету повысилась на $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Конфигурация объема воды за бровкой шельфа между изотермами $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ на глубинах до 100–120 м и особенно опускание изохалины 34 ‰ по склону шельфа до глубины 120 м и затем ее поднятие указывают на сползание холодных шельфовых вод по склону шельфа. Это обстоятельство дает основание полагать, что шельфовые воды в трансформированном виде образуют придонный слой между атлантической водой и дном склона шельфа.

ТЕРМОХАЛИННОЕ СОСТОЯНИЕ МОРЯ ЛЕТОМ 2013 Г.

Российско-германская экспедиция «ЛАПЭКС-2013/TRANSDRIFT-XXI» в сентябре 2013 г. использовала свободно падающий STD-сенсор Underway CTD для измерения температуры, солёности морской воды, гидростатического давления по ходу движения судна между океанографическими станциями. Технические характеристики зонда производства фирмы Seabird, США таковы: точность измерения температуры — $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$, электропроводности — $0,03\text{ См/м}$, гидростатического давления — 4 дБ, раз-

решение по температуре 0,002 °С, по электропроводности 0,0005 См/м, по давлению 0,5 дБ. Измерения температуры и солености с помощью Underway CTD производились через 2–10 км, что позволило впервые получить на океанографических разрезах мезомасштабную термохалинную структуру толщи моря. На рис. 4 приведено положение океанографических станций и обозначены номера океанографических разрезов (P1–P5). Для анализа вертикальной структуры выбраны мелководные океанографические станции A₂, A₃, A₄; станции вблизи бровки шельфа B₂, B₃, B₄ и станции V₂, V₃, V₄ на северной окраине меридиональных разрезов P2, P3 и P4.

В вертикальной колонке морской воды по данным измерений летом 2013 г. выделяются следующие основные структуры: поверхностный слой, халоклин, придонный холодный слой на шельфе, термоклин и атлантические воды в глубоководной части моря.

Поверхностный слой, в котором вертикальные распределения температуры и солености были однородными или квазиоднородными (рис. 3) и градиент плотности слабо менялся по вертикали, занимал верхнюю часть моря до глубины 4–10 м. Температура и соленость воды в слое менялись в пределах соответственно 1,8–4,7 °С и 24–30 ‰ в южной части моря; 0,9–3,6 °С и 28–30 ‰ на бровке шельфа и 0,5–3,7 °С и 28–31 ‰ на севере моря.

Начало слоя халоклина определяется по глубине залегания максимального градиента плотности воды. Халоклин заканчивался на глубинах 30–40 м на шельфе моря, 40–60 м на бровке шельфа и 100–120 м в глубоководной части моря.

Отметим особенность вертикального распределения температуры в верхней части халоклина. На южной станции A₂ отмечалось повышение температуры воды с глубиной с максимумом 2,55 °С на горизонте 12 м. Инверсия температуры на глубинах 10–19 м наблюдалась также на станциях B₂, V₂ в средней и северной части меридионального разреза P2 и на северной станции V₃ разреза P3, как это видно из вертикальных профилей температуры на рис. 5. Можно предположить, что к моменту выполнения океанографических измерений инверсия температуры образовалась вследствие охлаждения поверхностного слоя после максимального прогрева. На

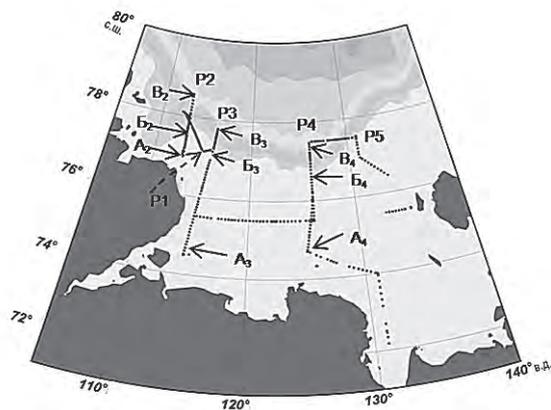


Рис. 4. Схема станций, выполненных экспедицией «ЛАПЭКС-2014/ТРАНСДРИФТ-XXI» в море Лаптевых со 2 по 17 сентября 2013 г. На карте стрелками указаны станции на меридиональных разрезах P2, P3, P4, для которых приводится анализ вертикальных профилей температуры и солености: A₂, A₃, A₄ — станции на шельфе моря; B₂, B₃, B₄ — станции вблизи бровки шельфа; V₂, V₃, V₄ — станции на северной окраине океанографических разрезов.

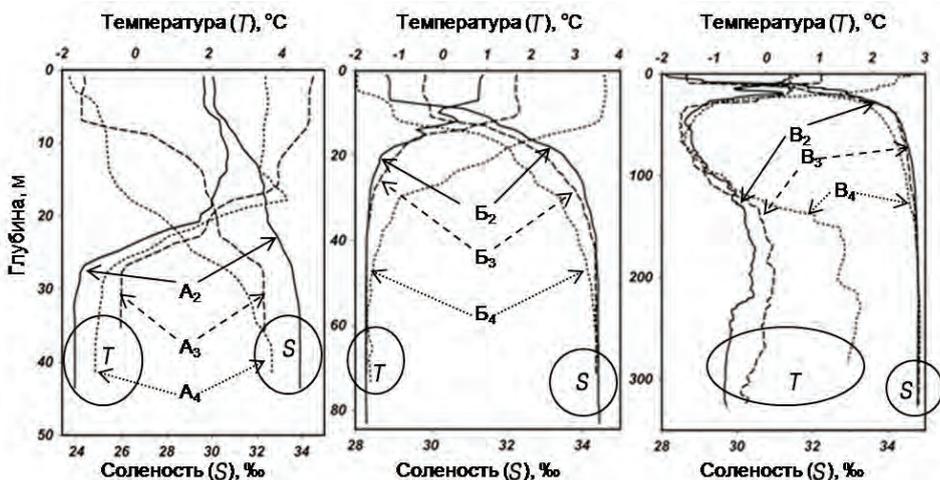


Рис. 5. Вертикальные профили температуры, солёности в различных точках меридиональных океанографических разрезов P2, P3, P4: A_2, A_3, A_4 — на шельфе моря на глубинах 50 м; B_2, B_3, B_4 — вблизи бровки шельфа на глубинах 70 м; B_2, B_3, B_4 — на северных окраинах океанографических разрезов. Положение станций указано на рис. 4.

глубине 21 м наблюдался второй скачок плотности и солёности, а также максимальный градиент температуры воды. Это указывает на то, что в период максимального прогрева моря, происходившего в августе, толщина верхнего слоя достигала 21 м.

Под халоклином на шельфе на станции A_2 в придонной части на глубинах 35–45 м температура и солёность менялись слабо в пределах $-1,67... -1,68$ °C и 33,92–34,01 ‰. Этот 10-метровый слой представляет собой остаток слабо трансформированных шельфовых вод, образовавшихся предыдущей зимой в результате конвекции при охлаждении и увеличении солёности поверхностных вод за счет льдообразования и нарастания толщины льда. На это указывает также малое отличие наблюдаемой температуры от температуры замерзания при данной солёности, разность которых составила 0,21–0,23 °C.

Донный слой толщиной 4–8 м на станциях A_3 и A_4 , расположенных в южной части моря, был довольно однородным по температуре $-0,37... -0,40$ °C и $-1,09$ °C, а солёность менялась в пределах 32,35–32,39 ‰ и 32,62–32,68 ‰. Как видим, характеристики значительно отличаются от таковых на станции A_2 . Вероятно, летние процессы вызвали значительную трансформацию придонного слоя, повысив температуру воды и уменьшив солёность.

На бровке шельфа на разрезе P2 по меридиану 112° в.д. (станция B_2) однородный придонный слой располагался от горизонта 39 м до дна (84 м), температура и солёность в нем менялась от $-1,73$ °C и 34,34 ‰ на верхней границе (39 м) до $-1,75$ °C и 34,45 ‰ у дна. Разность между наблюдаемой температурой и температурой замерзания была равна 0,18 °C и 0, 20 °C соответственно для верхней границы и дна. В придонном 40-метровом слое на станции B_3 температура и солёность менялись от $-1,74$ °C и 34,34 ‰ на верхней границе 43 м до $-1,74$ °C и 34,36 ‰ у дна (72 м). Эти величины были близки к термохалинным характеристикам придонного слоя на бровке шельфа западного разреза P2. На разрезе P4 придонный квазиоднородный слой на бровке шельфа (станция B_4) начинался с глубины 46 м до дна (74 м), температура в нем менялась в пределах $-1,58... -1,73$ °C, а солёность слабо увеличивалась от 34,13 ‰ на

верхней границе до 34,44 ‰ у дна. Характеристики этого слоя несколько отличаются от придонных слоев на станциях В₂ и В₃.

На глубоководных станциях В₂, В₃, В₄ слой холодной воды с отрицательной температурой до $-1,5... -1,7$ °С наблюдался на глубинах от 40 до 60 м, при этом толщина его была меньше, чем на бровке шельфа.

В глубоководной части моря на станциях В₂, В₃, В₄ под слоем холодной воды отмечался термоклин (рис. 5). На глубине 161–223 м на станции В₃ были обнаружены атлантические воды с положительной температурой. На станциях В₂ и В₄ на этих глубинах были измерены температуры около $-0,20$ °С, что свидетельствует о залегании на этих горизонтах трансформированной воды атлантического происхождения.

СТРУКТУРА ХОЛОДНОГО СЛОЯ ШЕЛЬФОВЫХ ВОД В ЛЕТНИЙ СЕЗОН

В качестве критерия выделения зимних шельфовых вод в летний период была принята величина температуры воды меньше $-1,5$ °С. По данным наблюдений экспедиции «ЛАПЭКС-2013/TRANSDRIFT-XXI» были построены вертикальные разрезы

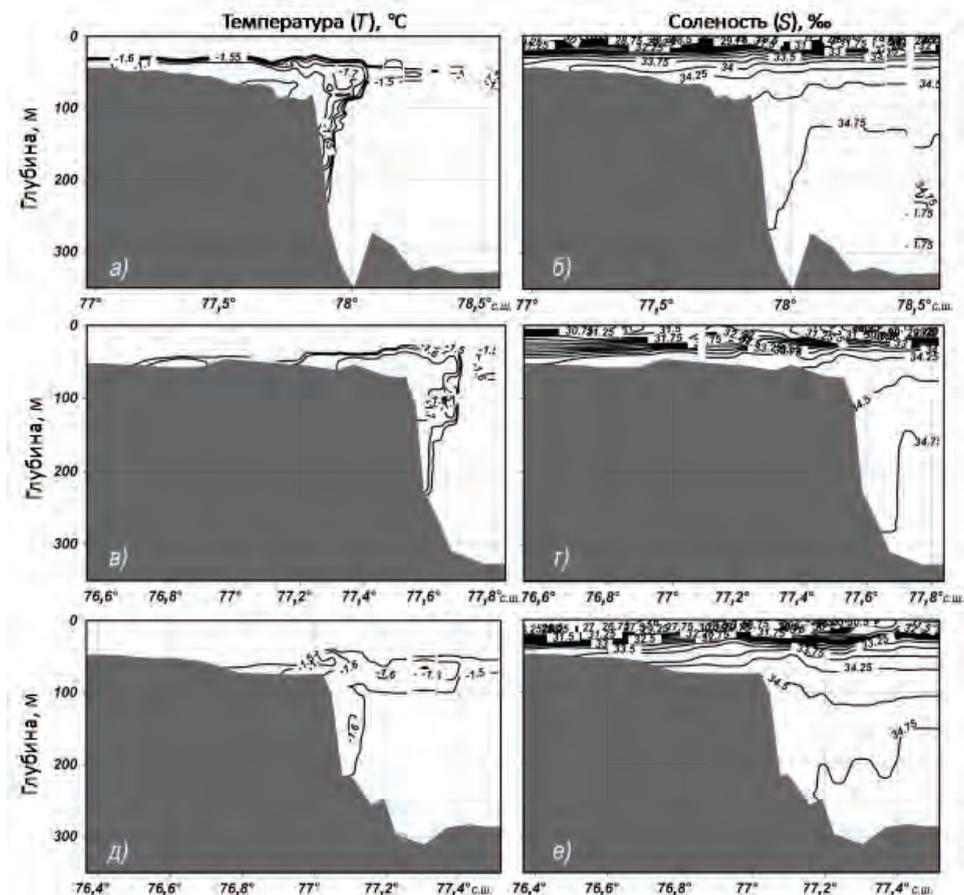


Рис. 6. Конфигурация слоя воды с температурой ниже $-1,5$ °С (а, в, д) и распределение солености (б, г, е) на трех океанографических разрезах P2 (а, б), P3 (в, г) и P4 (д, е) на разрезе 4, по данным экспедиции «ЛАПЭКС-2014/ТРАНСДРИФТ-XXI» в море Лаптевых со 2 по 17 сентября 2013 г. Положение разрезов указано на рис. 4.

температуры и солёности для трех меридиональных океанографических разрезов P2, P3, P4 (рис. 6). Чтобы выделить на рисунке зимние шельфовые воды, изолинии температур на разрезах нанесены в интервале $-1,5... -2,0$ °C. Толщина слоя рассчитана как разность между глубиной залегания нижней границы изолинии $-1,5$ °C или дна и верхней границей изолинии $-1,5$ °C. За начало холодного слоя нами принято место положения южной станции, на которой температура у дна была равна или ниже $-1,5$ °C.

Из рис. 6 видно, что в западной части моря холодный слой начинался на разрезе P2 в южной части с глубиной 46 м до станции на бровке шельфа с глубиной 78 м. На протяжении 98 км верхняя граница придонного слоя находилась на глубине от 28 до 26 м, а толщина слоя увеличивалась от 15 м до 53 м. Температура, солёность (рис. 6а и 6б) и условная плотность у дна изменялись соответственно $-1,56... -1,75$ °C; $32,63-34,39$ ‰ и $26,252-27,686$ кг/м³.

На разрезах P3 и P4 в центральной части моря придонный слой начинался на широтах $76,66-76,79$ ° с.ш. Толщина слоя увеличивалась от нуля до 45 м на P3 и 31 м на P4 на бровке шельфа. От начала придонного слоя до бровки шельфа температура, солёность и условная плотность у дна изменялись на разрезе P3 (рис. 6в и 6г) в пределах соответственно $-1,5... -1,74$ °C; $34,19-34,36$ ‰ и $27,523-27,662$ кг/м³, а на разрезе P4 (рис. 6д и 6е) в пределах соответственно $-1,51... -1,65$ °C, $34,27-34,44$ ‰, $27,581-27,725$ кг/м³.

За бровкой шельфа придонный слой разделился на две ветви, огибая трансформированные воды атлантического происхождения. На разрезах P2 и P3 (рис. 6а и 6в) горизонтальная ветвь вытягивалась шлейфом на север, а в конце разрезов слой разрывался на отдельные облака. На разрезе P4 верхняя ветвь холодного слоя распространялась от бровки шельфа на север на расстояние 53 км, утоньшаясь до 20 м (рис. 6д).

Вторая ветвь сползала по склону шельфа и фиксировалась на P2 до глубины 262 м на расстоянии 4 км, где температура, солёность и условная плотность у дна были равны соответственно $-1,54$ °C; $34,64$ ‰ и $27,887$ кг/м³. На разрезе P3 вторая ветвь сползала по склону до глубины 226 м на расстоянии 7 км от бровки. При этом у дна температура и солёность были равны $-1,62$ °C и $34,62$ ‰ соответственно. Сползание холодных вод по склону на P4 наблюдалось до широты $77,10$ ° с.ш. на расстоянии 8,5 км от бровки шельфа, где у дна на глубине 212 м температура, солёность и условная плотность были равны соответственно $-1,58$ °C, $34,56$ ‰ и $27,817$ кг/м³.

Результаты анализа структуры холодного слоя шельфовых вод в летний сезон на разрезах P1–P5 (меридиональные разрезы температуры и солёности P1 и P5 в статье не приводятся) обобщены в табл. 1.

Южная граница холодного слоя летом 2013 г. условно проходила южнее разрезов P1 и P2. На меридиане $115,6$ ° в.д. она наблюдалась в точке на широте $76,73$ ° с.ш. на глубине 55 м, далее на меридиане 126 ° в.д. граница была отмечена на широте $76,79$ ° с.ш. на глубине 72 м, а в восточной части моря на широтном разрезе P5 граница зафиксирована на долготе $130,2$ ° в.д. на глубине 70 м. Толщина слоя на бровке шельфа была максимальной и составляла 45–53 м в северо-западной части моря и 28–31 м в центральной и восточной окраинах шельфа. Увеличение толщины слоя на разрезах P1, P2, P3 составляло $0,34-0,42$ м на 1 км, или $(3,4-4,2) \cdot 10^{-4}$, а на центральном разрезе P4 — $8,5 \cdot 10^{-4}$.

Меридиональный разрез P3 наиболее близко расположен к климатическому разрезу для летнего периода (см. рис. 3 и 4), что позволяет оценить состояние шель-

Таблица 1

**Значения температуры (T °C), солености (S ‰), и условной плотности (σ км/м³)
в начале разреза на шельфе, на бровке шельфа и в конце разреза на севере**

Номер разреза	Характеристики	Начало разреза, у дна	Бровка шельфа, у дна	Конец разреза, центр слоя
1	Широта (град., с.ш.)/ долгота (град., в.д.)	77,17/115,04	77,88/113,00	78,09/112,20
	Глубина, м	42	81	46, дно 340
	Толщина слоя, м	15	53	27
	T (°C), S (‰), σ кг/м ³	-1,76; 34,21; 27,540	-1,75; 34,39; 27,686	-1, 59; 34,33; 27,638
2	Широта (град., с.ш.)/ долгота (град., в.д.)	77,03/112,89	77,88/113,00	78,56/113,00
	Глубина, м	44	78	59, дно 328
	Толщина слоя, м	16	52	18
	T (°C), S (‰), σ кг/м ³	-1,65; 33,92; 27,302	-1,75; 34,39; 27,686	-1,57; 34,44; 27,726
3	Широта (град., с.ш.)/ долгота (град., в.д.)	76,73/115,61	77,53/116,12	77,77/116,23
	Глубина, м	55	72	54, дно 327
	Толщина слоя, м	11	45	43
	T (°C), S (‰), σ кг/м ³	-1,66; 34,25; 27,568	-1,74; 34,36; 27,662	-1,67; 34,34; 27,646
4	Широта (град., с.ш.)/ долгота (град., в.д.)	76,79/125,99	77,02/126,00	77,47/126,00
	Глубина, м	72	74	66, дно 286
	Толщина слоя, м	9	31	17
	T (°C), S (‰), σ кг/м ³	-1,51; 34,27; 27,581	-1,65; 34,44; 27,725	-1,61; 34,21; 27,540
5	Широта (град., с.ш.)/ долгота (град., в.д.)	77,50/130,20	77,50/129,90	–
	Глубина, м	70	75	–
	Толщина слоя, м	14	28	–
	T (°C), S (‰), σ кг/м ³	-1,60; 34,33; 27,637	-1,64; 34,34; 27,647	–

фовых вод летом 2013 г. по сравнению со средним климатическим. Холодный слой летом 2013 г. начинался на широте 76,7° с.ш., или на 76 км севернее, температура воды на бровке шельфа и на склоне шельфа была на 0,1–0,3 °C ниже, а соленость примерно на 0,5–0,7 ‰ больше, чем средние температура и соленость в этих местах для периода 1950–1993 гг. За бровкой шельфа холодный слой с температурой ниже –1,5 °C и соленостью 34,25–34,70 ‰ опускался по склону летом 2013 г. до глубины 240 м. На климатическом разрезе на склоне шельфа слой воды с температурой ниже –1,5 °C отсутствует и лишь выделяется слой воды с температурой –1,4... –1,5 °C и соленостью 33,7–34,0 ‰, распространяющийся по склону до глубины 125 м.

Результаты сравнения температур холодного слоя на бровке шельфа позволяют прийти к выводу, что по сравнению со средним климатическим состоянием зимой 2013 г. в западной части моря Лаптевых сформировались более холодные и соленые шельфовые воды. Этому способствовал прежде всего температурный режим над морем Лаптевых. В феврале среднемесячная отрицательная аномалия температуры воздуха доходила до –5 °C, а в январе–марте 2013 г. средняя отрицательная аномалия была равна –1,3 °C (Обзор..., 2014). Более северное положение на шельфе изолинии

температуры $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ летом 2013 г. можно объяснить следующим. Ледовитость в западной части моря Лаптевых в 2013 г. была меньше, чем в 1950–1993 гг., и летние процессы таяния протекали интенсивно. Поэтому придонный слой южнее широты $76,70^{\circ}$ с.ш. летом 2013 г. подвергся большей трансформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По историческим данным за 1950–1993 гг. в зимний период в западной части моря Лаптевых наблюдалась температура холодных шельфовых вод ниже $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, и до широты $76,30^{\circ}$ с.ш. температура была равна или на $0,01\text{--}0,02$ градуса выше температуры замерзания. При этом холодные воды на шельфе имели более широкий диапазон изменения температуры и солёности, чем воды халоклина Арктического бассейна. Из анализа *TS*-диаграмм следует, что шельфовые воды западной части моря Лаптевых могут служить одним из источников формирования холодного нижнего халоклина Арктического бассейна.

2. Термохалинное состояние моря Лаптевых летом 2013 г. отличалось от климатического как в поверхностном слое, так и придонном. В придонном слое в западной части моря отмечалась аномально низкая температура, а солёность в западной и восточной частях моря была больше средней климатической. На шельфе глубже 40 м сохранялась холодная вода с температурой от $-1,5$ до $-1,76\text{ }^{\circ}\text{C}$ и солёностью от 33,92 до 34,44 ‰. Изотерма $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ начиналась в придонной части на широте около 75° с.ш. и наблюдалась до бровки склона шельфа. Толщина холодного слоя над бровкой склона шельфа составляла 28–53 м.

3. Конфигурации объема холодной шельфовой воды на шельфе и за бровкой шельфа на меридиональных гидрологических разрезах, построенных по данным уникальной мезомасштабной U-STD-съёмки летом 2013 г., указывают на бифуркацию слоя холодной шельфовой воды за бровкой шельфа. Верхняя часть слоя с температурой ниже $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и солёностью 34–34,3 ‰ распространялась на север на горизонтах 40–50 м. Вторая часть слоя сползала по склону шельфа в глубоководную часть бассейна.

4. Факты, установленные по историческим данным и исследованиям российско-германской экспедиции «ЛАПЭКС-2013/TRANSDRIFT-XXI», позволяют сделать вывод о том, что холодные шельфовые воды моря Лаптевых как пополняют холодный нижний халоклин глубоководной части океана, так и служат источником формирования придонного слоя между атлантическими водами и дном на материковом склоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Головин П.Н. Особенности формирования и стока плотных шельфовых вод (каскадинга) в районе материкового склона котловины Нансена в море Лаптевых // Метеорология и гидрология. 2005. Т. 11. С. 44–62.

Никифоров Е. Г., Блинов Н. И., Лукин В. В. Некоторые результаты экспедиционных исследований по программе «ПОЛЭКС–Север-76» / «ПОЛЭКС–Север-76». Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1979. С. 129–148.

Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане. 2014. СПб.: АНИИ, 2014. 116 с.

Фролов И.Е., Гудкович З.М., Радионов В.Ф., Тимохов Л.А., Широков А.В. Научные исследования в Арктике. Т. 1. Научно-исследовательские дрейфующие станции «Северный полюс». СПб.: Наука, 2005. 267 с.

Aagaard K., Coachman L.K., Carmack E.C. On the halocline of the Arctic Ocean // *Deep Sea Res., Part A*. 1981. Vol. 28. P. 529–545.

Bauch D., Dmitrenko I.A., Wegner C., Hölemann J., Kirillov S.A., Timokhov L.A., Kassens H. Exchange of Laptev Sea and Arctic Ocean halocline waters in response to atmospheric forcing // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114. C05008, doi:10.1029/2008JC005062.

Morison J. H., Steele M., Anderson R. Hydrography of the upper Arctic Ocean measured from the nuclear submarine USS Pargo // *Deep-Sea Res. Pt. I*. 1998. Vol. 45. P. 15–38.

Rudels B., Anderson L.G., Jones E.P. Formation and evolution of the surface mixed layer and halocline of the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101(C4). P. 8807–8821. doi:10.1029/96JC00143.

Steele M., Boyd T. Retreat of the cold halocline layer in the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. P. 10419–10435.

Walsh D., Polyakov I., Timokhov L., Carmack E. Thermohaline structure and variability in the eastern Nansen Basin as seen from historical data // *J. Mar. Res.*, 2007. Vol. 65. № 5. P. 685–7144.

L.A. TIMOKHOV, J. HÖLEMANN, A.YU. IPATOV, M. JANOUT, H. KASSENS

COLD SHELF WATERS OF THE LAPTEV SEA IN THE SUMMER OF 2013

The general regularities of temperature and salinity distribution are given to the winter and summer periods on the shelf of the Laptev Sea, average for historical period 1950–1993.

According to the Russian-German expedition of “LAPEX-2013/TRANSDRIFT-XXI” the thermohaline condition of the Laptev Sea in the summer of 2013 differed from climatic as in a surface layer, and bottom layer. On the shelf more deeply than 40 m cold water with a temperature from $-1,51$ °C to $-1,76$ °C and salinity from 33,92 to 34,44 remained. Thickness of a cold layer over a of the shelf brow was in range 28–53 m.

Configurations of volume of cold shelf water on the shelf and behind a shelf brow on the meridional hydrological sections constructed according to unique mesoscale U-STD observation indicate bifurcation of a layer of cold shelf water behind a shelf brow. The top part of a layer continued to extend to the north on the horizons of 40–50 m to the Arctic basin, and the second part of a layer slipped on a shelf slope in deep-water part of the basin.

The facts established according to historical data and researches of the Russian-German expedition of “LAPEKS-2013/TRANSDRIFT-XXI” allow to make a decision that cold shelf waters of the Laptev Sea as fill up cold lower halocline of a deep ocean, and formations of a bottom layer of maginal slope are a source.

Keywords: the Laptev Sea, cold shelf waters, bifurcation of a layer of cold shelf waters behind a shelf brow, cold shelf waters as a source of supplying a cold halocline and bottom water of maginal slope.