АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1995, том 41, № 6, с. 867 - 875

УДК 534.88

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА ЧЕРЕЗ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ФРОНТЫ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

© 1995 г. И. А. Александров

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 08.12.94 г.

Основными гидрологическими фронтами Баренцева моря являются полярный и арктический. Приводятся данные о местоположении и характеристиках этих фронтов в различные сезоны. Устойчивое значение ширины фронта составляет 1 - 2 км, заглубление – 100 м или до дна. Расчетным способом исследовалось влияние природных факторов и условий подводного наблюдения на распространение звука через фронт. К природным факторам относятся гидрологические характеристики и их сезонные изменения, к условиям подводного наблюдения – расположение источника и приемника относительно фронта; расчеты выполнены на частоте 2 кГц при глубинах источника и приемника от 50 до 200 м. Показано, что фронт оказывает существенное влияние на аномалию распространения, причем величина этого влияния определяется вертикальными профилями скорости звука по обе стороны фронта и удалением источника от него, а увеличение или уменьшение аномалии распространения – положением источника относительно фронта и сезоном года.

Потребности подводной навигации обусловили необходимость исследования распространения звука в неоднородной водной среде при наличии гидрологических фронтов, вихрей, внутренних волн и др. Это в свою очередь потребовало изучения физической природы неоднородностей и их характеристик. Особое значение имеет эта проблема применительно к арктическим районам. Из публикаций на эту тему отметим работы [1 - 15]. Здесь будут рассмотрены экспериментальные данные по гидрологическим характеристикам полярного и арктического фронтов Баренцева моря и результаты расчетов распространения звука через фронты, в частности, аномалии распространения, для различных условий подводного наблюдения.

Прежде чем перейти к изложению результатов, полученных при выполнении этой работы, сделаем обзор существующих данных по характеристикам фронтов Баренцева моря.

Еще В.Ю. Визе выделял в арктических морях два типа гидрологических фронтов: полярные, образующиеся как результат конвергенции теплых и холодных водных масс по линии их соприкосновения, и арктические, расположенные вдоль ледовой кромки и представляющие собой промежуточную зону между прогретыми и распресненными поверхностными водами и водами под ледовым покровом [1, 2]. Всего же в арктических морях существуют 4 типа гидрологических фронтов; помимо указанных выше двух типов существуют еще приустьевые, возникающие в результате контакта прогретых и распресненных речными стоками прибрежных вод с водными массами моря, и фронты вторжения – в результате контакта атлантических вод, поступающих по глубоководным желобам из Центрального Арктического бассейна, с арктическими водами. В последнем случае фронтальные разделы не выходят на поверхность, так как атлантические воды находятся под арктическими.

Схематическое изображение типов гидрологических фронтов арктических морей Северо-Европейского бассейна дано на рис. 1 (а – поверхностный арктический, б – поверхностный атлантический, в – глубинный холодный; *1* – арктические воды, *2* – атлантические, *3* – глубинные холодные [5]). Согласно [5], поверхностный арктический тип характеризуется повышенной вертикальной конвективной неустойчивостью, наибольшая устойчивость присуща поверхностному атлантическому типу.

В качестве основных параметров гидрологических фронтов или фронтальных зон (на различие этих понятий впервые указал и дал им четкие определения К.Н. Федоров, [9]) в работе [2] определены: ширина фронта (зоны) по поверхности, горизонтальные градиенты температуры и солености, глубина проникновения и угол наклона (по отношению к горизонту) поверхности раздела. Минимальные, средние и максимальные значения этих параметров, заимствованные из работы [2], приведены в табл. 1; здесь $S_ф$ – ширина фронта (зоны), $h_ф$ – глубина проникновения, α – угол наклона поверхности раздела.

Напомним, что, согласно К.Н. Федорову, фронтальная зона может содержать несколько фронтальных разделов (фронтов), у которых

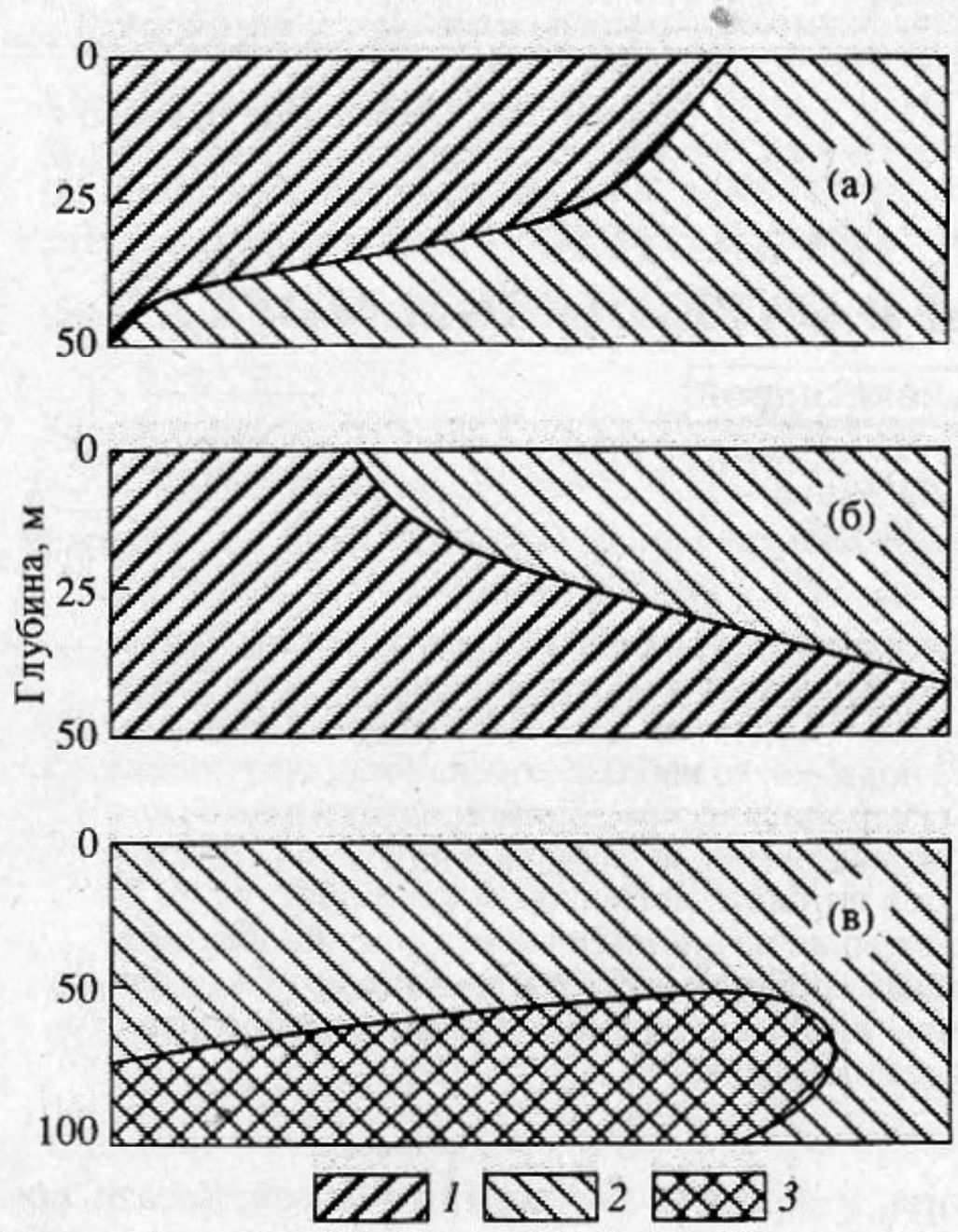

Рис. 1. Схематическое изображение типов гидрологических фронтов в арктических морях Северо-Европейского бассейна (а – поверхностный арктический, б – поверхностный атлантический, в – глубинный холодный; *1* – арктические воды, *2* – атлантические, *3* – глубинные холодные).

горизонтальные градиенты температуры и солености заметно выражены по сравнению с соответствующими величинами во фронтальной зоне. В свою очередь, и сами фронты могут обладать определенной структурой. В частности, на горизонтальный и вертикальный профили скорости звука, помимо скачка температуры, могут оказывать влияние внутренние волны, а также "пятна" (линзы) теплой воды внутри фронта, обусловленные, по-видимому, вихрями; об этом свидетельствуют измерения полярного фронта Гренландского моря, проведенные во время плавания американской атомной подводной лодки "Sovereign" в октябре 1976 г. [11].

В работах [6, 7] приводятся обобщенные данные по местоположению и характеристикам полярного фронта Северо-Европейского бассейна для различных сезонов. Обработка гидрологической информации производилась на ЭВМ; в качестве исходных использовались данные МЦД за 1984 - 1986 гг. В результате обработки большого массива данных были определены устойчивые положения полярных фронтов Гренландского, Норвежского и Баренцева морей для всех четырех сезонов года. В качестве примера на рис. 2 и 3 приведены фрагменты карт, на которых сплошными и штриховыми линиями указано положение полярного фронта Баренцева моря в январе, апреле, июле и ноябре 1986 г. (рис. 2: кривая *1* – январь, *2* – июль; рис. 3: кривая *1* – апрель, *2* – ноябрь; [6]).

В работе [7] отмечается, что полярный фронт Баренцева моря представляет собой целую систему фронтальных зон (фронтов), расположенных в разных частях акватории и обладающих различными параметрами; в частности, выделяются следующие фронтальные зоны (ФЗ): Медвежинская ФЗ, ФЗ Западного желоба, ФЗ периферии Центрального желоба, ФЗ Центральной возвышенности, ФЗ восточной части акватории, прибрежная ФЗ. В табл. 2 приведены средние параметры Медвежинской ФЗ и ФЗ Центральной возвышенности из [7]; в таблице γ_T и γ_s представляют собой тангенсы углов наклона изотерм и изохалин внутри фронтальной зоны. Данные табл. 2 являются приближенными, так как характерное расстояние между гидрологическими станциями при измерениях составляло 20 - 60 км. Тем не менее, в тех случаях, когда есть возможность сравнить эти данные с известными из литературы, обнаруживается

Таблица 1. Основные параметры гидрологических фронтов, [2]

Район	Параметры	$S_ф$, км	Горизонт. градиенты		$h_ф$, метры	α
			ΔT/км	ΔS/км		
Гренландское море	Минимальн.	20	0.01	0.02	150	18′20″
	Средние	46	0.11	0.04	531	32′42″
	Максимальн.	75	0.30	0.08	1000	1°08′46″
Норвежское море	Минимальн.	24	0.02	–	100	12′44″
	Средние	80	0.07	–	745	31′19″
	Максимальн.	200	0.16	–	1500	1°08′45″
Арктические моря	Минимальн.	2	0.01	0.01	7	0′07″
	Средние	21	0.10	0.12	21	1′17″
	Максимальн.	108	0.39	0.69	125	6′00″

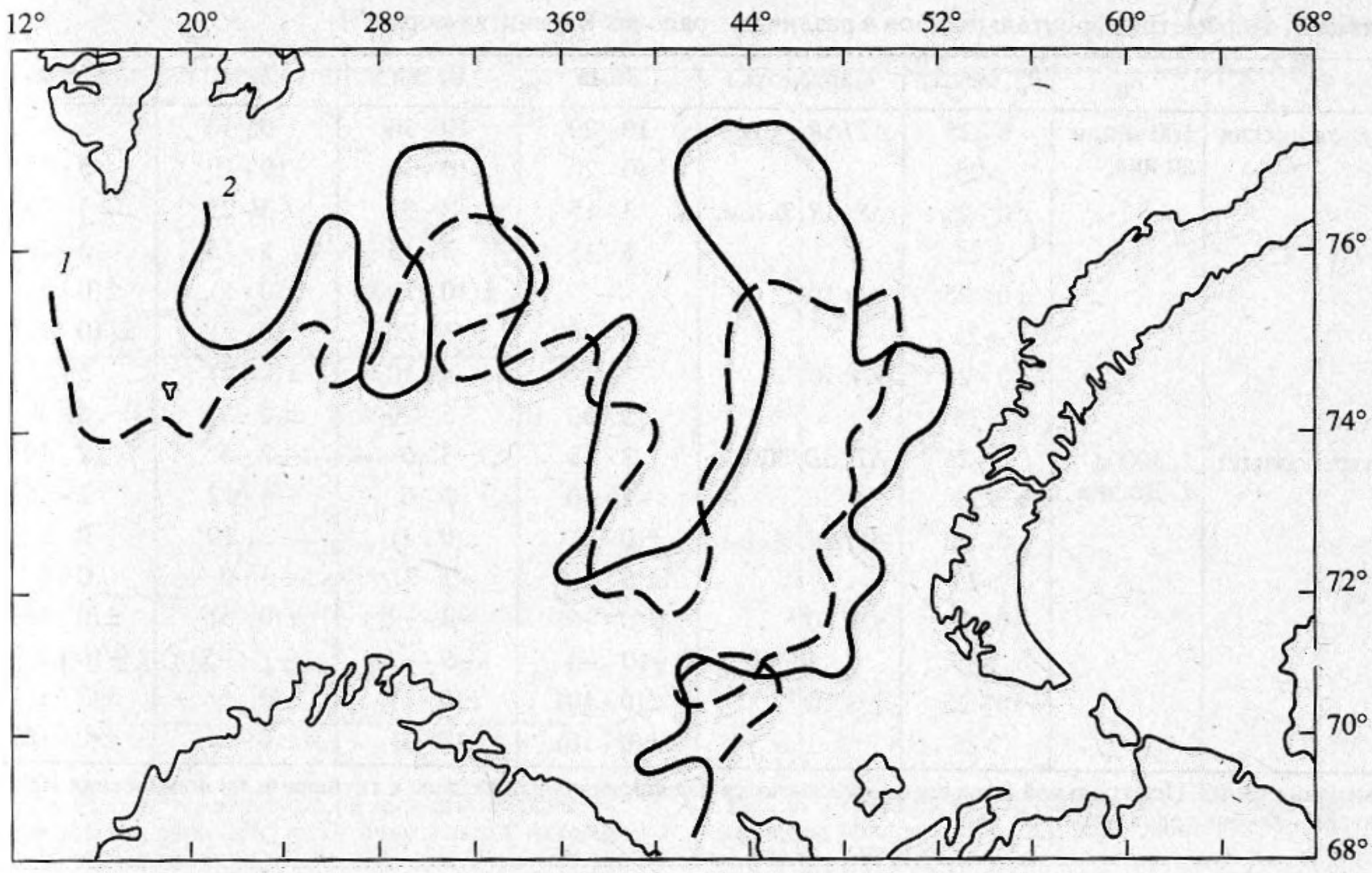

Рис. 2. Положение полярного фронта зимой и летом 1986 г. (*1* – январь, *2* – июль).

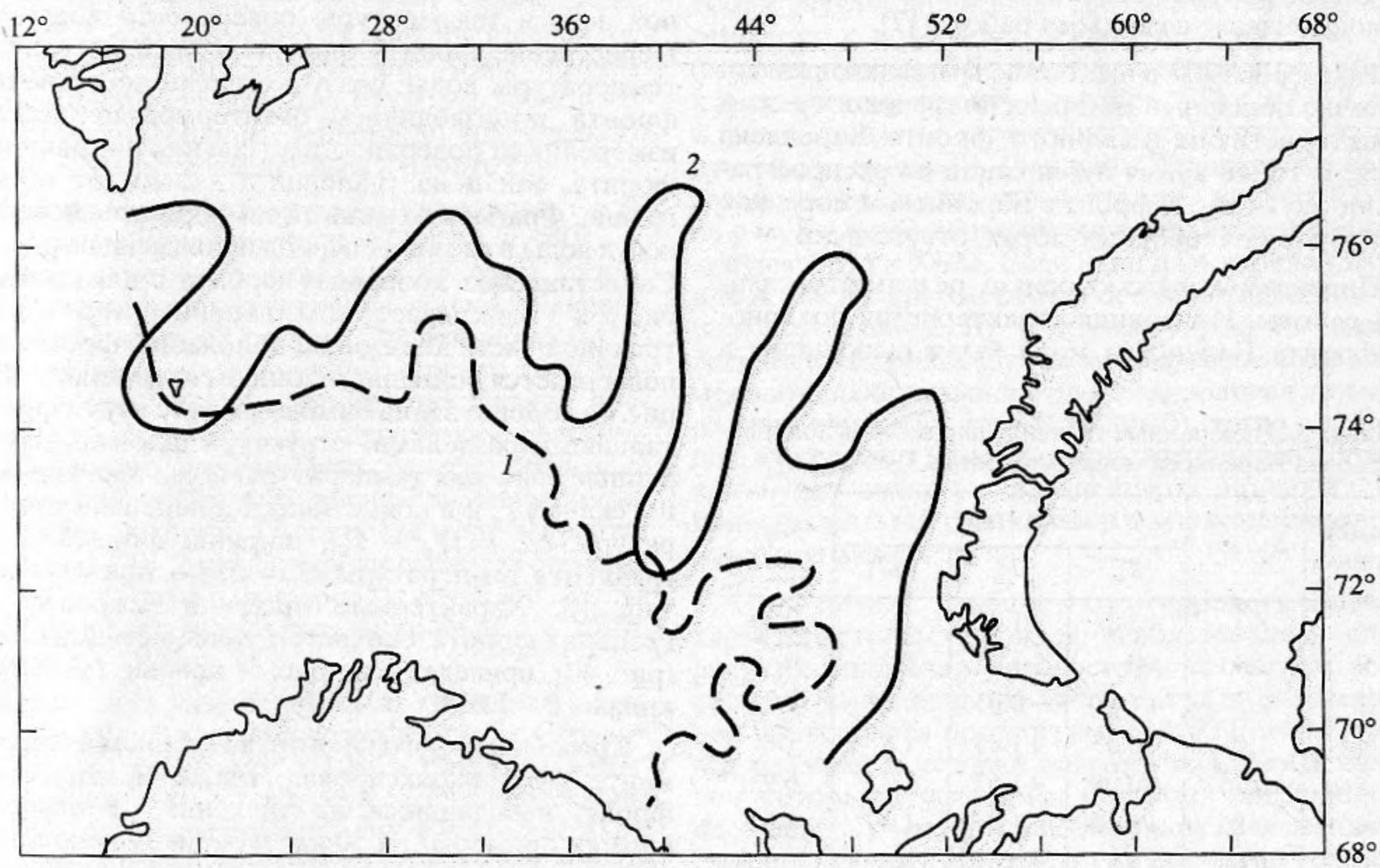

Рис. 3. Положение полярного фронта весной и осенью 1986 г. (*1* – апрель, *2* – ноябрь).

Таблица 2. Параметры фронтальных зон в различных районах Баренцева моря, [7]

ФЗ	$h_ф$	$h_м$, метры	Параметры	Зима	Весна	Лето	Осень
Медвежинская	100 м или до дна	0 - 25	$\Delta T/\Delta R$, °C/км	10 - 20	10 - 30	0 - 10	5 - 15
		>25		10 - 20	10 - 30	−10 - 10	5 - 15
		0 - 25	$\Delta S/\Delta R$, ‰/км	3 - 15	3 - 30	3 - 25	3 - 25
		>25		3 - 15	3 - 15	3 - 15	3 - 20
		0 - 25	$\gamma_т \times 10^{-3}$	–	±(10 - 200)	±(0 - 5)	±(0 - 5)
		>25		10 - 100	±(5 - 20)	±(0 - 5)	±(10 - 50)
		0 - 25	$\gamma_s \times 10^{-3}$	–	5 - 10	±(0 - 5)	5 - 30
		>25		5 - 50	5 - 20	±(0 - 5)	5 - 30
Центр. возвыш.	1. 100 м 2. До дна	0 - 25	$\Delta T/\Delta R$, °C/км	2 - 12	3 - 6	2 - 5	2 - 10
		>25		−2 - 10	2 - 6	−6 - 12	2 - 10
		0 - 25	$\Delta S/\Delta R$, ‰/км	±(0 - 3)	±(0 - 3)	−3 - 10	0 - 5
		>25		±(0 - 3)	−2 - 3	−3 - 6	0 - 6
		0 - 25	$\gamma_т \times 10^{-3}$	±(0 - 10)	−3 - −1	±(0 - 5)	±(0 - 10)
		>25		−10 - −1	−5 - −1	−1 - −5	−10 - 5
		0 - 25	$\gamma_s \times 10^{-3}$	±(0 - 10)	±(0 - 1)	±(0 - 5)	±(3 - 10)
		>25		±(0 - 10)	±(0 - 3)	±(0 - 5)	±(0 - 10)

Примечание. В ФЗ Центральной возвышенности имеются два фронтальных раздела с глубинами проникновения 100 м и до дна; $h_м$ – глубина слоя воды.

их хорошее совпадение. Так, в работе [10] показано, что в Медвежинской ФЗ полярный фронт связан со 100-метровой изобатой; это, как видно, хорошо совпадает с данными работы [7].

Таким образом, в настоящее время накоплен достаточно обширный материал по гидрологическим характеристикам полярного фронта Баренцева моря. В то же время публикации по распространению звука через фронт в Баренцевом море, как и в других мелководных морях, отсутствуют.

Перейдем к рассмотрению результатов данной работы. Измерения характеристик полярного фронта Баренцева моря были выполнены в мае - июне 1985 г. в районе с координатами φ = = 71°40′ с.ш. - 74°10′ с.ш., λ = 35° в.д. - 40° в.д. Положение фронта определялось путем непрерывной записи температуры поверхности воды $T_п$. Пересечение фронта фиксировалось по скачку температуры воды; сразу же после пересечения фронта производились батитермографические измерения от поверхности до дна как на границах фронта, так и на удалении 1 - 2 км от обеих границ. Фрагменты записей температуры поверхности воды в весенний период приведены на рис. 4. Сопоставление координат фронта с картами на рис. 2 и 3 показывает, что по крайней мере в центральной части акватории, положение фронта не подвергается большим сезонным изменениям. На рис. 4а хорошо видна бимодальная (с двумя фронтальными разделами) структура фронта. Измеренные значения температуры воды в начале зоны скачка $T_н$ и в конце зоны $T_к$, перепада температуры $\Delta T = |T_н - T_к|$, ширины фронта $S_ф$ и градиента температуры $G_т = \Delta T/S_ф$ приведены в табл. 3. Характерные профили скорости на границах фронта, соответствующие станции № 6 (рис. 4б), приведены на рис. 5; кривые *1* – ХВМ, кривые *2* – ТВМ.

Таблица 3. Измеренные значения параметров полярного фронта Баренцева моря (май - июнь 1985 г.)

Номер станции	$S_ф$, км	$T_п$, град			$G_ф$, град/км
		$T_н$	$T_к$	$\lvert\Delta T\rvert$	
1	8.3	+3.0	+1.0	2.0	0.24
2	2.4	0	+1.9	1.9	0.79
3	2.5	+1.8	−0.05	1.85	0.74
4	1.0	+0.05	+1.85	1.8	1.8
5	0.25	−0.08	+1.65	1.73	6.9
6	0.86	+0.48	+1.87	1.39	1.62
7	0.96	+1.82	+0.62	1.20	1.25
8	2.0	+2.85	+1.2	1.65	0.82
9	1.6	+1.2	+2.6	1.4	0.88

Кроме полярного фронта, в весеннем эксперименте был зафиксирован также арктический фронт, находящийся на удалении от ледовой кромки примерно на 50 км. Фрагмент непрерывной записи поверхностной температуры воды в районе арктического фронта и температурный скачок на его границах показан на рис. 6. Судно

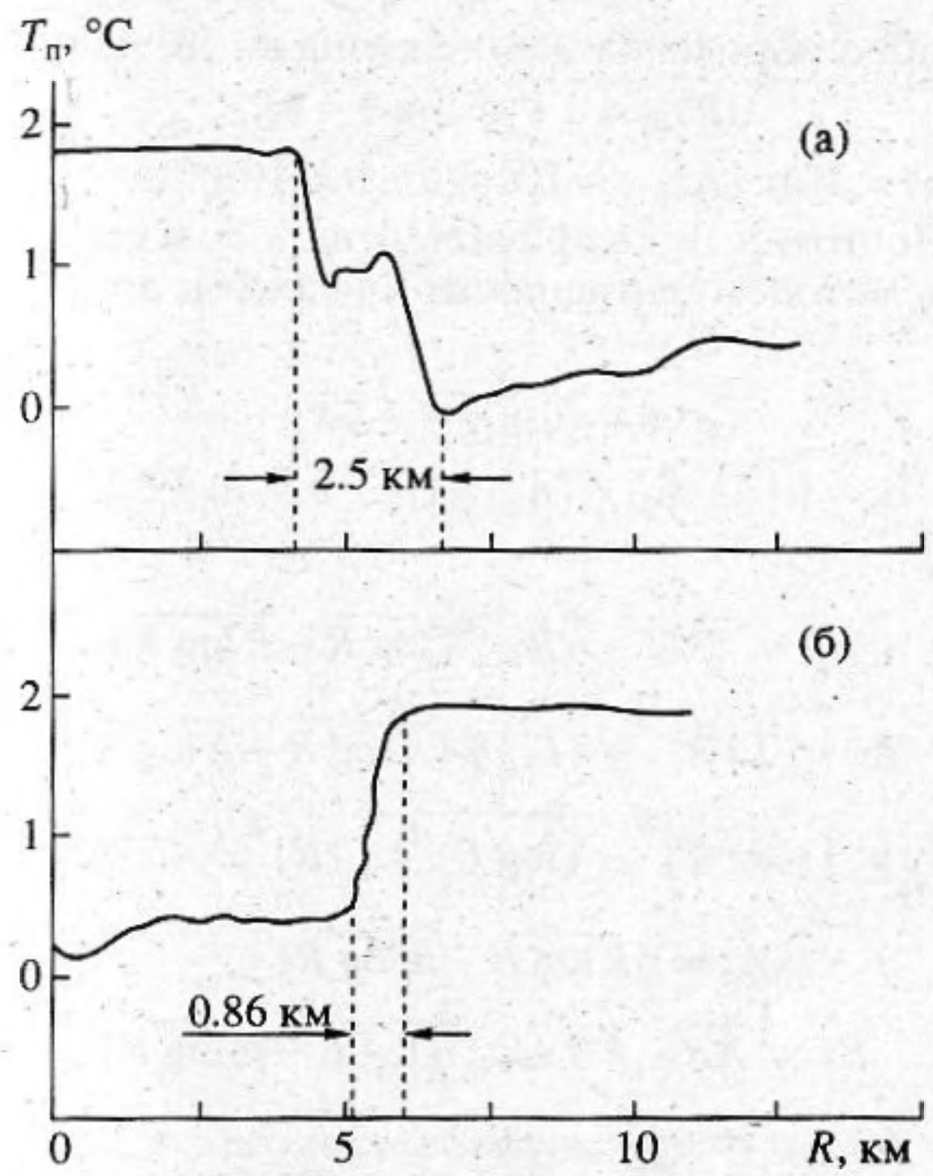

Рис. 4. Скачки температуры на границах полярного фронта, май - июнь 1985 г. (а – бимодальный фронт, б – одномодальный).

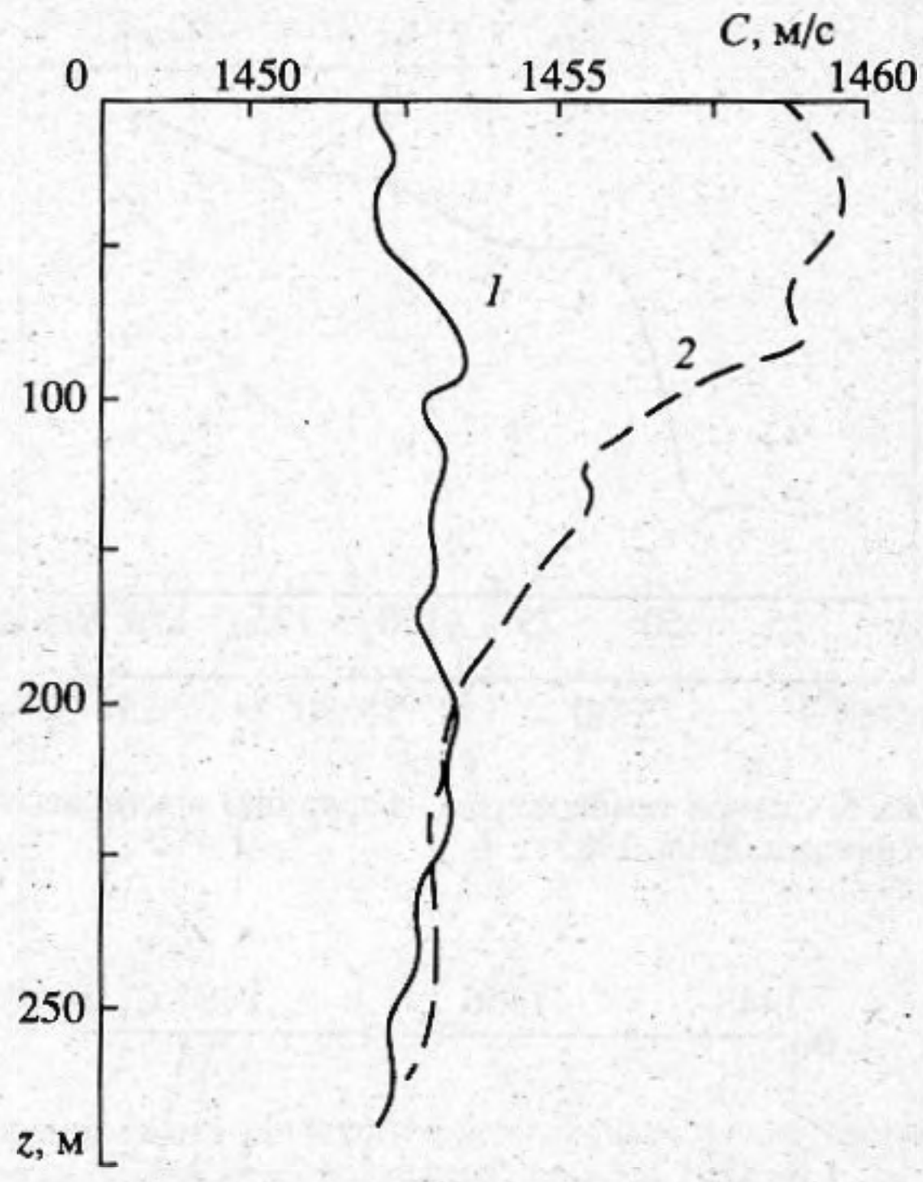

Рис. 5. Вертикальные профили скорости звука на границах полярного фронта, май - июнь 1985 г. (*1* – ХВМ, *2* – ТВМ).

двигалось вдоль меридиана 40° в.д. в направлении к ледовой кромке, которая находилась на широте 76°. Перепад температуры на границах фронта составил 0.25°C, что примерно на порядок превышало флюктуации температуры вне зоны скачка. Ширина фронта была равна 18 км; это хорошо согласуется со средним значением арктического фронта (21 км), приведенным в работе [2].

В осенний период измерения проводились в районе с координатами центра $\varphi = 72°$ с.ш., $\lambda = 40°$ в.д.; методика измерений оставалась прежней. Вследствие осеннего выхолаживания скачки поверхностной температуры составляли примерно 0.4°C, тем не менее, местоположение фронта фиксировалось четко. Ширина фронта составляла примерно 1.5 км, что хорошо согласуется с результатами весеннего эксперимента. Это дает основание считать, что наиболее вероятное значение ширины полярного фронта Баренцева моря находится в интервале 1 - 2 км. Профили скорости звука по обе стороны фронта в непосредственной близости от него приведены на рис. 7; кривые *1* – ХВМ, кривые *2* – ТВМ.

Кроме этих измерений была проведена обработка результатов гидрологических измерений на НИЛ "Отто Шмидт" в 1983 - 1986 гг.; измерения проводились во все климатические сезоны года как на открытой воде, так и в кромке льда. Обработка производилась раздельно для теплой и холодной водных масс по обе стороны гидрологических фронтов – полярного в центральной части акватории и арктического в северной. Характерные вертикальные профили скорости звука для обоих случаев приведены на рис. 8. Рисунок 8а относится к полярному фронту в апреле 1986 г. (эту пару профилей будем обозначать G_1); рис. 8б – к арктическому фронту в декабре 1985 г. (G_A). Как и ранее, кривые *1* характеризуют холодную водную массу, кривые *2* – теплую. Обращает на себя внимание принципиальное отличие кривых $C(Z)$ на рис. 5 и 8, заключающееся в характере профилей для ТВМ и ХВМ. Если один из профилей как в том, так и в другом случае остался неизменным (изоскоростным), то у другого профиля знак градиента скорости звука в верхнем слое воды изменился на обратный: на рис. 5 гидрология летнего типа (градиент отрицательный), тогда как на рис. 8 – зимнего (градиент положительный). Это, как будет видно из дальнейшего, приводит к принципиальным различиям и в закономерностях распространения звука.

Полученные данные по гидрологическим характеристикам фронтов использовались для расчетов аномалии распространения звука; все расчеты выполнены на частоте 2 кГц. Вычисления проводились по программе А.В. Вагина [16] для различных условий подводного наблюдения, под которыми условимся понимать следующие факторы: 1. расположение источника звука относительно фронта (в теплой или холодной водной массе); 2. удаление источника от фронта ($R_ф$); 3. глубина источника ($H_{ист}$) и приемника звука ($H_{пр}$).

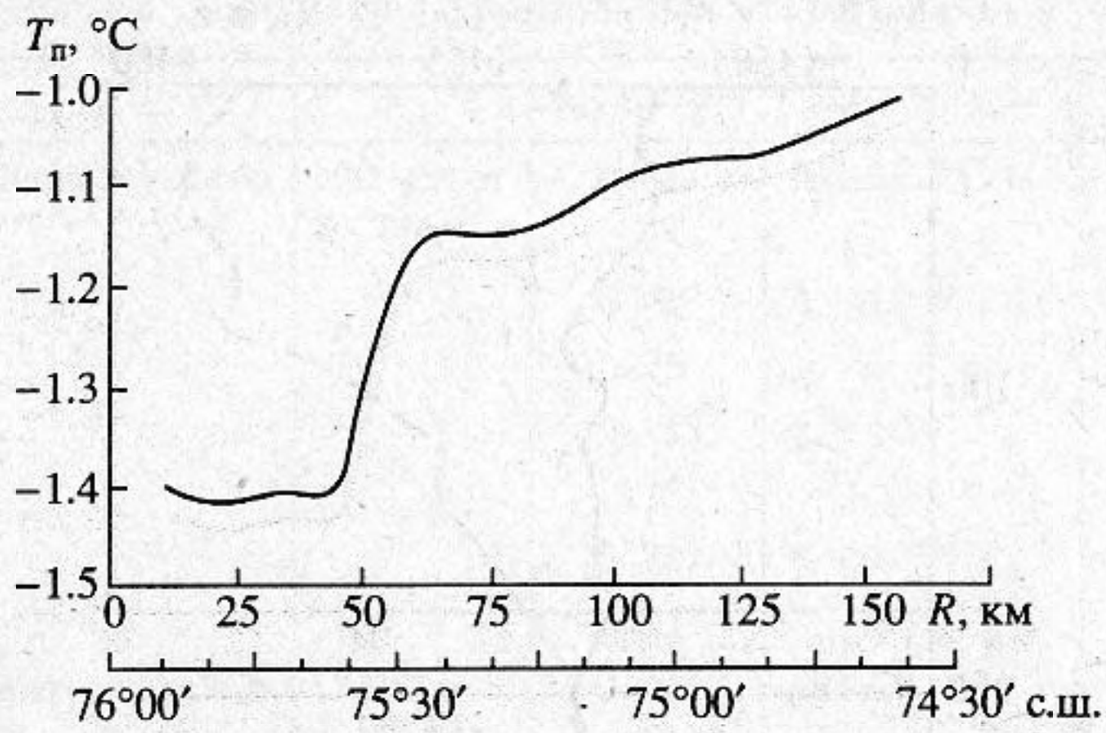

Рис. 6. Скачок температуры на границах арктического фронта, июнь 1985 г.

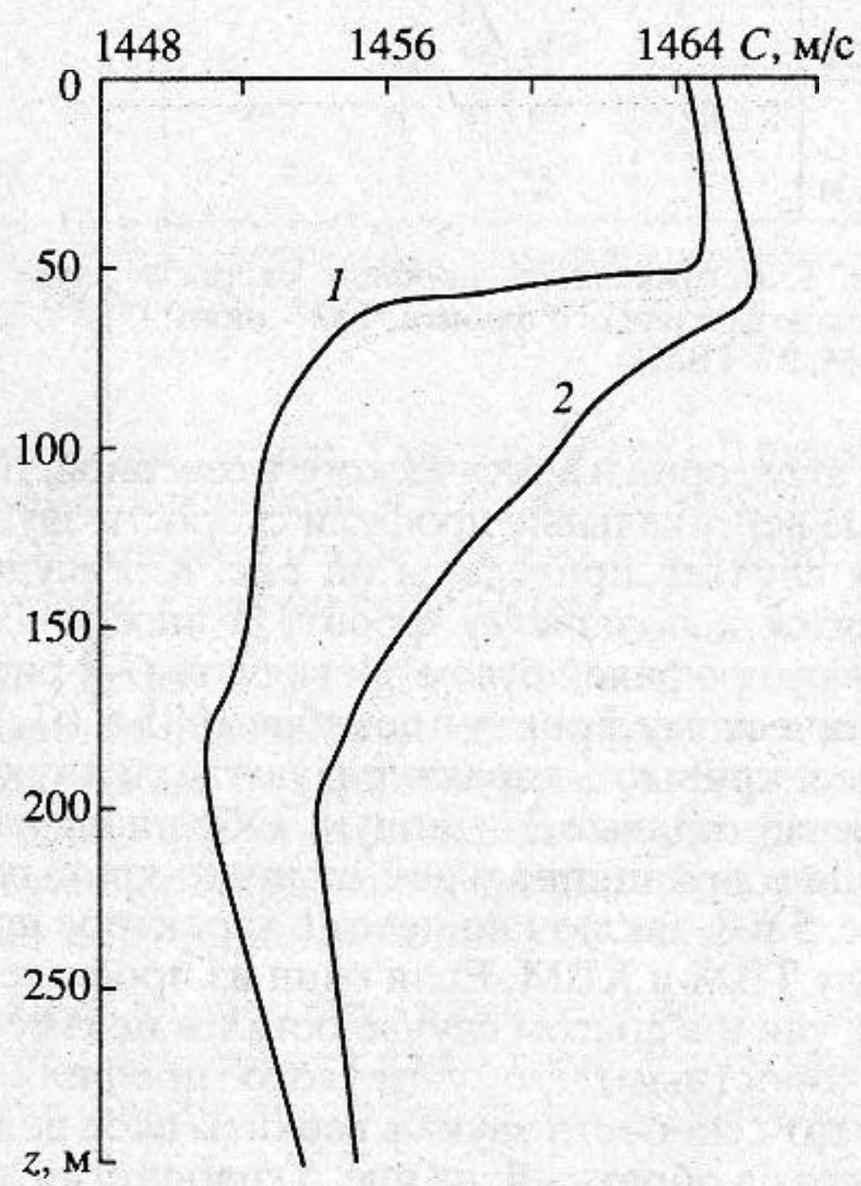

Рис. 7. Вертикальные профили скорости звука на границах полярного фронта, октябрь - ноябрь 1985 г. (*1* – ХВМ, *2* – ТВМ).

Вычисления проводились следующим образом. Сначала по программе А.В. Вагина для однородной среды (без фронта) и при наличии фронта, при расположении источника поочередно в теплой и холодной водной массах, а приемника – по другую сторону фронта, рассчитывалась аномалия распространения $A(R)$ в функции расстояния R. Затем расчетные значения аномалии аппроксимировались функцией

$$A^* = c^* R^{a^*} \times 10^{-0.1bR}, \qquad (1)$$

где коэффициенты c^*, a^*, b – константы. После логарифмирования и умножения на 10, получим

$$A(R)_{дБ} = c + a^* \log R - bR, \qquad (2)$$

где $A = 10\log A^*$, $c = 10\log c^*$, $a = 10a^*$.

Постоянные коэффициенты c, a, b определялись методом наименьших квадратов по формулам

$$c = \overline{A} - a\overline{\log R} + b\overline{R};$$
$$a = (A_1 + A_2)/(A_3 - A_4), \quad b = B_1/B_2, \qquad (3)$$

где

$$A_1 = [\overline{AR} - \overline{A}\,\overline{R}]\,[\overline{R\log R} - \overline{R}\,\overline{\log R}],$$
$$A_2 = [(\overline{R})^2 - (\overline{R^2})]\,[\overline{A\log R} - \overline{A}\,\overline{\log R}],$$
$$A_3 = [(\overline{\log R})^2 - \overline{(\log R)^2}]\,[(\overline{R})^2 - (\overline{R^2})], \qquad (4)$$
$$A_4 = [\overline{R\log R} - \overline{R}\,\overline{\log R}]^2,$$
$$B_1 = \overline{AR} - \overline{A}\,\overline{R} + a[\overline{R\log R} - \overline{R}\,\overline{\log R}],$$
$$B_2 = (\overline{R})^2 - (\overline{R^2}).$$

Черта сверху означает усреднение по соответствующим совокупностям. Расчеты проводились для весенних и осенних условий, характеризующихся профилями скорости звука на рис. 5 и 7 соответственно. Дно считалось жидким полупространством, грунт – глинистый ил с параметрами

$$\rho_{гр}/\rho_в = 1.26; C_в/C_{гр} = 1.03; \eta = 0.001, \qquad (5)$$

где $\rho_{гр}$, $\rho_в$ – плотности грунта и воды, г/см^3; $C_в$, $C_{гр}$ – скорости звука в воде у дна и в грунте, м/с; η – коэффициент затухания звуковой волны в грунте. Состояние поверхности характеризовалось высотой волны 3 м. Условия подводного наблюдения характеризовались следующими параметрами: ширина фронта $S_ф$ = 1 км; удаление источника звука от фронта $R_ф$ = 2, 5, 10 км; глубины ненаправленных источника звука $H_{ист}$ и приемника $H_{пр}$ принимали фиксированные значения из интервала 50 - 200 м.

Как следует из рис. 5, в весенний период фронт выходит на поверхность. В этих условиях при всех глубинах источника звука в однородной ТВМ аномалия распространения имеет небольшое положительное значение до расстояний 3 - 5 км, а затем убывает с расстоянием; в однородной ХВМ аномалия распространения сначала возрастает с расстоянием до 10 - 15 км, принимая там значения 4 - 5 дБ, после чего достаточно быстро убывает с расстоянием. Когда источник и приемник звука находятся по разные стороны фронта, характер распространения звука зависит в первую очередь от положения источника относительно фронта и от расстояния до фронта $R_ф$. В качестве примера на рис. 9 приведены расчетные значения аномалии распространения (кружочки) и аппроксимирующие их функции (сплошные и штриховые

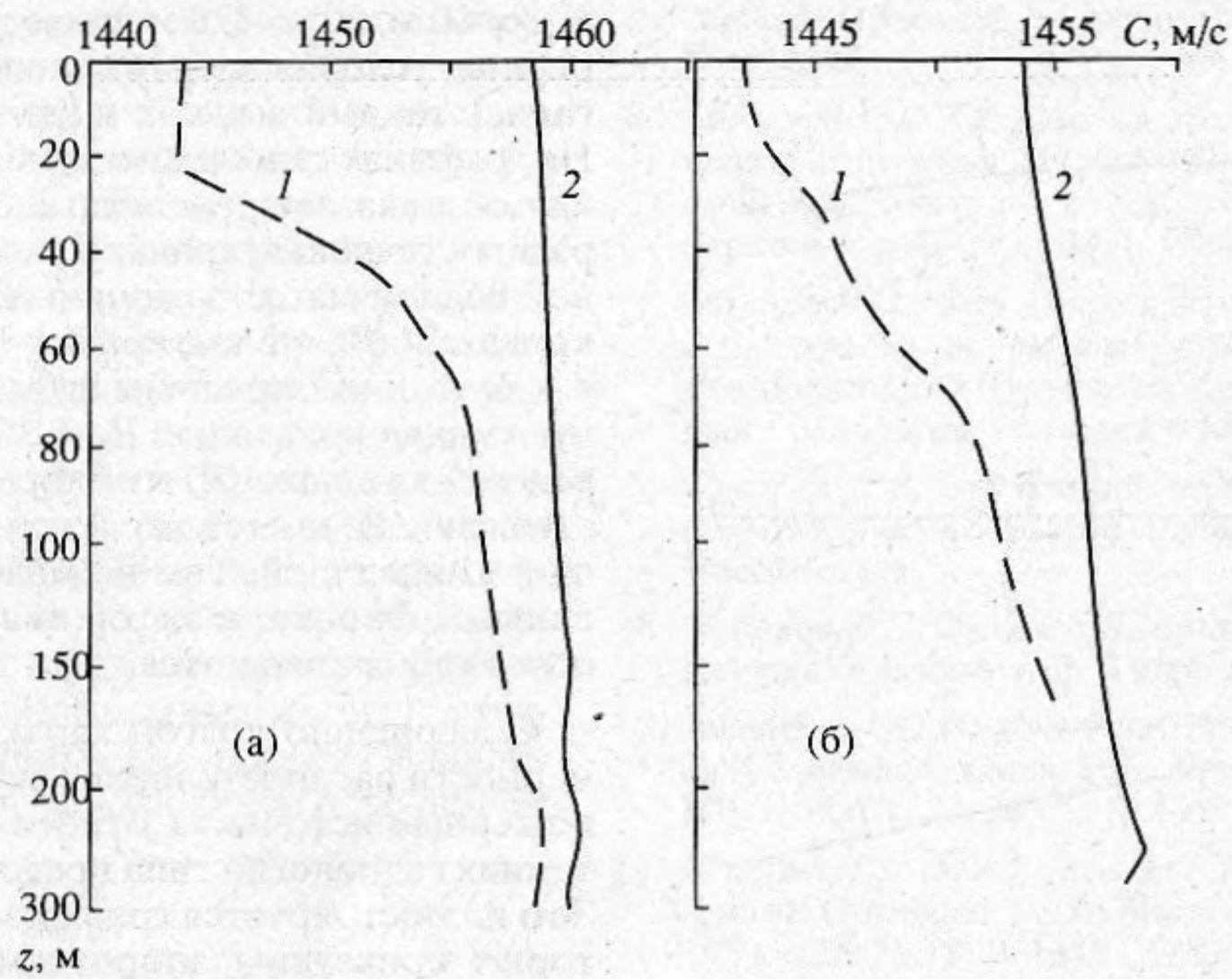

Рис. 8. Вертикальные профили скорости звука на границах полярного и арктического фронтов по результатам измерений на НИС "Отто Шмидт" (а – полярный фронт, апрель 1986 г.; б – арктический фронт, декабрь 1985 г.).

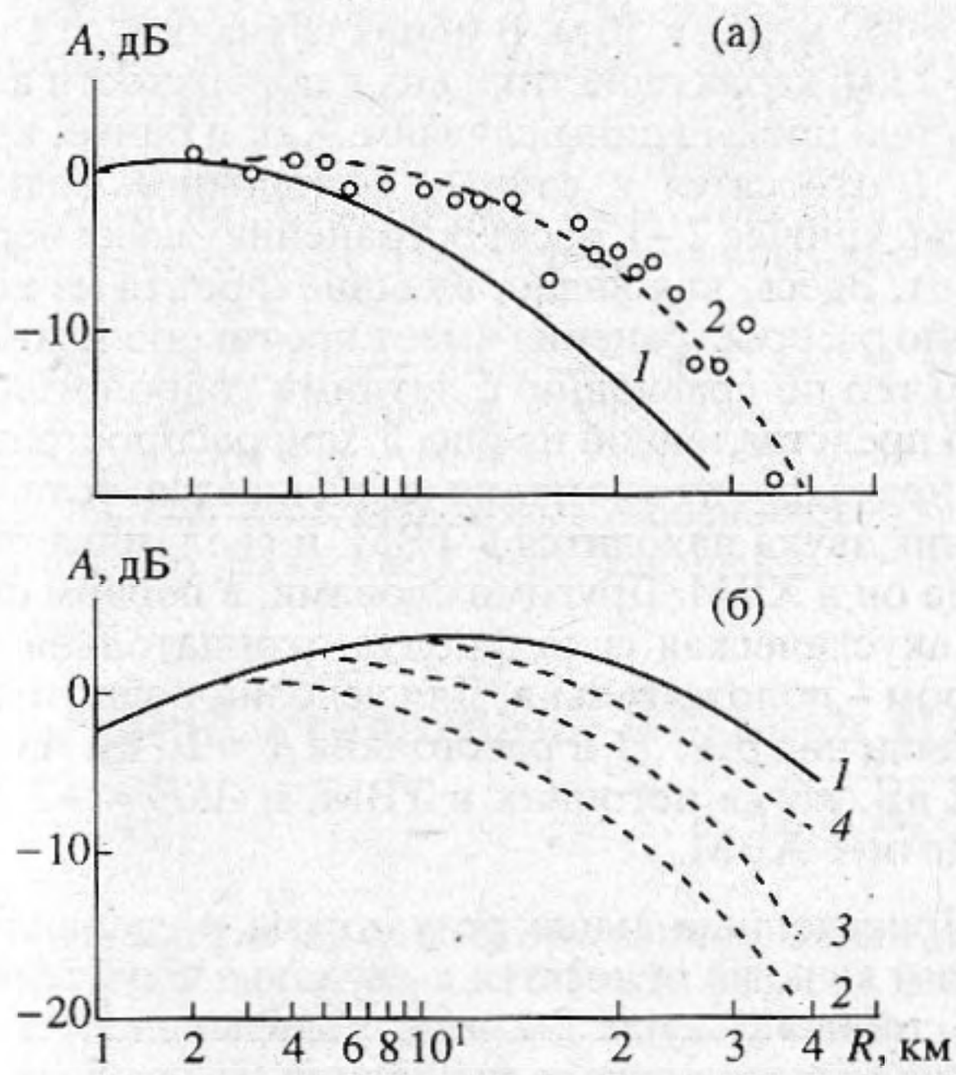

Рис. 9. Аномалия распространения звука через полярный фронт, апрель - май 1985 г., $H_{ист} = 80$ м, $H_{пр} = 200$ м (кривые *1* – без фронта, *2* – $R_ф = 2$ км, *3* – $R_ф = 5$ км, *4* – $R_ф = 10$ км; а – источник в ТВМ, б – источник в ХВМ).

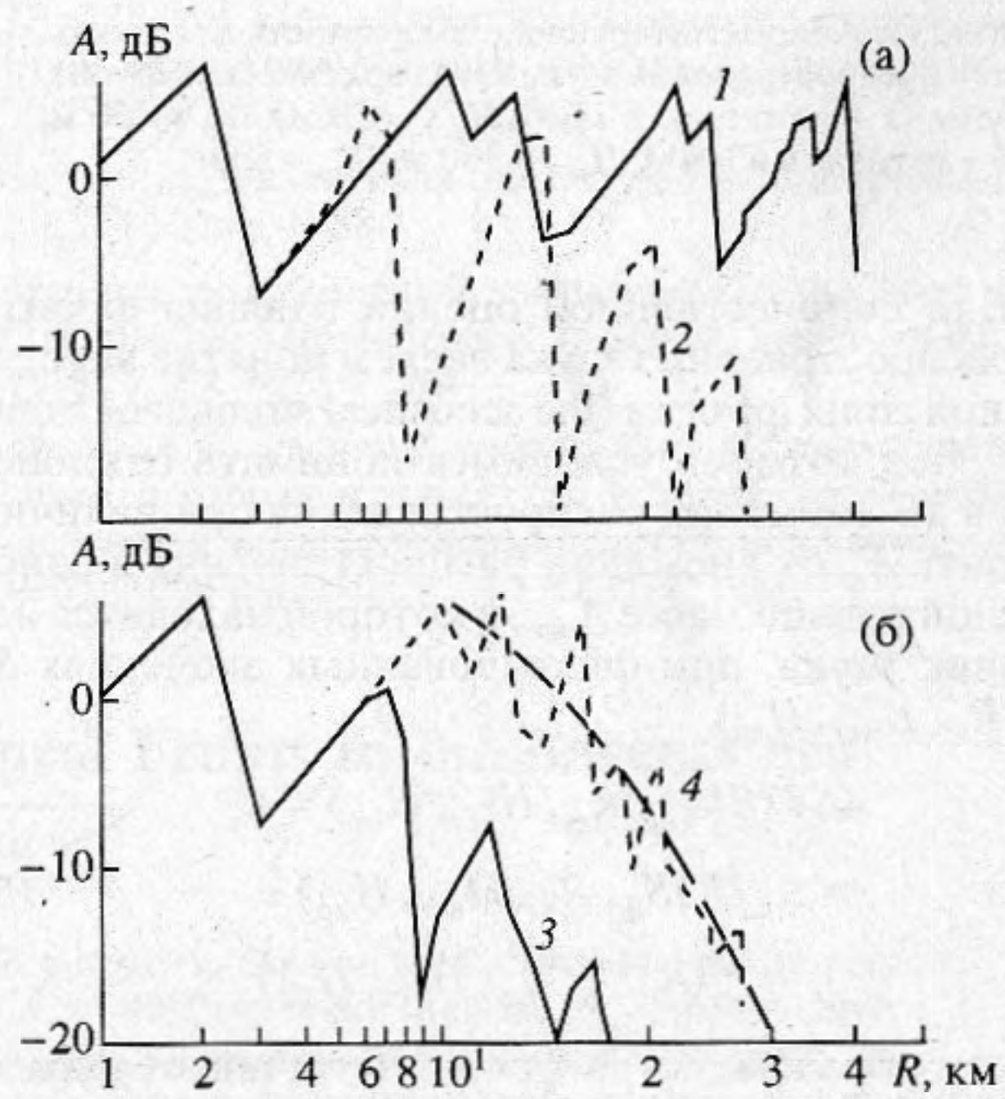

Рис. 10. Аномалия распространения звука через полярный фронт, октябрь - ноябрь 1985 г., источник в ХВМ, $H_{ист} = 80$ м, $H_{пр} = 130$ м (кривая *1* – без фронта, *2* – $R_ф = 2$ км, *3* – $R_ф = 5$ км, *4* – $R_ф = 10$ км).

линии) для весенних условий (рис. 5), $H_{ист} = 80$ м, $H_{пр} = 200$ м. Рисунок 9а относится к нахождению источника звука в ТВМ, рис. 9б – в ХВМ; кривые *1* на графиках соответствуют распространению звука в однородных водных массах, кривые *2*, *3*, *4* – распространению через фронт (кривая *2* – $R_ф = 2$ км, кривая *3* – $R_ф = 5$ км, кривая *4* – $R_ф = 10$ км). Таким образом, при нахождении источника в ТВМ, а приемника в ХВМ аномалия распространения звука через фронт возрастает по сравнению с однородной ТВМ (рис. 9а). В противоположном случае, когда источник звука находится в ХВМ, а приемник в ТВМ, аномалия распространения уменьшается по сравнению с однородной ХВМ (рис. 9б).

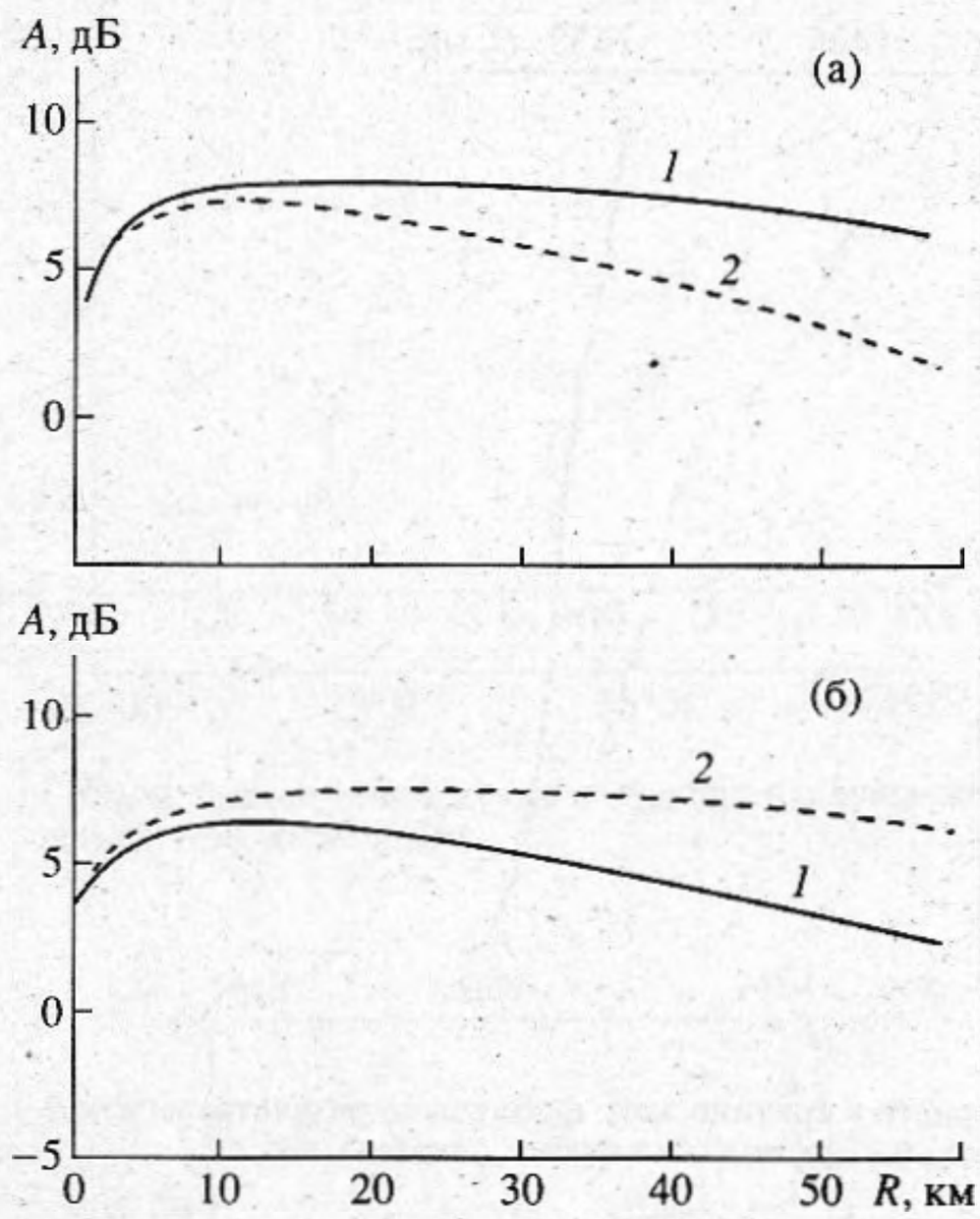

Рис. 11. Аппроксимирующие зависимости для аномалии распространения звука через арктический фронт, зима (а – источник в ТВМ, $H_{ист}$ = 50 м, $H_{пр}$ = 150 м; б – источник в ХВМ, $H_{ист}$ = 150 м, $H_{пр}$ = 50 м).

Для количественной оценки влияния фронта на распространение звука введем понятие акустической силы фронта (the acoustical strength of front) *ASF*, под которой условимся понимать отклонение в дБ аномалии распространения при наличии фронта $A_ф$ от аномалии распространения в однородной водной массе $A_{одн}$, в которой находится источник звука, при фиксированных значениях R, $S_ф$, $R_ф$, $H_{ист}$, $H_{пр}$:

$$ASF(R|S_ф, R_ф, H_{ист}, H_{пр}) = \\ = A_ф(R|S_ф, R_ф, H_{ист}, H_{пр}) - \\ - A_{одн}(R|S_ф, R_ф, H_{ист}, H_{пр}). \quad (6)$$

Таким образом, когда фронт увеличивает аномалию распространения, $ASF > 0$, когда уменьшает – $ASF < 0$. Например, для условий рис. 9а ASF (20|1, 2, 80, 200) = +6.5 дБ, а для тех же условий подводного наблюдения на рис. 9б ASF = −9.5 дБ.

При расчетах аномалии распространения в осенних условиях были использованы профили скорости звука на границах полярного фронта, полученные при проведении натурных экспериментов в октябре - ноябре 1985 г. (рис. 7). Здесь фронт не выходит на поверхность, поэтому естественно было ожидать отличий от полученных ранее результатов. Примеры расчетов аномалии распространения для источника звука в ХВМ, $H_{ист}$ = 80 м, $H_{пр}$ = 130 м приведены на рис. 10; природные условия по дну и поверхности предполагались такими же, как и для весеннего периода. На графиках сплошными и мелкоштриховыми линиями показаны расчетные значения аномалии распространения; кривая *1* соответствует однородной водной массе (источник и приемник в ХВМ), кривая *2* – $R_ф$ = 2 км, кривая *3* – $R_ф$ = 5 км, кривая *4* – $R_ф$ = 10 км; крупным штрихом дана аппроксимирующая кривая для $R_ф$ = 10 км. Как видно, поведение кривых $A(R)$ изменилось; они в большинстве случаев имеют характер осцилляций с большой амплитудой. Тем не менее, закономерности влияния фронта, о которых говорилось выше, в основном сохраняются.

Совершенно другой характер имеют закономерности распространения звука, связанные с положением источника относительно фронта, для зимних гидрологий типа представленных на рис. 8. Это иллюстрируется графиками на рис. 11, на которых приведены аппроксимированные зависимости $A(R)$ для гидрологии G_A арктического фронта (рис. 8б). Рис. 11а относится к случаю нахождения источника звука в ТВМ, $H_{ист}$ = 50 м, $H_{пр}$ = 150 м; рис. 11б – к случаю источника в ХВМ, $H_{ист}$ = 150 м, $H_{пр}$ = 50 м. В обоих случаях $S_ф$ = 1 км, $R_ф$ = 2 км; характеристики дна и поверхности аналогичны предыдущим случаям. Как и ранее, кривые *1* относятся к случаю однородной водной массы, кривые *2* – к распространению звука через фронт. Здесь, как видно, влияние фронта на аномалию распространения имеет противоположный характер по сравнению с летними гидрологиями типа представленной на рис. 5: при распространении через фронт аномалия уменьшается, если источник звука находится в ТВМ, и увеличивается, когда он в ХВМ. Другими словами, в первом случае акустическая сила фронта отрицательна, во втором – положительна. Для условий подводного наблюдения рис. 11 и расстояния R = 20 км ASF = = −2 дБ, когда источник в ТВМ, и ASF = +3 дБ, когда он в ХВМ.

Приведенные выше результаты и сделанные по ним выводы относятся к случаю заглубленного источника звука. Расчеты показывают, что в случае поверхностного источника ($H_{ист}$ = 5 м) основные закономерности влияния фронта оказываются такими же, как и для заглубленного источника, однако сила фронта в большинстве случаев меньше.

Итак, проведенный анализ и собственные измерения позволили определить основные параметры гидрологических фронтов Баренцева моря, полярного и арктического, необходимые для приближенных расчетов распространения звука через них. Расчеты, выполненные на частоте 2 кГц, показали существенное влияние обоих типов фронтов на величину аномалии распрост-

ранения. Основным природным фактором, определяющим влияние фронта, является сезонный, главным образом, летний или зимний; в весенне-летний период, когда градиент скорости звука в верхнем слое воды для ТВМ отрицательный, а для ХВМ близок к нулю, фронт увеличивает аномалию распространения в случае источника в ТВМ и уменьшает, если он в ХВМ; при гидрологии зимнего типа, когда градиент скорости звука в верхнем слое воды в ТВМ близок к нулю, а в ХВМ отрицательный, фронт уменьшает аномалию распространения для источника в ТВМ и увеличивает, когда он в ХВМ. Из условий подводного наблюдения основными факторами являются положение источника звука относительно фронта (в теплой или холодной водных массах), а также расстояние источника до фронта; влияние фронта возрастает при приближении источника к фронту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Визе В.Ю.* Гидрометеорологические условия в области кромки льдов арктических морей // Тр. ААНИИ. 1944. Т. 184.
2. *Шпайхер А.О., Морецкий В.Н.* Полярный гидрологический фронт в Гренландском и Норвежском морях // Океанология, 1964. Т. 4. Вып. 2. С. 267 - 276.
3. *Николаев Ю.В., Макштас А.П., Иванов Б.В.* Физические процессы в прикромочных зонах дрейфующих морских льдов // Метеорология и гидрология. 1984. № 11. С. 73 - 80.
4. *Кузнецов В.Л., Прошутинский А.Ю., Тарасов А.Б.* О положении и структуре фронтальных зон Норвежского моря // Тр. ААНИИ. 1986. Т. 408. С. 56 - 67.
5. *Блинов Н.И. и др.* Некоторые особенности гидрологических фронтов Северо-Европейского бассейна // Проблемы Арктики и Антарктики. 1986. Вып. 62. С. 6 - 11.
6. *Макаров С.С.* Обработка архивных материалов с целью получения данных об устойчивом местоположении фронтальных зон (разделов) в различные периоды года // М.: ГМЦ, 1988.
7. *Макаров С.С. и др.* Исследование гидрологической структуры и ее пространственно-временной изменчивости для Баренцева, Карского, Норвежского и Гренландского морей // М.: ГМЦ, 1989.
8. *Писарев С.В.* Внутренние волны в высокоширотном бассейне, покрытом льдом // М.: АКИН, 1991. Диссертация.
9. *Федоров К.Н.* Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеоиздат, 1983.
10. *Johannessen O.M., Foster L.A.* A note of the topographically controlled oceanic Polar Front in the Barents Sea // JGR. 1978. V. 83. № C9. P. 4567 - 4571.
11. *Wadhams P., Gill A.F., Linden P.F.* Transects by submarine of Greenland Polar Front // Deep-Sea research. 1979. A26. № 12. P. 1311 - 1327.
12. *Johannessen O.M. et al.* Ice-edge eddies in the Fram Strait Marginal Ice Zone // Science. 1987. V. 236. № 4800. P. 427 - 429.
13. *Dyer I. et al.* Ocean dynamics and acoustic fluctuations in the Fram Strait Marginal Ice Zone // Science. 1987. V. 236. № 4800. P. 435 - 436.
14. *Боуден К.* Физическая океанография прибрежных вод. М.: Мир, 1988.
15. *Mellberg et al.* Acoustic propagation in the Western Greenland Sea frontal zone // J. Acoust. Society of Am. 1991. V. 89. № 5. P. 2144 - 2156.
16. *Вагин А.В.* Расчет лучевых картин, суммарного звукового поля в точке, его угловой, временной, фазовой и энергетической структуры в двумерно-неоднородной среде // М.: АКИН, 1974.

Sound Propagation Through Hydrological Fronts in the Barents Sea

I. A. Aleksandrov

The polar and the arctic fronts are the principal fronts in the Barents Sea. Data on the location and parameters of these fronts are reported for various seasons. The stable value of the front width is about 1 - 2 km, the depth is about 100 m or down to the bottom. The effect of natural factors and underwater experimental geometry on sound propagation through a front was numerically investigated. The natural factors are the hydrological parameters and their seasonal variations, while the underwater experimental geometry includes the location of the source and the receiver with respect to the front. Calculations were performed for a frequency of 2 kHz with depths of the source and the receiver ranging from 50 to 100 m. The front is shown to considerably affect the propagation anomaly. The strength of the effect depends upon the vertical sound profile on either side of the front and upon the distance between the source and the front. The sign of the effect – that is, whether it increases or decreases the propagation anomaly – depends upon the mutual arrangement of the source and the front and upon the season.