АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2002, том 48, № 4, с. 485–492

УДК 551.463

МЕЖГОДИЧНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ УСЛОВИЙ ДАЛЬНЕГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В НОРВЕЖСКОМ МОРЕ

© 2002 г. Р. А. Вадов

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника 4
E-mail: vadov@akin.ru

Поступила в редакцию 16.05.2001 г.

На основе экспериментального материала, полученного при исследовании особенностей формирования звуковых полей в Норвежском море, оценивается межгодичная изменчивость условий распространения. Производится сравнительный анализ материалов двух опытов по дальнему распространению взрывных сигналов, проведенных в летних условиях (август месяц) на трассе, пересекающей центральную глубоководную часть Норвежского моря, с разницей во времени – четыре года. Отмечаются существенные изменения в поле скорости звука, связанные с изменением расстояния между зарегистрированными в этих опытах ядрами холодных (в районе Норвежской котловины) и тепловых (в районе Лофотенской котловины) вод. Такие изменения поля скорости звука, как показывает расчет, могут приводить к заметным изменениям аномалии распространения, к изменениям характера спадания уровня звукового поля с расстоянием. Несмотря на существенные различия в условиях распространения, экспериментальные значения коэффициента низкочастотного затухания, полученные по материалам этих опытов, если и различаются, то весьма незначительно.

Неоднократно в Норвежском море Акустическим институтом проводились эксперименты с целью определения затухания звука, изучения пространственно-временной и энергетической структуры звукового поля в подводном звуковом канале (ПЗК).

В представленной ранее (по материалам этих исследований) работе [1] основное внимание было уделено пространственной изменчивости условий распространения звука в Норвежском море. Излагались результаты ряда опытов с тональными источниками, проведенных в Норвежской и Лофотенской котловинах. Анализировались материалы одного из двух опытов по дальнему распространению взрывных сигналов, проведенных в летнее время (август месяц) вдоль одной и той же трассы, пересекающей всю центральную, глубоководную часть Норвежского моря. Второй (аналогичный) опыт со взрывными источниками звука был проведен с разницей во времени (относительно первого) в четыре года. Несомненный интерес представляет сравнительный анализ материалов этих опытов, несущих информацию о межгодичной изменчивости условий дальнего распространения звука в Норвежском море.

Гидрологические условия в Норвежском море формируются под воздействием существующих в нем течений [2, 3]. Через Фареро–Шетландский желоб в Норвежское море поступают теплые и соленые воды Атлантики (ответвление Гольфстрима–Норвежское течение). С севера и северо-запада вторгаются холодные арктические воды (Восточно-Гренландское течение). От Норвежского течения по мере распространения на север отделяются потоки, образующие большие круговороты, направленные против часовой стрелки. Направления локальных течений, глубина их проникновения существенным образом определяются генеральным рельефом дна. Ложе Норвежского моря характеризуется пересеченным рельефом. Центральную часть моря занимают две котловины: Норвежская и Лофотенская с глубинами до 3000–3600 м.

В Норвежской котловине ось ПЗК расположена ближе к поверхности, нежели в Лофотенской. По мере продвижения с юга на север вдоль трассы происходит заглубление оси ПЗК с 500–600 м до 1000–1100 м. Одновременно с этим формируется второй, менее выраженный минимум скорости звука на глубине ~150–300 м. Во время проведения опытов перепад в значениях скорости звука у поверхности и на оси основного ПЗК составлял 18–24 м/с. У дна (при глубине моря 3300 м) значение скорости звука на 32–40 м/с превышало значение скорости звука у поверхности. Благодаря летнему прогреву приповерхностных вод на глубине 25–40 м наблюдался слой температурного скачка, отрицательный градиент скорости звука в котором достигал –0.7…–1.3 1/с.

На рис. 1 представлена структура поля скорости звука, построенная по результатам гидрологического обследования трассы, выполненного при проведении первого и второго опытов по дальнему распространению взрывных сигналов.

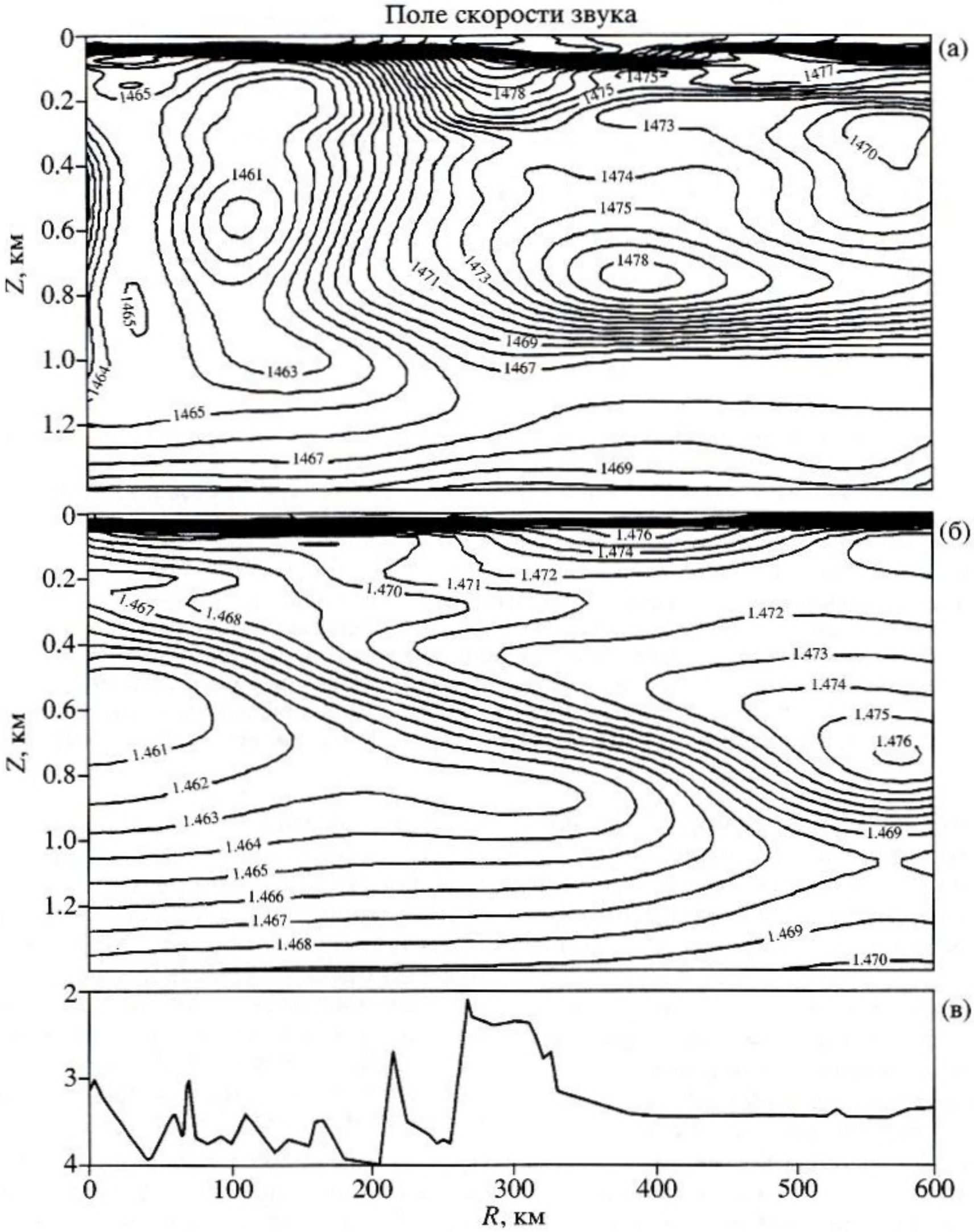

Рис. 1. Поле скорости звука и рельеф дна, зарегистрированные на трассе дальнего распространения взрывных сигналов в опытах разделенных во времени четырьмя годами. Числа у изолиний – значения скорости звука в м/с.

а – поле скорости звука в первом опыте, б – поле скорости звука во втором опыте, в – рельеф дна вдоль исследуемой трассы (по материалам эхолотного промера, выполненного при проведении первого опыта).

При обследовании выполнялось от 7 до 10 разнесенных по дистанции гидрологических станций. Соседние линии изоскорости различаются на 1 м/с. Поле скорости звука построено с привязкой к рельефу дна, зарегистрированному во время проведения первого опыта. Несмотря на то, что эхолотный промер выполнялся при проведении каждого опыта, результаты этих промеров в деталях несколько различаются. При движении "излучающего" судна незначительные отклонения от трассы приводили к потере некоторых деталей рельефа дна. Вместе с тем, местоположение основных наиболее крупных поднятий дна, выявленных при проведении этих опытов, оставалось практически неизменным.

Представленные на рисунке поля скорости звука заметно различаются. Различаются в первую очередь резкостью заглубления линий изоскорости при продвижении вдоль трассы. Характерной особенностью представленных полей скорости звука является присутствие (на глубине ~600–650 м) в районе Норвежской котловины ядра холодных вод (с характерными значениями

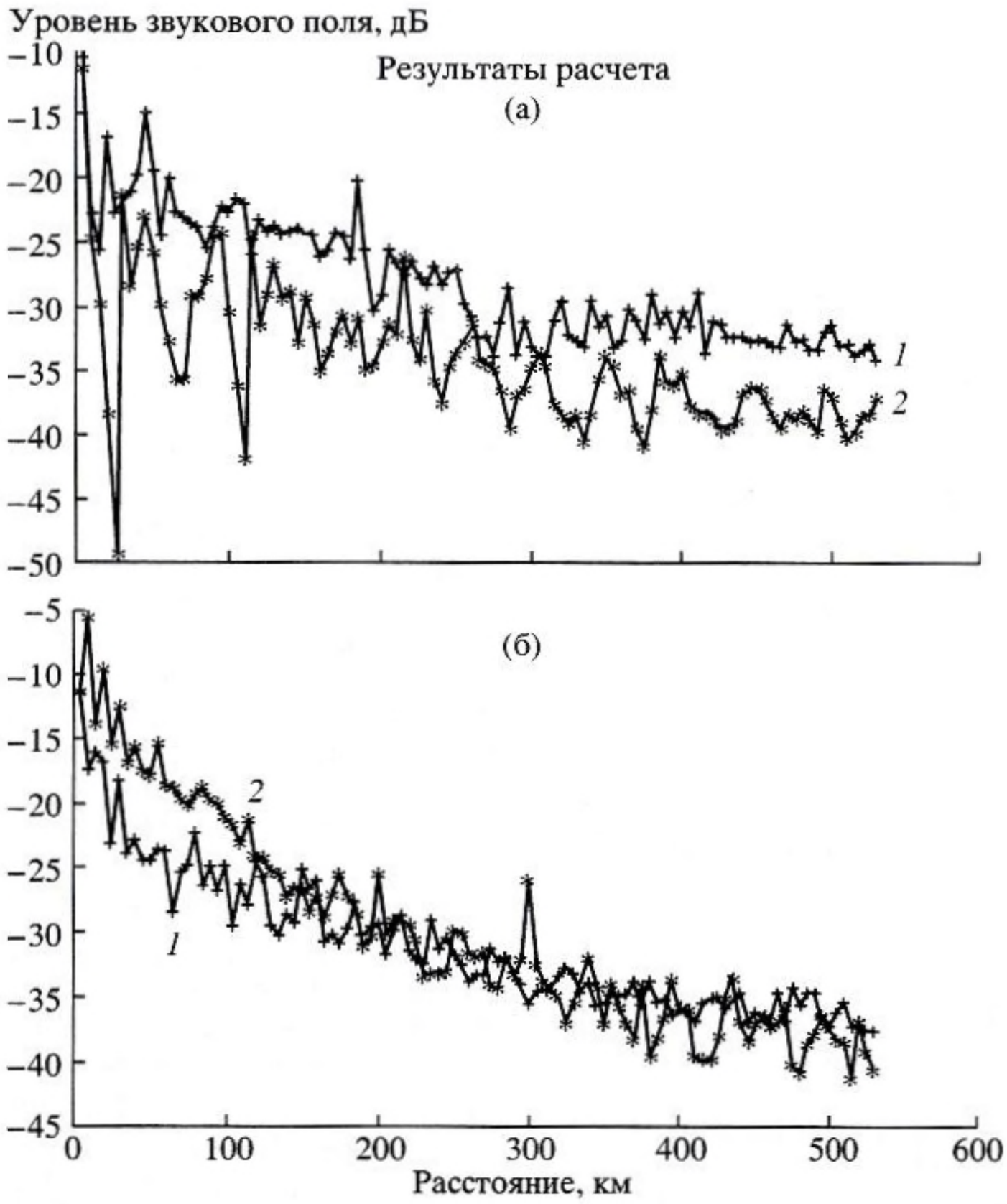

Рис. 2. Результаты расчета звукового поля для условий проведения первого (*1*) и второго (*2*) опытов, разделенных во времени четырьмя годами.

а – z_* = 300 м, z = 300 м; б – z_* = 300 м, z = 600 м (z_* – глубина источника, z – глубина приемника).

скорости звука ~1460 м/с), а в районе Лофотенской котловины – ядра теплых вод (с характерным значением скорости звука ~1476–1478 м/с). Расстояние между ними (вдоль трассы) в этих опытах различалось примерно в 2 раза. При расстоянии между ними 250–300 км (в первом опыте) наблюдалось довольно резкое заглубление линий изоскорости при переходе от Норвежской к Лофотенской котловине. При расстоянии между ними 550–600 км (во втором опыте) наблюдалось плавное заглубление линий изоскорости. Не вызывает сомнений связь наблюдаемых ядер холодных и теплых вод с холодными Арктическими и теплыми Атлантическими водами, поступающими в Норвежское море с Восточно-Исландским течением и с ветвью Гольфстрима.

Ядро холодных вод в районе Норвежской котловины также хорошо прослеживается по гидрологическим материалам, представленным в базе данных "Naval Oceanographic Office Data Warehouse" [4]. Однако, более мобильное ядро теплых вод, зарегистрированное нами в районе Лофотенской котловины, в материалах этой базы данных на обследуемой нами трассе не проявляется.

Несомненный интерес представляют оценки возможного влияния изменчивости поля скорости звука, связанной с отмеченным выше изменением местоположения ядра теплых вод. К сожалению, геометрия проведения этих опытов (взаимное расположение источника и приемников) заметно различается, что затрудняет проведение сопоставительного анализа влияния условий распространения на формирование звуковых полей в эксперименте. Для выполнения такого анализа была проведена серия расчетов закона спадания уровня звукового поля вдоль исследуемой трассы для одинакового в том и другом случае расположения корреспондирующих точек. Расчеты выполнялись по программе А.В. Вагина [5] для ровной поверхности моря, поглощающего дна, для ряда горизонтов размещения источника и приемников, в том числе и соответствующих горизонтам их размещения в экспериментах. На рис. 2 представлены рассчитанные для гидрологичес-

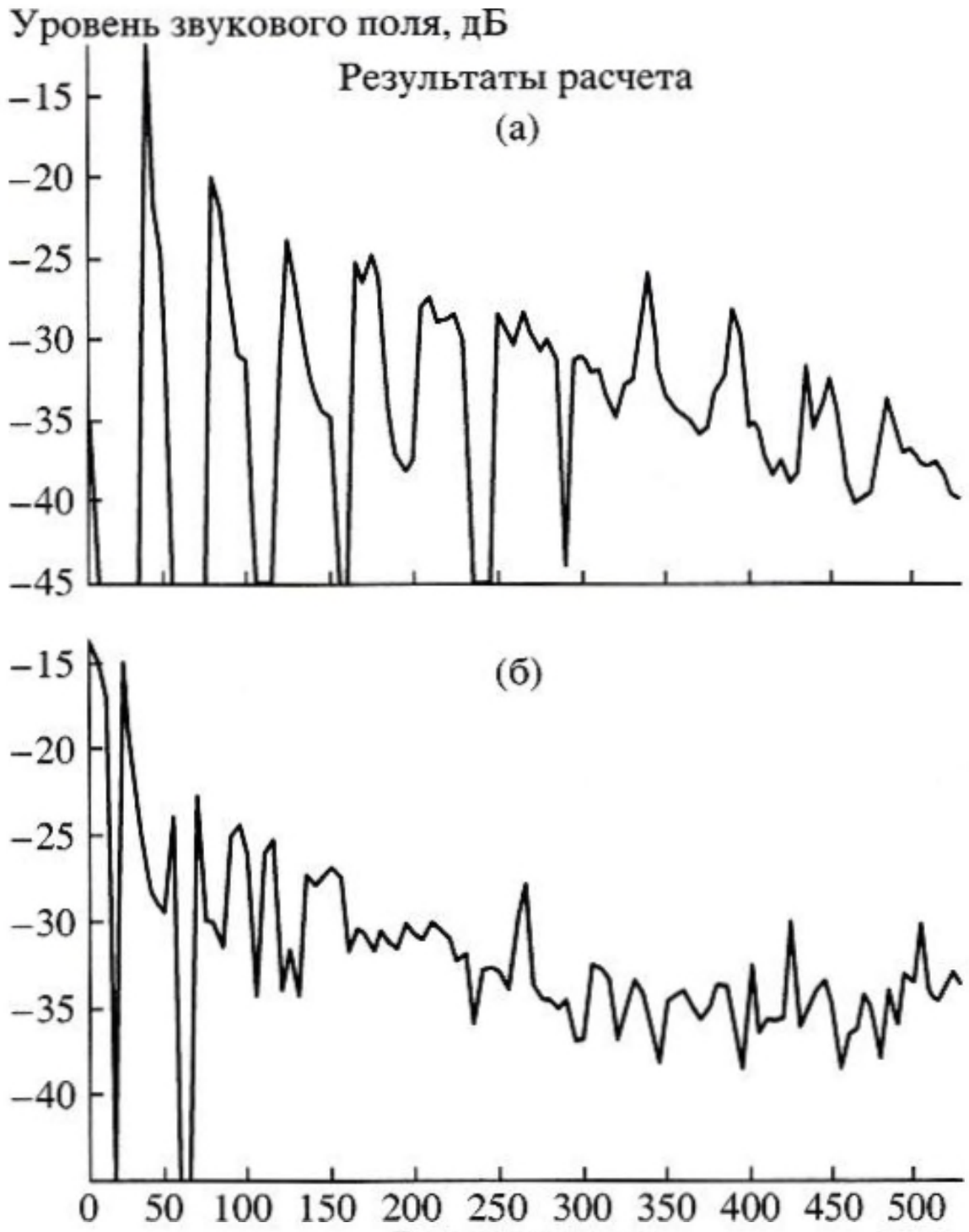

Рис. 3. Результаты расчета звукового поля для условий проведения второго опыта.
а – $z_* = 150$ м, $z = 100$ м; б – $z_* = 150$ м, $z = 1200$ м.

ких ситуаций, сложившихся при проведении первого и второго опытов, спады уровня звукового поля при расположении источника, движущегося вдоль трассы, на горизонте 300 и 600 м, для приемника, расположенного на горизонте 600 м в крайней южной точке трассы. Различия в характере спада – заметные. В первом случае практически на всей трассе уровни звукового поля (в среднем) различаются на 5–7 дБ. Во втором случае наблюдается существенное различие в крутизне спадания уровня звукового поля (до 10–15 дБ на 1000 км).

При проведении второго опыта со взрывными источниками звука приемное судно располагалось в крайней южной точке трассы. Излучающее судно двигалось от приемного со скоростью около 11 узлов, сбрасывая малые заряды, укомплектованные детонаторами гидростатического действия, с интервалом 7–8 минут – в районе первой и второй зон конвергенции, на остальной части трассы – с интервалом 20 минут. Подрыв зарядов осуществлялся на глубине 150 м. Расстояние между судами на момент сброса каждого заряда определялось по времени распространения акустического сигнала. Периодически оно уточнялось по результатам обсервации, осуществляемой на обоих судах при помощи спутниковой навигационной аппаратуры. Всего было сброшено около 100 зарядов. Прием взрывных сигналов производился на ненаправленные системы, расположенные на горизонтах 100 м (выше оси ПЗК) и 1200 м (ниже оси ПЗК). Во время проведения опыта скорость ветра изменялась в пределах 8–10 м/с, направление ветра – в пределах 40–50° (вдоль исследуемой трассы).

На глубине 150 м, соответствующей горизонту подрыва зарядов, значение скорости звука отличалось от ее значения на оси ПЗК на 7–9 м/с. Подрыв зарядов производился заметно выше оси ПЗК. Тем не менее, ПЗК удерживал лучи, вышедшие из источника под углами к горизонту, изменяющимися в пределах ±8°. При приеме сигнала на выбранных горизонтах формировалась зональная структура поля. На глубине приема 1200 м скорость звука была на 5–6 м/с ниже ее значения на горизонте излучения. Значение скорости звука на глубине приема 100 м превышала ее значение на горизонте излучения всего лишь на 1–2 м/с.

На рис. 3 представлены результаты расчета звукового поля, выполненного в лучевом приближении (по программе А.В. Вагина) с учетом рельефа дна и меняющихся вдоль трассы распространения гидрологических условий для горизонтов приема 100 и 1200 м и источника, перемещающегося по трассе на глубине 150 м, соответствующих геометрии проведенного опыта. Дно в расчетах принималось абсолютно поглощающим. Расчеты были выполнены с целью выяснения характера зональной структуры поля и ее эволюции при продвижении источника по трассе. Если на горизонте приема 100 м прослеживается до 6–7 зон конвергенции – последняя зона тени формируется на расстоянии около 300 км, то при размещении приемника на 1200 м зональность звукового поля наблюдается всего лишь до 60–70 км.

Из-за заметного подъема дна (соответствующего уменьшению глубины до 2100 м, на которой значение скорости звука становится равным ее значению у поверхности), локализованного в районе границы между Норвежской и Лофотенской котловинами, на дистанциях, превышающих 200–250 км, сигналы, отраженные только от поверхности, экранируются поднятием дна и к приемникам не доходят. На приемники попадают либо “чисто водные” сигналы, либо сигналы, отраженные как от дна, так и от поверхности, сильно ослабленные контактом с дном.

Таким образом, при оценке коэффициента затухания (для исключения влияния взволнованной поверхности) в первую очередь в этом опыте следует анализировать спад звукового поля, зарегистрированный на горизонте приема 1200 м на участке трассы от 250 до 650 км, где сформировалась

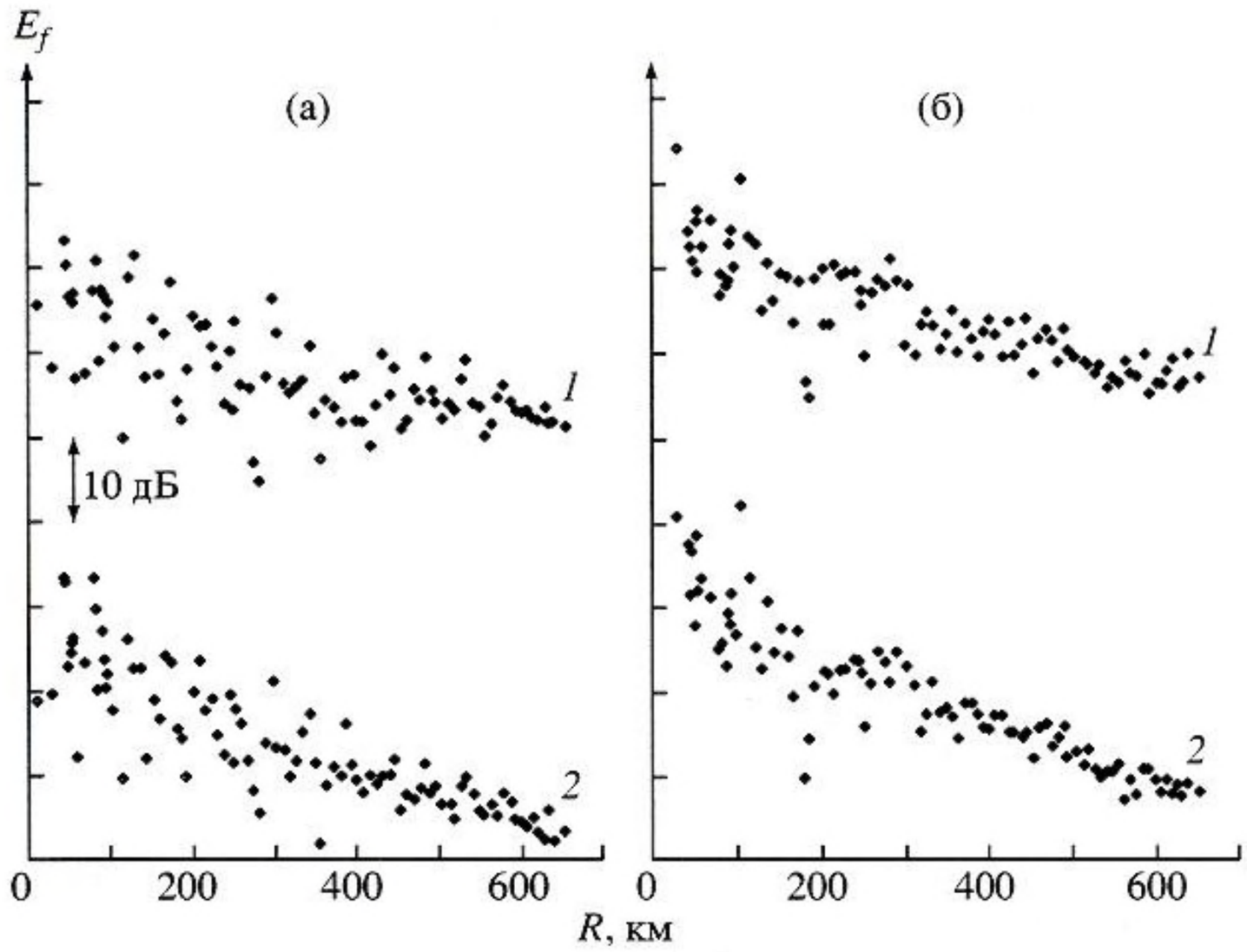

Рис. 4. Экспериментальные спады уровня звукового поля по материалам второго опыта на частотах 200 Гц (*1*) и 400 Гц (*2*).
а – $z_* = 150$ м, $z = 100$ м; б – $z_{ист} = 150$ м, $z = 1200$ м.

устойчивая картина сплошной освещенности (последняя зона тени на этом горизонте согласно расчетам формируется на расстоянии 60.5–67 км).

Такие оценки значений коэффициента затухания звука были произведены для диапазона частот 160–800 Гц. Для исключения неизвестного закона геометрического расхождения был применен "дифференциальный" метод определения коэффициента затухания, которым экспериментаторы неоднократно пользовались в сложных гидрологических ситуациях. Этот метод построен на двух предположениях. Первое – закон геометрического расхождения неизвестен, но одинаков для всего исследуемого диапазона частот. Второе – частотная зависимость коэффициента затухания описывается степенной функцией при отсутствии постоянной составляющей. Уровни звукового поля на отдельных частотах нормируются к уровню на одной из частот, принятой за реперную. При этом полностью исключается неизвестный закон геометрического расхождения. По нормированным спадам на каждой из частот определяется "дифференциальный" коэффициент затухания, равный, как нетрудно показать, разности значений полного коэффициента затухания на двух частотах: анализируемой и реперной. Аппроксимируя частотную зависимость "дифференциального" коэффициента затухания степенной зависимостью и отбрасывая свободный член, получаем для определения полного коэффициента затухания аналитическое выражение вида

$$\beta = af^n \qquad (1)$$

В качестве характеристики звукового поля, эквивалентной энергии взрывного сигнала в полосе частот Δf, принималось значение

$$E_f = \int_0^T p_f^2(t)\,dt,$$

где T – длительность взрывного сигнала, $p_f(t)$ – давление во взрывном сигнале, приведенное к полосе частот Δf. Спектрально-энергетический анализ взрывных сигналов и последующая обработка экспериментальных материалов производились на ЭВМ.

В результате обработки взрывных сигналов были получены кривые спадания уровня звукового поля с дистанцией, являющиеся исходным материалом для определения частотной зависимости коэффициента затухания. На рис. 4 для иллюстрации представлены экспериментальные законы спадания уровня звукового поля на частотах 200 и 400 Гц, зарегистрированные при приеме взрывных сигналов на горизонтах 100 и 1200 м. На рисунках явно просматриваются довольно резкие изменения характера спада, локализованные в районе границы между Норвежской и Лофотенской котловинами. Зональность звукового поля на экспериментальных спадах проследить довольно сложно. По-видимому, это связано с недостаточной по дистанции частотой подрыва зарядов (~7–8 км). Однако, разброс экспериментальных значений уровня звукового поля на горизонте приема 1200 м заметно уменьшается с дистанции 200–250 км, тогда как на горизонте

Результаты определения коэффициента затухания "дифференциальным" методом на участке трассы, удаленном от точки приема на 250–650 км

Частота, Гц	Коэф. затухания, дБ/км при глубине приема = 1200 м		Коэф. поглощения, дБ/км	Коэф. затухания, дБ/км при глубине приема = 100 м
	Эксперимент	Расчет по ф. (1)	Расчет по [5]	Эксперимент
160	0.008	0.0076	0.0015–0.0016	0.004
200	0.012	0.0100	0.0023–0.0025	0.007
250	0.012	0.0131	0.0035–0.0038	0.009
315	0.015	0.0173	0.0054–0.0058	0.017
400	0.025	0.0231	0.0084–0.0089	0.025
500	0.033	0.0303	0.0122–0.0130	0.034
630	0.038	0.0400	0.0175–0.0190	0.043
800	0.054	0.0534	0.0250–0.0264	0.050

Примечание. На частотах 630–800 Гц затухание определялось на дистанциях, не привышающих 550 км.

приема 100 м плавное уменьшение разброса происходит на протяженном участке трассы с 250 до 500 км.

Для описания частотной зависимости затухания выражением (1) при размерности частоты – кГц, затухания – дБ/км для горизонта приема 1200 м были получены следующие значения параметров: $a = 0.07$, $n = 1.2$. Напомним, что для описания частотной зависимости затухания звука выражением (1) в первом опыте были получены значения параметров: $a = 0.044$–0.052, $n = 0.99$–0.925.

Экспериментальные значения коэффициента затухания, определенные в этом опыте, представлены в таблице 1. В предпоследнем столбце таблицы для сравнения представлены значения коэффициента поглощения, рассчитанные по формулам, приведенным в работе [6] и отражающим зависимость коэффициента поглощения от температуры (T), солености (S) и водородного показателя (pH). Для Норвежского моря при расчетах коэффициента поглощения принимались следующие характеристики водной среды: $T = 272.5$°K, $S = 35.2$‰, pH = 8.15–8.2.

Полученные по материалам первого и второго опытов выражения для частотной зависимости коэффициента затухания дают близкие между собой значения. Различия значений коэффициента затухания, рассчитанных по формуле (1) с приведенными выше параметрами, достаточно хорошо согласуются во всем обследованном диапазоне частот (63–800 Гц) – разброс не превышает ±20%. На низких (<200 Гц) частотах этот разброс находится в пределах оцениваемой погрешности измерений: ±0.001–0.002 дБ/км. Вместе с тем, показатель степени при частоте в этих опытах различается в 1.2–1.3 раза.

По спадам звукового поля, зарегистрированным на горизонте 100 м, также были проведены оценки затухания (несмотря на зональную структуру поля вплоть до 300-километровой дистанции). При этом возникли определенные сложности. При аппроксимации частотной зависимости "дифференциальных" коэффициентов затухания степенной функцией появилась очень большая (явно завышенная) постоянная составляющая. Для проведения более реальных оценок затухания при переходе к полному коэффициенту затухания для этого горизонта было решено ориентироваться на его значение, полученное для горизонта приема 1200 м на реперной частоте (315 Гц): 0.0173 дБ/км. Результаты анализа взрывных сигналов, зарегистрированных на горизонте 100 м, также представлены в таблице (последний столбец). В условиях перехода от зональной структуры поля к сплошной освещенности оценки затухания ранее нами не проводились.

Все экспериментальные значения коэффициента затухания, полученные как в первом, так и во втором опытах (кроме представленных в последнем столбце таблицы) для их сравнения приведены на рис. 5. Следует признать, что, несмотря на существенные изменения в условиях распространения звука, различия между полученными в этих опытах экспериментальными данными по затуханию звука незначительны. Совместное их рассмотрение приводит к выводу о возможности описания частотной зависимости коэффициента затухания в Норвежском море для летних условий соотношением: $\beta = \{0.06 f_{\text{кГц}}^{1.1}\}$ дБ/км.

Вместе с тем только часть затухания может быть объяснена поглощением звука в морской воде. Большая его часть требует дополнительного объяснения. Одной из наиболее вероятных причин столь высоких значений коэффициента затухания в Норвежском море, как отмечалось ранее [1], является рассеяние звука на тепловых неоднородностях типа тонкослоистых образований (горизонтальный размер на 1–2 порядка пре-

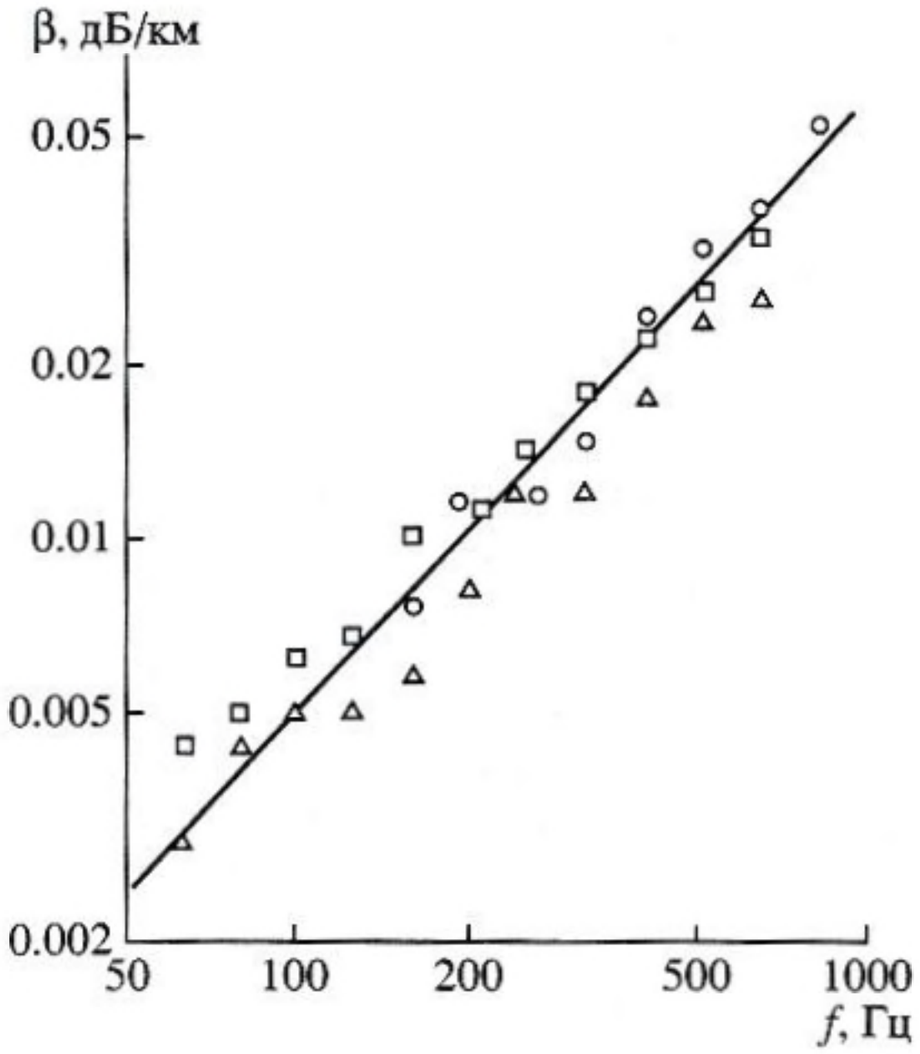

Рис. 5. Экспериментальные значения коэффициента затухания, определенные "дифференциальным" методом по материалам первого (Δ, □) и второго (○) опытов.

— – частотная зависимость затухания, описываемая функцией $\beta = \{0.06 f_{\text{кГц}}^{1.1}\}$ дБ/км.

вышает их вертикальный размер). Такой вывод подкрепляется следующими фактами:

1. Норвежское море подвержено сильному влиянию течений (холодного Восточно-Исландского и теплого Северо-Атлантического). В работе [7] на основе анализа большого экспериментального материала делается обоснованный вывод о генерации тонкослоистых неоднородностей в районах океана, подверженных воздействию сильных течений типа Прикамчатского. Для таких неоднородностей в этих районах в качестве характерных приводятся значения пределов изменения среднего квадрата флуктуаций акустического показателя преломления $\mu^2 \cong 10^{-5}$–10^{-7}.

2. Для объяснения значений коэффициента затухания, полученных в нашем опыте на частотах ~400–500 Гц, рассеянием звука на тонкоструктурных неоднородностях, в соответствии с выкладками, проведенными в работе [8], достаточно положить $\mu^2 \cong 1.4 \times 10^{-7}$.

3. При допущении фрактальной природы тонкослоистых образований в океане, рассеяние на которых приводит к степенной зависимости низкочастотного затухания [9], при определенных параметрах фрактала могут быть получены значения показателя степени, согласующиеся с результатами нашего эксперимента.

Подводя итог проведенному анализу экспериментальных материалов по межгодичной изменчивости условий формирования звукового поля в подводном звуковом канале Норвежского моря необходимо отметить следующее:

– На трассе дальнего распространения, пересекающей с юго-запада на северо-восток центральную глубоководную часть Норвежского моря, происходит заглубление оси ПЗК с 600 до 1000–1100 м. Резкость заглубления оси ПЗК в разные годы заметно меняется в зависимости от взаимного расположения постоянно присутствующих на глубине ~600 м: ядра холодных вод (р-н Норвежской котловины) и ядра теплых вод (р-н Лофотенской котловины). При проведении опытов, разделенных во времени четырьмя годами, расстояние между ядрами этих вод различалось более чем в два раза.

– В зависимости от резкости заглубления оси канала при определенных горизонтах расположения излучающей и приемной систем, как показали расчеты, возможно изменение аномалии распространения на 5–7 дБ. При других горизонтах расположения систем возможно заметное изменение крутизны спадания уровня звукового поля.

– Несмотря на существенные изменения поля скорости звука при проведении опытов со взрывными источниками значения низкочастотного коэффициента затухания, определенные "дифференциальным" методом, если и изменяются, то весьма незначительно.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 01-02-16636, 01-05-64711).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вадов Р.А.* Некоторые результаты исследований дальнего распространения звука, проведенных в Норвежском море // Акуст. журн. 2002. № 1. С. 28–38.
2. *Суховей В.Ф.* Моря мирового океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 288 с.
3. *Залогин Б.С., Косарев А.Н.* Моря. М.: Мысль, 1999. С. 400.
4. Адрес базы данных в Интернет http://128,160.23.42/.
5. *Вагин А.В.* Расчет лучевых картин, суммарного звукового поля, его угловой, временной, фазовой и энергетической структуры в двумерно-неоднородной среде // Отчет АКИН. 1974.
6. *Вадов Р.А.* Поглощение и затухание низкочастотного звука в морской среде // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 5. С. 624–631.
7. *Ростов И.Д.* Тонкая термохалинная стратификация различных районов Тихого океана. Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. Владивосток: ТОИ ДВНЦ, 1985. 177 с.
8. *Лысанов Ю.П., Сазонов И.А.* О частотной зависимости коэффициента затухания звука в океане // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 4. С. 697–702.
9. *Lysanov Yu.P., Lyamshev L.M.* On fractal nature of low-frequency sound attenustion in the ocean / Proceedings of the Fourth European Conference on Underwater Acoustics, Rome, 1998. P. 801–805.

Year-to-Year Variability of the Long-Range Propagation Conditions in the Norwegian Sea

R. A. Vadov

Andreev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia
e-mail: vadov@akin.ru

Abstract—On the basis of the experimental data on the sound field formation in the Norwegian Sea, the year-to-year variability of the propagation conditions is estimated. A comparative analysis is performed for the data obtained from two long-range-propagation experiments with explosion-generated signals. The experiments were carried out in summertime (August) on a path crossing the central deep-water part of the Norwegian Sea and were separated in time by a period of four years. Noticeable changes are found to occur in the sound speed fields between the two experiments. These changes are related to a change in the distance between the cores of cold waters (observed in the region of the Norwegian Basin) and warm waters (observed in the region of the Lofoten Basin). According to calculations, the observed changes in the sound speed structure can lead to considerable changes in the propagation anomaly and in the range dependence of the sound field decay. In spite of the noticeable difference in the propagation conditions, the experimental coefficients of low-frequency attenuation differ little for the two experiments.