

И.Е.ФРОЛОВ, И.М.АШИК, В.Т.СОКОЛОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИДОННОГО СЛОЯ ГЛУБОКОВОДНЫХ РАЙОНОВ АРКТИЧЕСКОГО БАСЕЙНА СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

В статье представлены новые сведения о вертикальном распределении гидрологических характеристик морской воды в центральной части Арктического бассейна. Данные получены по результатам экспедиционных исследований с борта НЭС «Академик Федоров» во время высокоширотного рейса 2005 года. Результаты анализа данных наблюдений позволили уточнить общие представления о вертикальной стратификации придонных вод глубоководных районов Арктического бассейна. На всех станциях, выполненных в этих районах, отчетливо прослеживается уменьшение температуры воды до горизонта температурного минимума, ниже которого происходит увеличение температуры воды. Наиболее вероятным источником тепла, обуславливающим формирование придонного прогретого слоя глубоководных районов Арктического бассейна СЛО, могут служить геотермические процессы, происходящие в недрах литосферы.

Исследование водных масс Северного Ледовитого океана, всего того многообразия свойств воды, которое встречается в конкретных географических условиях необходимо не только для понимания процессов формирования и трансформации структуры и динамики вод, но также для изучения обмена энергии и вещества, климатических изменений, особенностей развития биосферы. Северный Ледовитый океан, как важное звено глобальной системы климатических процессов, играет роль одного из планетарных «стоков тепла», являясь вместе с тем «источником» аномального прогрева атмосферы. Колебания интенсивности «источников» и «стоков» тепла в значительной степени определяются океанологическими условиями. На протяжении многолетней истории исследования природы СЛО этим вопросом уделялось много внимания, однако и на сегодняшний день в процессах формирования и трансформации водных масс СЛО, определении природы и оценки величины «источников» и «стоков» тепла остается много неясного.

Научная программа работ комплексной высокоширотной экспедиции «Арктика-2005», наряду с другими задачами, предусматривала выполнение океанологических исследований, направленных на получение новых данных о гидрологических и гидрохимических условиях, сложившихся в Арктическом бассейне Северного Ледовитого океана в начале XXI в. Глубоководное зондирование океана осуществлялось с борта НЭС «Академик Федоров», дрейфовавшего на открытой воде или в разводьях, при помощи STD-зонда SeaBird 911+. Гидрологические станции, выполненные в ходе экспедиции, позволили получить данные о состоянии вод Арктического бассейна в районе хребта Менделеева, котловины Амундсена и хребта Ломоносова. Особый интерес представляет при этом новая информация о состоянии придонного слоя вод котловины Амундсена.

В вертикальной структуре толщи морской воды приполюсного района хорошо выделяются четыре типа, соответствующие устоявшимся представлениям о составе водных масс Северного Ледовитого океана [7]: поверхностные арктические водные массы, промежуточный слой арктических водных масс, глубинная атлантическая водная масса и придонный слой (рис. 1). Толщина слоя поверхностных арктических вод составляет 100–125 м, с диапазоном изменений температуры от $-1,25$ до $-1,80$ °С при солёности от 30,80 до 34,36 ‰. Слой поверхностных арктических вод подстилает промежуточная арктическая водная масса, формирующаяся в результате перемешивания нижних слоев арктической водной массы и верхних слоев атлантической водной массы. Данная водная масса несет в себе как признаки атлантического слоя, так и признаки арктической водной массы. Толщина этого слоя в данном районе составляет 70–90 м, диапазон температуры слоя $-0,1$ ÷ $-1,2$ °С, солёность в пределах 33,80–34,20 ‰. Верхняя граница слоя атлантической водной массы в приполюсном районе колеблется в пределах 175–195 м, нижняя граница находится в промежутке 660–890 м. Горизонт залегания центра ядра атлантических вод находится в пределах 275–360 м, температура воды в ядре составляет $1,03$ – $1,38$ °С, а солёность 34,84–34,86 ‰. Температура придонного арктического слоя, расположенного под глубинными атлантическими водами, находится в интервале от $-0,63$ до $-0,77$ °С, а солёность от 34,93 до 34,94 ‰.

Донные воды формируются в Североевропейском бассейне и поступают в Арктический бассейн СЛО через пролив Фрама под атлантическими водами, частично смешиваясь с ними. Они движутся на восток и север вплоть до хребта Ломоносова. Через проходы в хребте часть донных вод проникает в притихоокеанскую область, но основная их масса проходит над хребтом, смешиваясь с нижним слоем атлантических вод и образуя донные воды притихоокеанской части бассейна [5, 6]. Некоторая часть донных вод образуется в самом Арктическом бассейне при зимнем охлаждении и осолонении поверхностных вод у внешнего края материковой отмели [5], а также в окраинных арктических морях при ледообразовании [7]. Выполненные ранее исследования показали, что эта водная масса характеризуется отрицательной температурой от $-0,4$ до $-0,9$ °С и почти однородной солёностью от 34,90 до 34,95 ‰, при этом в условиях замкнутых котловин, в Арктическом бассейне, хорошо проявляется повышение температуры воды ко дну. По

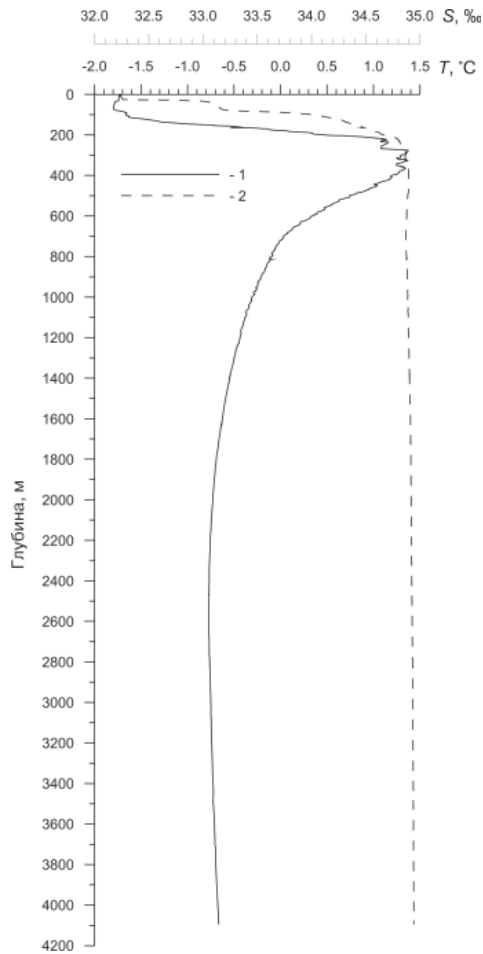


Рис. 1. Вертикальное распределение температуры и солёности воды на станции № 26 в котловине Амундсена (1 — температура; 2 — солёность)

Таблица 1

Основные характеристики состояния вод придонного слоя в глубоководных районах Арктического бассейна СЛО

№ станции	Координаты		Глубина моря, м	$H_{T_{min}}$, м	T_{min} , °C	S_1 , ‰	H_b , м	T_b , °C	S_2 , ‰	ΔT , °C	$(\Delta T/\Delta H) \cdot 10^{-5}$, °C/м
	Широта северная	Долгота восточная									
19s	79° 32,0'	136° 58,0'	2960	2636	-0,7710	34,9289	2920	-0,7511	34,9396	0,0199	7,0
20s	80° 00,9'	136° 34,9'	3189	2666	-0,7636	34,9272	3152	-0,7321	34,9398	0,0315	6,5
21s	80° 31,0'	136° 12,5'	3450	2619	-0,7643	34,9253	3393	-0,7158	34,9407	0,0485	6,3
22s	81° 00,0'	135° 49,6'	3146	2657	-0,7742	34,9297	3119	-0,7387	34,9405	0,0355	7,7
23s	81° 50,2'	137° 36,9'	3543	2587	-0,7636	34,9254	3530	-0,7095	34,9410	0,0541	5,7
24s	82° 58,5'	132° 42,2'	4141	2621	-0,7796	34,9295	4108	-0,6628	34,9431	0,1168	7,9
25s	84° 34,7'	136° 55,6'	4130	2542	-0,7720	34,9266	4085	-0,6654	34,9435	0,1066	6,9
26s	85° 14,6'	137° 20,1'	4114	2581	-0,7711	34,9279	4095	-0,6644	34,9429	0,1067	7,0
27s	86° 40,6'	128° 43,3'	4288	2603	-0,7676	34,9275	4258	-0,6471	34,9427	0,1205	7,3
28s	87° 00,4'	113° 25,0'	4268	2736	-0,7642	34,9288		подвешная		—	—
29s	88° 57,9'	78° 49,5'	4396	2674	-0,7607	34,9272	4368	-0,6344	34,9424	0,1263	7,5
30s	89° 53,8'	63° 30,0'	4300	2603	-0,7612	34,9252	4257	-0,6466	34,9415	0,1146	6,9
31s	86° 25,8'	37° 50,4**	3460	2856	-0,7461	34,9270	3451	-0,7197	34,9407	0,0264	4,4
33s	85° 26,9'	170° 10,7'	3025	1864	-0,4081	34,9406	3013	-0,3423	34,9514	0,0658	5,7
34s	84° 54,9'	118° 29,8'	4398	2639	-0,7692	34,9242	4367	-0,6352	34,9381	0,1340	7,8

Примечания: $H_{T_{min}}$ — горизонт с минимальной температурой воды; T_{min} , S_1 — температура и соленость на горизонте температурного минимума; H_b — придонный горизонт станции; T_b , S_2 — температура и соленость на придонном горизонте станции; $\Delta T = T_b - T_{min}$ — изменение температуры воды от горизонта температурного минимума до придонного горизонта; $\Delta T/\Delta H$ — градиент температуры придонного слоя воды; * — долгота западная

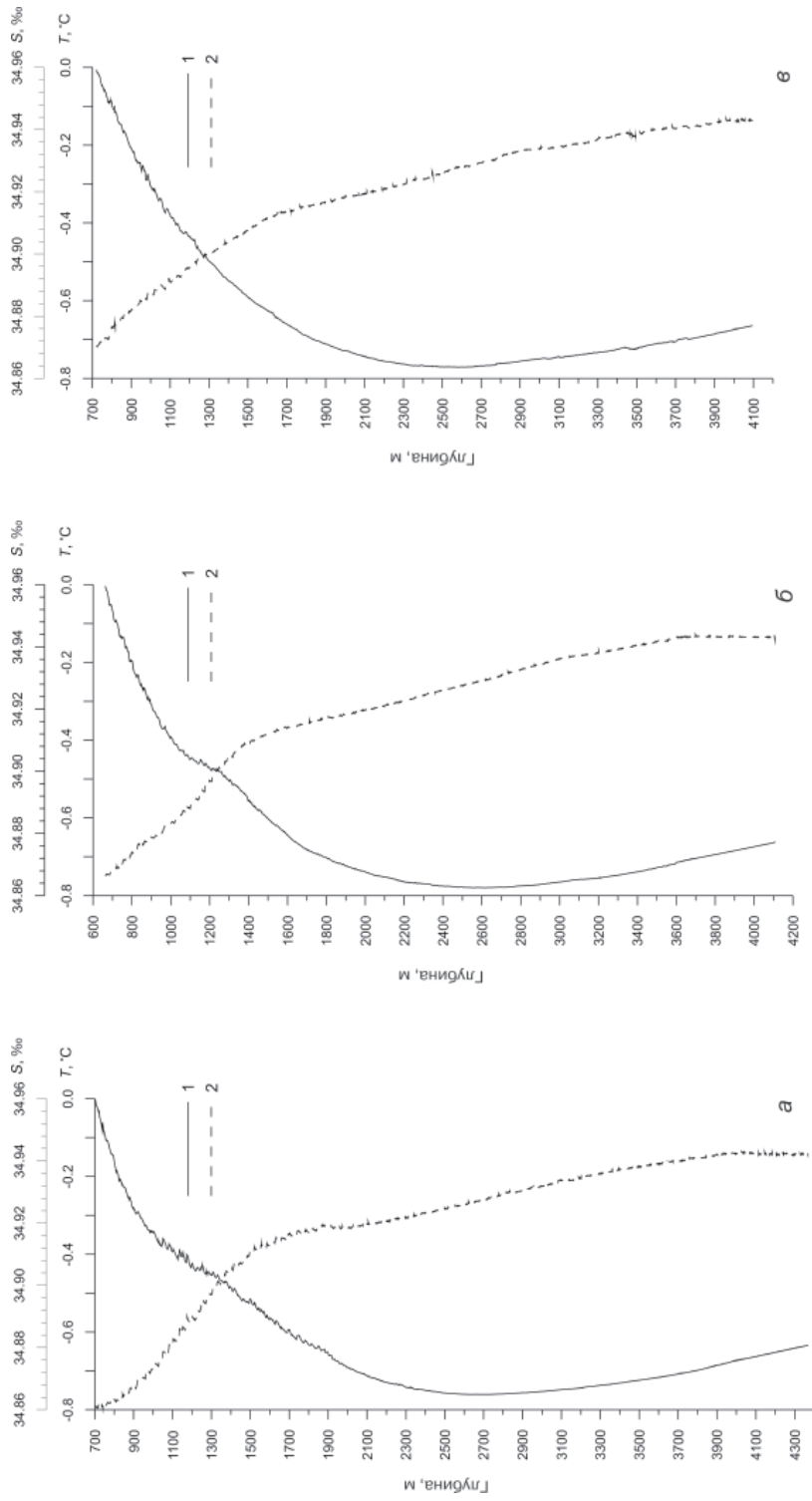


Рис. 2. Вертикальное распределение температуры и солёности придонного слоя водных масс на станциях № 24 (а), 26 (б), 29 (в) (1 — температура; 2 — солёность)

данным работы [8], такое увеличение температуры от верхней границы придонных вод ко дну составляет от 0,06 °С до 0,12 °С, соленость при этом либо совершенно однородна, либо увеличивается на 0,01–0,02 ‰.

Полученные в ходе экспедиции «Арктика-2005» данные позволяют уточнить и конкретизировать общие представления о вертикальной стратификации придонных водных масс глубоководных районов Арктического бассейна СЛО (таблица 1, рис. 2, 3). На всех станциях, выполненных в этих районах, отчетливо прослеживается уменьшение температуры воды до определенного горизонта (горизонта температурного минимума), ниже которого происходит увеличение температуры воды. Изменение температуры воды происходит при этом нелинейно: величина градиента увеличивается по мере приближения ко дну. Соленость воды при этом слабо растет, однако на расстоянии 150–200 м от дна соленость или прекращает увеличиваться или даже несколько уменьшается. Соответствующим образом меняется и плотность морской воды.

Положение горизонта температурного минимума и его величина в различных районах глубоководной части Арктического бассейна различны. В восточной и центральной части котловины Амундсена температурный минимум расположен на глубине 2550–2750 м, его величина составляет $-0,76 \div -0,77$ °С при солености 34,92–34,93 ‰. В западной части котловины Амундсена температурный минимум залегает на глубине 2850 м, его величина составляет $-0,75$ °С при солености 34,93 ‰. В притихоокеанской части Арктического бассейна горизонт температурного минимума поднят на глубину 1865 м, значение минимума температуры придонных вод здесь значительно выше $-0,41$ °С при солености 34,94 ‰. Полученные результаты в целом хорошо согласуются с выводами, полученными ранее [5], о различиях в тепловом состоянии вод приатлантической и притихоокеанской частей Арктического бассейна. Встречая при своем продвижении на север хребт Ломоносова, холодные придонные воды, поступающие из Североевропейского бассейна, поднимаются в более высокие горизонты. Переливаясь через хребт и смешиваясь с более теплыми водами, лежащими выше, они заполняют притихоокеанскую впадину. В результате температура придонной воды в приатлантической части Арктического бассейна оказывается ниже, чем в притихоокеанской части. Однако и в притихоокеанской и в приатлантической частях Арктического бассейна СЛО характер изменения температуры от горизонта температурного минимума ко дну имеет сходный характер. Градиент температуры придонного слоя воды составляет от $5,7 \cdot 10^{-5}$ град/м до $7,8 \cdot 10^{-5}$ град/м (табл. 1). Изменение температуры от горизонта температурного минимума до дна составляет от 0,02 до 0,12 °С. При этом надо заметить, что эти данные не вполне точны и сопоставимы, так как на разных станциях спуск зонда прекращался на разном расстоянии от дна, менявшемся в пределах от 9 до 57 м. Толщина прогретого придонного слоя вод меняется от 320–960 м в менее глубоких частях котловины Амундсена до 1520–1760 м в центральной части котловины. Толщина прогретого слоя в котловине Подводников, расположенной к востоку от хребта Ломоносова, составляет 1160 м.

Наиболее вероятным источником тепла, обуславливающим формирование придонного прогретого слоя глубоководных районов Арктического бассейна СЛО, могут служить геотермические процессы, происходящие в недрах литосферы. Первые данные о величине тепловых потоков на дне Северного Ледовитого океана были получены в 1966 г. в результате геофизических работ на дрейфующей станции «Чарли-2» [2] в районе Канадской котловины и хребта Менделеева. Первые отечественные измерения теплового потока через дно Северного Ледовитого океана были осуществлены на дрейфующей станции «Северный полюс-15» в 1967 г. [2, 4]. К середине 1980-х гг. измерения теплового потока, хотя и неравномерно, были осуществлены на всех основных тектонических структурах дна СЛО: хребте Ломоносова, хребте Менделеева,

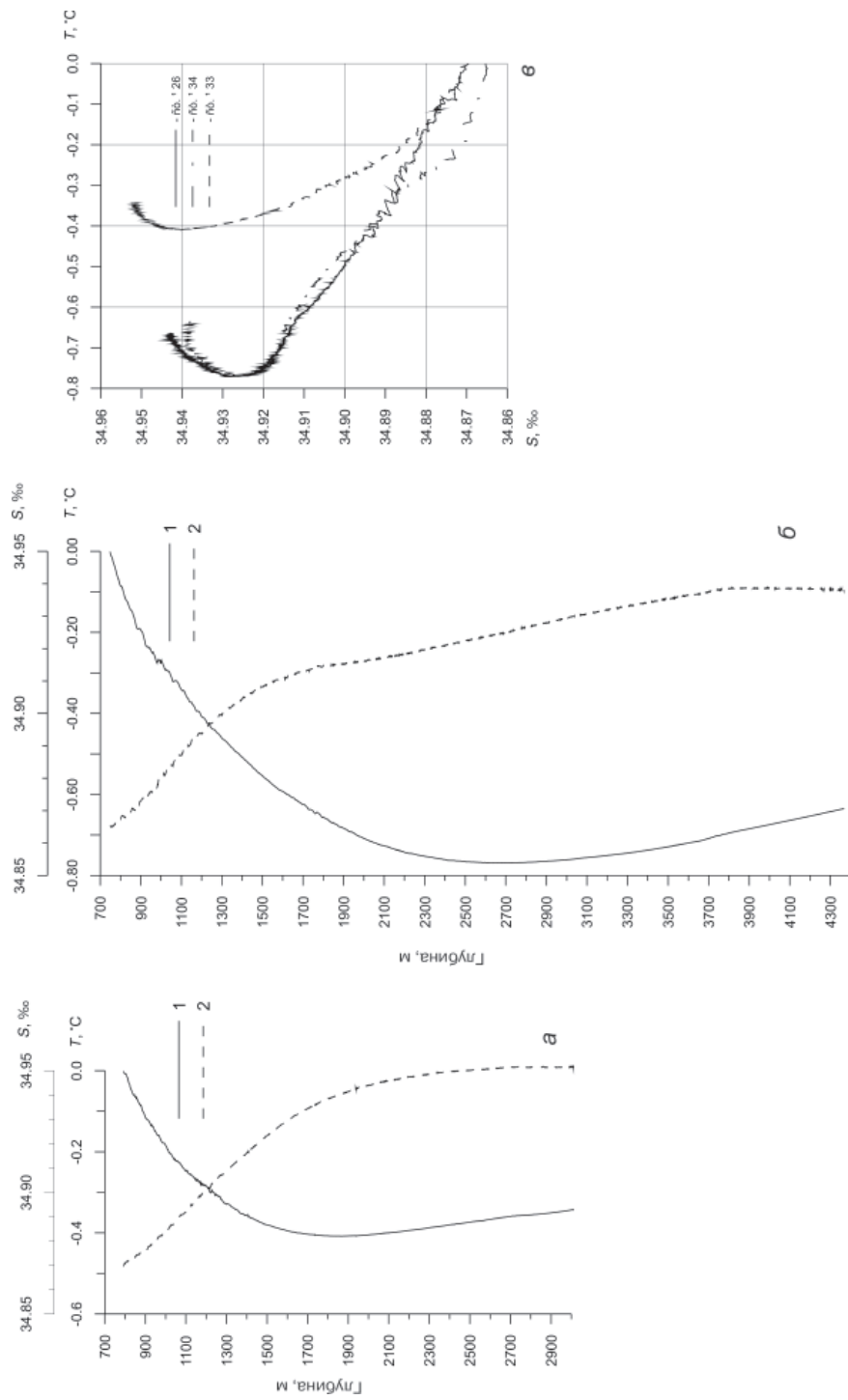


Рис. 3. Вертикальное распределение температуры и солености придонного слоя водных масс на станциях № 33 (а) и 34 (б) (1 — температура; 2 — соленость) и TS-диаграмма (в)

рифтовой долине хребта Гаккеля, Канадской котловине, котловинах Макарова и Амундсена [1, 3]. Обобщение полученных данных (табл. 2) показало наличие положительных тепловых потоков на всех структурах океанического ложа СЛО. Пониженный, по сравнению со средними величинами, тепловой поток для хребта Менделеева согласуется с представлениями о хребте как о погруженной части древней платформы. Значительная величина теплового потока и существенный разброс данных, полученных для хребта Гаккеля, свидетельствуют о наличии гидротермальной активности в его районе. Восточная часть Северного Ледовитого океана вблизи шельфа характеризуется умеренно низкими значениями теплового потока.

Таблица 2

Основные характеристики тепловых потоков на дне Северного Ледовитого океана (по данным [1, 2, 3, 4])

Район	Диапазон изменений величины теплового потока, мВт/м ²	Средняя величина теплового потока мВт/м ²	Геотермический градиент, 10 ⁻⁵ град/см
Канадская котловина	до 89	56,5 ± 10	–
Поднятие Альфа	–	39 ± 4	–
Хребет Менделеева	30–66	49 ± 8	37–71
Котловина Макарова и Котловина Подводников	до 66	56,5 ± 8	61–77
Хребет Ломоносова	59–113	79 ± 20	51–110
Котловина Амундсена	–	67	82–84
Хребет Гаккеля	–	–	40–170

Связь между потоком тепла через дно Северного Ледовитого океана и аномальностью вертикального распределения основных гидрофизических характеристик придонного слоя глубоководных районов Арктического бассейна представляется достаточно очевидной. Вместе с тем можно предположить, что значительный постоянно действующий источник тепла на дне Северного Ледовитого океана должен приводить к возникновению вертикальной неустойчивости вод придонного слоя и появлению конвекции, охватывающей мощные слои океана. Двуслойная структура придонных вод позволяет допустить возможность возникновения внутренних волн на границе раздела слоев. Достоверным предположением представляется существование не только вертикальной, но и горизонтальной неоднородности распределения придонных вод, что в свою очередь должно приводить к формированию придонных течений и, соответственно, ускорению процессов водообмена и переноса осадков. Исследование этих процессов, оценка их масштабов и последствий требует проведения специально спланированных и поставленных комплексных натурных экспериментов.

Возможно, новые данные о распределении гидрофизических характеристик придонного слоя вод глубоководных районов Арктического бассейна СЛО потребуют некоторого пересмотра сложившихся представлений о циркуляции вод и термодинамических процессах в масштабах всего Северного Ледовитого океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власенко В.И., Сальман А.Г., Томара Г.А., Баранов В.А. Данные измерений теплового потока в восточной части Арктического бассейна // Теоретические и экспериментальные исследования по геотермике морей и океанов. М.: Изд-во «Наука», 1984. С. 47–51.

2. Любимова Е.А., Никитина В.Н., Томара Г.А. Тепловые поля внутренних и окраинных морей СССР. М.: Изд-во «Наука», 1976. 224 с.
3. Любимова Е.А., Сальман А.Г. О связи теплового потока с геологическими структурами дна Северного Ледовитого океана // Теоретические и экспериментальные исследования по геотермике морей и океанов. М.: Изд-во «Наука», 1984. С. 52–59.
4. Любимова Е.А., Томара Г.А. Методика и результаты исследований теплового потока через дно Северного Ледовитого океана // Теоретические и экспериментальные исследования по геотермике морей и океанов. М.: Изд-во «Наука», 1984. С. 43–46.
5. Никифоров Е.Г., Шнайхер А.О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 269 с.
6. Северный Ледовитый и Южный океаны. Л.: Изд-во «Наука», 1985. 501 с.
7. Советская Арктика. М.: Изд-во «Наука», 1970. 526 с.
8. Степанов В.Н. Мировой океан, динамика и свойства вод. М.: Изд-во «Знание», 1974. 255 с.

I.E.FROLOV, I.M.ASHIK, V.T.SOKOLOV

HYDROPHYSICAL PARAMETERS OF ARCTIC DEEP SEA NEAR-BOTTOM LAYERS IN THE ARCTIC OCEAN

New data on vertical distribution of hydrological characteristics of seawater in the central part of the Arctic basin are presented in paper. The data are obtained by results of expeditions' researches on board of RV «Akademik Fedorov» during the 2005 high latitude research voyage. Results of the data analysis allow specifying the general representations about deep waters' vertical stratification in the Arctic basin. At all the stations executed in these areas, reduction of water temperature up to horizon of temperature minimum is distinctly traced; whereas water temperature increase takes part below that minimum. The most probable heat source determining the Arctic basin's deep-water warm layer formation can be geothermal processes taking place in interior lithosphere.