

УДК 551.463

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В ПРИКАМЧАТСКОМ РЕГИОНЕ ТИХОГО ОКЕАНА

© 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 4.12.01 г.

Анализируются результаты трех опытов по дальнему распространению взрывных сигналов, проведенных в Тихом океане у берегов Камчатки в летних (июль месяц) условиях – условиях сформированного подводного звукового канала. Трассы распространения в этих опытах были направлены к берегу и пересекали холодное Камчатское течение. Заметная пространственная изменчивость гидрологических условий на 250-километровом глубоководном участке трасс распространения привела к заметным отклонениям закона геометрического расхождения уровня звукового поля в канале от цилиндрического. Анализируется временная структура звукового поля, формируемая при канальном распространении в этом регионе. Для классических “четверок” сигналов, отраженных от поверхности, построена усеченная “ $t/N-R/N$ ”-диаграмма, несколько различающаяся для трех различных трасс. Чисто “водные” сигналы приходят в точку приема практически не разделяющимися по времени. В одном из опытов на расстоянии около 100–120 км от точки приема зарегистрированы явные изменения в структуре взрывного сигнала – резко возросла оконечная часть сигнала. На экспериментальных спадах уровня звукового поля с дистанцией так же зарегистрирован заметный подъем уровня на этом же участке трассы. При проведении этого опыта в гидрологических характеристиках водной среды на том же расстоянии зафиксированы изменения, соответствующие ближе к точке приема границе холодного течения. По спадам уровня звукового поля дифференциальным методом определены значения коэффициента затухания на частотах 400–2000 Гц. Полученные экспериментальные данные по затуханию низкочастотного звука в Прикамчатском регионе Тихого океана заметно превышают расчетные значения коэффициента поглощения.

Неоднократно в разные годы в прибрежных Прикамчатских водах Тихого океана проводились исследования дальнего распространения взрывных сигналов в условиях сформированного подводного звукового канала (ПЗК). Опыты проводились с целью изучения особенностей формирования временной и энергетической структуры звукового поля в этом регионе. Как правило, исследования проводились вдоль трасс распространения, направленных перпендикулярно береговой линии. При этом исследуемые трассы пересекали холодное Камчатское течение, континентальный склон, включая участок прибрежной шельфовой зоны, приемная система располагалась вдали от берега (на расстоянии ~400–450 км от него). Некоторые результаты анализа экспериментальных материалов, полученных при проведении этих опытов, были опубликованы ранее [1]. В данной статье основное внимание обращается на особенности формирования временной структуры взрывного сигнала, на характер спадания звукового поля с дистанцией на глубоководном (глубже 2000 м) участке обследуемых трасс.

Гидрологические условия в районе проведения эксперимента. Для Прикамчатского регио-

на Тихого океана характерна заметная пространственная изменчивость океанологических характеристик.

Поле скорости звука в этом регионе формируется под влиянием прибрежных стоковых вод, а так же холодного Камчатского течения, которое приводит к заметным пространственным изменениям глубины расположения оси ПЗК, формируемого в летних условиях. В июле–августе гидрологические условия характеризуются ярко выраженным ПЗК с осью, расположенной на глубине 40–60 м в прибрежных водах, на глубине ~100 м в водах, удаленных от берега на 300–400 км. В 100–120 км от прибрежного шельфа наблюдается сравнительно резкое изменение глубины расположения оси канала, изменение формы ПЗК, которое обусловлено внедрением холодных вод прибрежного Камчатского течения (проникающего до глубин 200–300 м, простирающегося в поперечнике на 100 км. Перепад значений скорости звука между поверхностью и осью канала вне течения достигает 28–35 м/с. Перепад значений скорости звука между осью ПЗК и придонными водами составляет 35 м/с при глубине 2000 м, увеличиваясь до 80 м/с при глубине 5000 м.

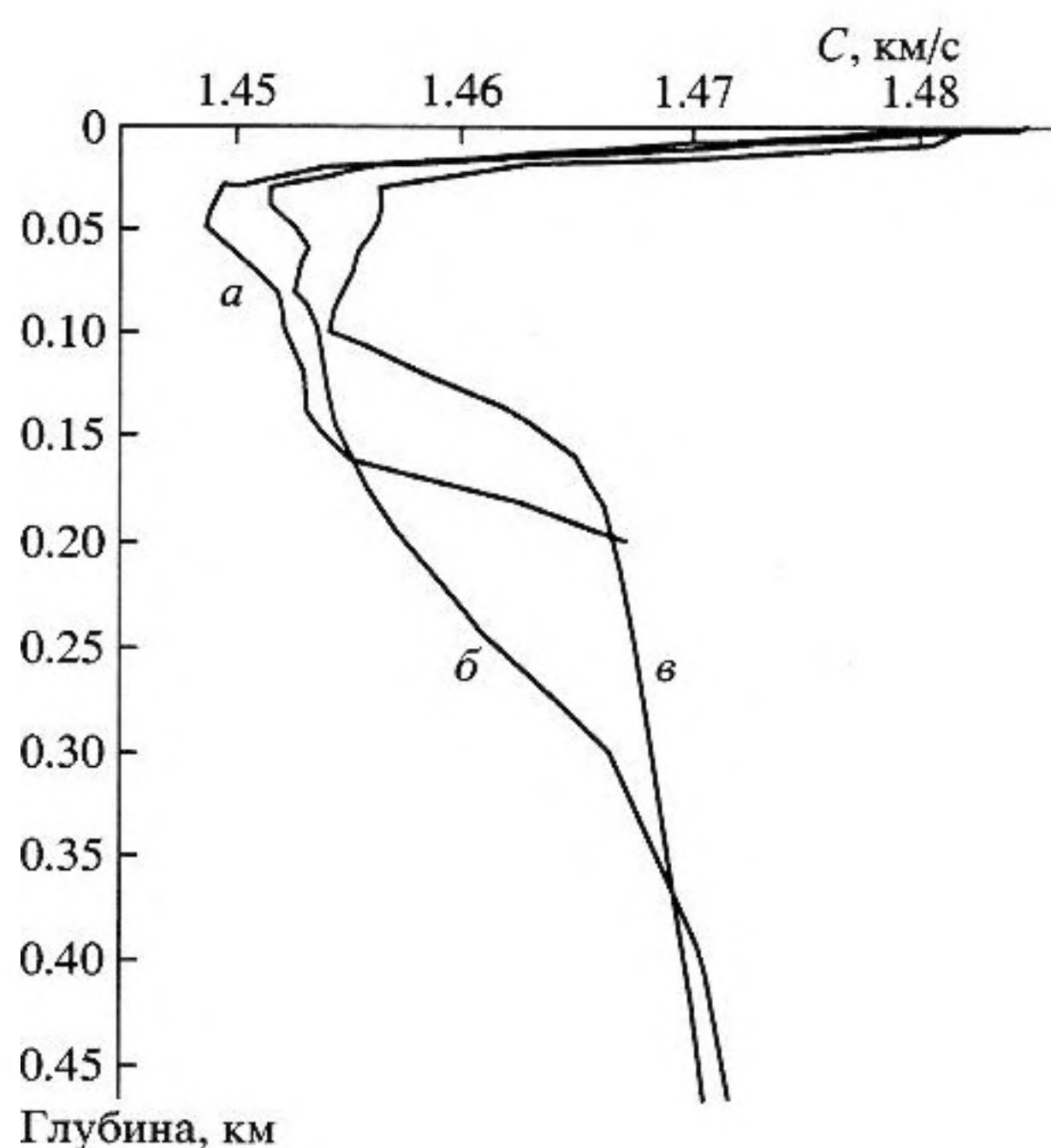


Рис. 1. Профили изменения скорости звука с глубиной, характерные для различных участков исследуемых трасс: *a* — для участка трасс, подверженного влиянию стоковых вод, *б* — для участка трасс, подверженного влиянию холодного Камчатского течения, *в* — для наиболее удаленного от берега участка трасс.

На рис. 1 представлены профили изменения скорости звука с глубиной $c(z)$, характерные: для прибрежной акватории, подверженной влиянию стоковых вод (*a*), для акватории, подверженной влиянию Камчатского течения (*б*), и для открытой глубоководной части Тихого океана, расположенной на расстоянии 300–400 км от берега (*в*).

На основе анализа большого экспериментального материала по гидрологическим характеристикам северо-западной части Тихого океана автор работы [2] приходит к выводу о генерации в районе Камчатского течения тепловых неоднородностей типа тонкослоистых образований. Для таких неоднородностей в районе течения и прилегающих к нему акваторий в качестве характерных в работе приводятся значения среднего квадрата флюктуаций акустического показателя преломления $\mu^2 \approx 10^{-5} - 10^{-7}$.

Методика проведения акустических опытов. Опыты проводились в летних условиях (июль) в разные годы на трех разных трассах, протяженностью около 300 км каждая. Протяженность глубоководной части трасс (с глубинами более 2000 м) составляла 230–250 км. Зоны сечения трассами Камчатского течения отстояли друг от друга на 130–150 км.

Опыты проводились двумя судами. Приемное судно лежало в дрейфе в 350–400 км от берега.

Излучающее судно со скоростью 10–14 узлов двигалось от берега к точке приема (по трассе перпендикулярной изобатам 150–200 м), сбрасывая и подрывая малые заряды ВВ — детонаторы гидростатического действия. Глубина подрыва зарядов в разных опытах несколько различалась (200 и 250 м на первой и второй трассах, 150 м — на третьей трассе). Всего в каждом из трех опытов на глубоководном участке трасс было подорвано от 25 до 40 зарядов. Интервал между соседними подрывами составлял 15–30 минут, что соответствовало интервалу 6,5–10 км по дистанции. Расстояние между судами на момент сброса каждого заряда определялось по времени распространения акустического сигнала и уточнялось по результатам обсервации, выполняемой периодически на обоих судах. Прием взрывных сигналов производился на ненаправленные приемные системы, расположенные на глубинах 80, 100 или 150 м, различающихся от опыта к опыту.

Перед проведением каждого опыта или после его окончания в 6–7 точках по трассе прибором “Исток-3” выполнялись измерения профиля изменения с глубиной температуры и электропроводности (пересчитываемой в соленость) морской воды. Зондирование производилось до глубины 500–1000 м. Значения температуры, солености, гидростатического давления пересчитывались в значения скорости звука по формуле Вильсона [3].

Во время проведения опытов скорость ветра не превышала 6–7 м/с, волнение поверхности моря составляло 1–3 балла.

Временная структура звукового поля. Взрывной сигнал, принятый в полосе частот от 10–20 Гц до 1–2 кГц с дистанции 10–20 км и более в условиях однолучевого распространения, представляет собой два кратковременных (длительностью < 1 мс) импульса, равных по величине, одного и того же знака (ударная волна и первая пульсация пузыря). Интервал между ними соответствует периоду первой пульсации пузыря — T_0 (в наших опытах значение T_0 изменялось от 12 мс при глубине подрыва 250 м до 20 мс при глубине подрыва 150 м). В условиях многолучевого приема каждому лучу во временной структуре взрывного сигнала соответствует своя пара таких импульсов.

Представленная на рис. 2 картина изменений с расстоянием временной структуры взрывных сигналов, зарегистрированная в одном из опытов, напоминает классическую “ $t-R$ ”-диаграмму, предложенную ранее Ивингом и Ворцелем для детального описания структуры звукового поля в ПЗК [4]. Представленные на рисунке взрывные сигналы нормированы к максимальному значению амплитуды каждого из них и выровнены по моменту их окончания. Классические “четверки” элементарных (однолучевых) сигналов распола-

гаются в виде отдельных “ветвей”, различающихся количеством полных циклов, описываемых в пространстве лучами, вдоль которых распространяются средние в “четверках” сигналы. Первой к приемнику приходит “четверка” хорошо разделяющихся во времени сигналов, распространяющихся вдоль лучей, максимально отклоняющихся от оси ПЗК. В Прикамчатском регионе хорошо разделяющиеся сигналы в “четверках” можно наблюдать лишь на расстояниях до 200 км от источника. На расстояниях более 200 км, “четверки” трансформируются в довольно компактные группы практически не разделяющихся сигналов. Одновременно во взрывных сигналах, принятых на расстоянии до 200 км, наблюдается не более двух–трех “четверок”. По виду элементарных (однолучевых) сигналов в первой из приходящих к приемнику “четверок” (см. врезку на рис. 2) их можно отнести к сигналам, испытавшим отражение от поверхности (кроме первого из “четверки”, принятой на расстоянии до 60 км от источника). Для первой ветви “четверок” на расстоянии от источника более 35–40 км сдвиг по фазе между соседними сигналами, кратный 180° (вместо 90° при касании каустики), очевиден. Этот вывод подтверждается и результатами расчета структуры звукового поля, выполненного в лучевом приближении. Согласно расчету, “четверки” первой ветви во временной структуре взрывных сигналов до 35–40 км не касаются поверхности и лишь на расстоянии более 35–40 км испытывают отражения от нее. Основная энергонесущая часть взрывного сигнала формируется чисто “водными” сигналами, практически не разделяющимися во времени.

По результатам измерений, выполненных на первой трассе, в работе [1] обращалось внимание на тот факт, что, несмотря на некоторую удаленность от оси ПЗК горизонтов излучения и приема, в группе не разделяющихся сигналов отмечается ее оконечная часть, составляющая около 50% ее длительности, которая не может быть объяснена в рамках лучевых представлений. При этом согласование реальной и расчетной временной структуры взрывного сигнала проводилось по местоположению отдельных “четверок” и начала группы сигналов, не разделяющихся во времени. При таком согласовании реально наблюдаемое окончание этой группы сигналов соответствует скорости распространения звука вдоль оси ПЗК (см. рис. 3).

Расчет групповой скорости и степени возбуждения первых десяти мод на частоте 200 Гц, выполненный по волновой программе Н.Е. Мальцева [5], позволил частично объяснить этот экспериментальный факт (расчет выполнялся для горизонтально-слоистой среды – для одного из реальных профилей $c(z)$). Первые шесть мод имели расчетную групповую скорость, практически

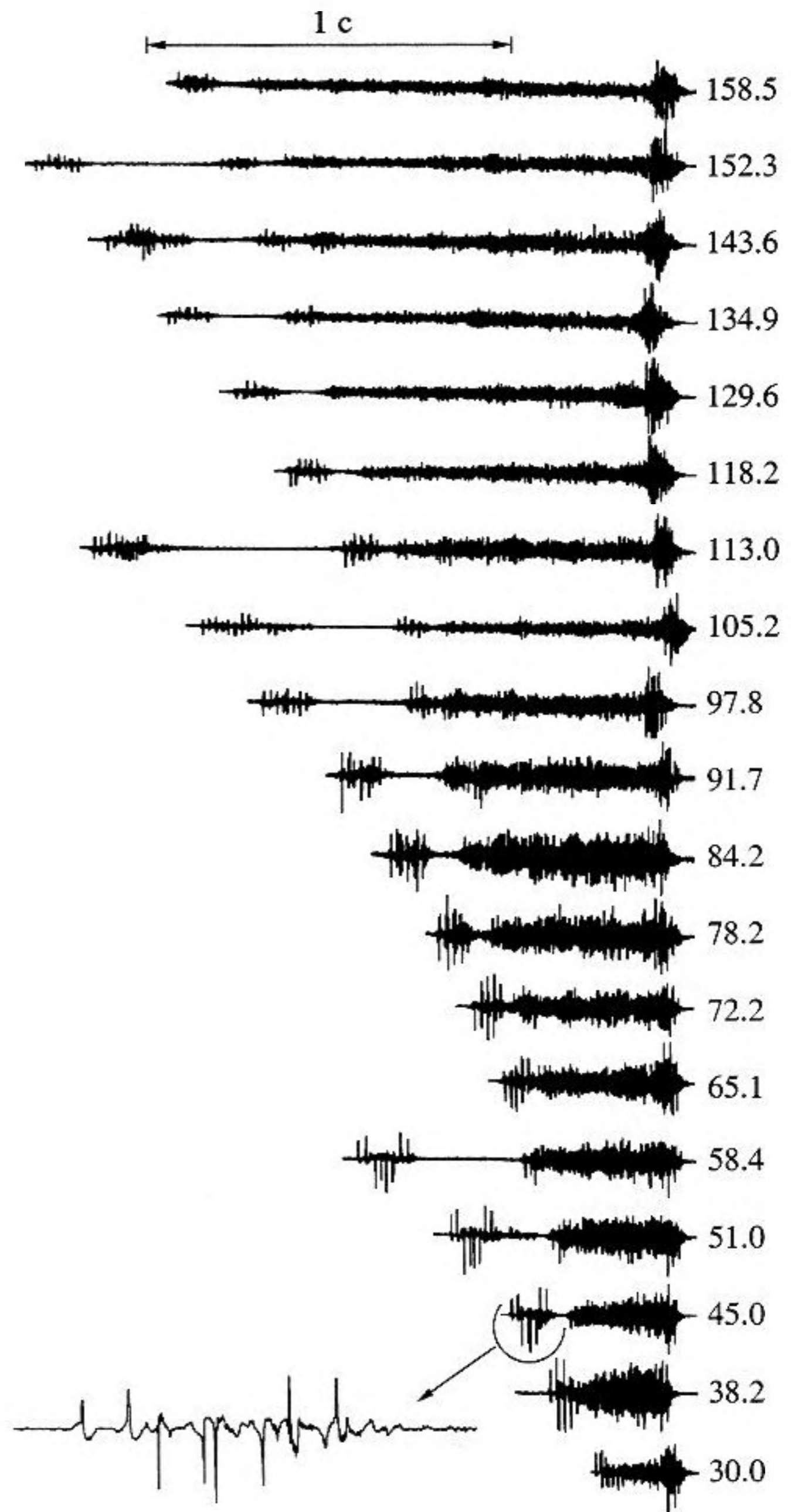


Рис. 2. Временная структура взрывного сигнала, зарегистрированная на разных расстояниях от источника на третьей трассе. Глубина источника 150 м, глубина приема 80 м. Справа от сигналов указана дистанция от точки приема до источника в км.

не отличающуюся от значения скорости звука на оси ПЗК, четыре из них имели достаточно высокий коэффициент возбуждения. Более глубокая проработка этого вопроса была проведена авторами работы [6]. Для одного из профилей $c(z)$, зарегистрированных на второй трассе, по волновой программе К.В. Авилова [7] ими были проведены расчеты временной структуры взрывного сигнала (диапазон частот 20–200 Гц). Получено удовлетворительное согласие со структурой реального

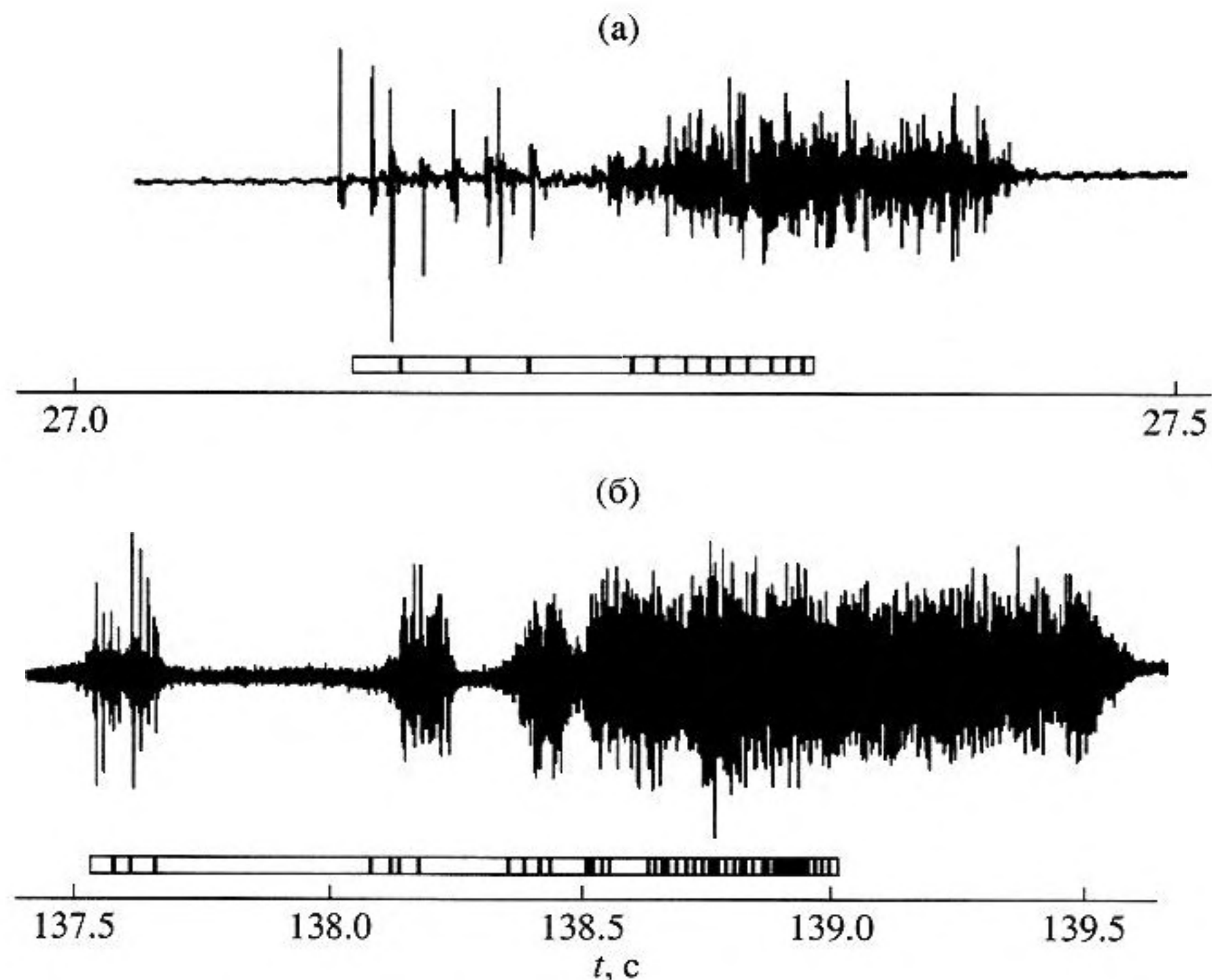


Рис. 3. Временная структура взрывных сигналов, принятых на расстоянии от источника 40 км (а) и 203 км (б). Глубина источника 200 м, глубина приема 100 м. Сопоставление экспериментальной записи и результатов расчета (полоса под экспериментальной записью с вертикальными штрихами, соответствующими временам распространения сигнала по отдельным лучам). Расчет выполнен по программе А.В. Вагина.

взрывного сигнала, принятого во втором опыте на расстоянии 105 км от источника. Засветка удаленных от оси ПЗК горизонтов происходит, как показывают авторы работы, за счет экспоненциальных хвостов в распределении амплитуды мод по глубине.

Вместе с тем, для третьей трассы расчеты структуры звукового поля в лучевом приближении показали, что горизонтальная составляющая скорости распространения сигнала вдоль некоторых лучей, секущих ось ПЗК под углами, заметно отличающимися от 0° , практически совпадает со значением скорости звука на оси ПЗК. Для этого опыта удалось достичь удовлетворительного согласия с экспериментом результатов расчета временной структуры взрывного сигнала, выполненного в лучевом приближении.

На рис. 2 представлена временная структура взрывных сигналов, принятых на третьей трассе. Обращают на себя внимание довольно резкие изменения в структуре сигнала при пересечении юго-восточной границы холодного Камчатского течения – резко возросла амплитуда оконечной его части. Это произошло на расстоянии 90–95 км от точки приема. Представленная на рис. 4 картина поля скорости звука, зафиксированного в этом же опыте, свидетельствует о расположении на этом расстоянии ближе к точке приема границы холодного течения, о довольно резких измене-

ниях в положении оси ПЗК, произошедших на этом участке трассы. Аналогичные изменения в оконечной части сигнала при увеличении дистанции с 50 до 150 км (но более плавные) получены в расчетах, выполненных в лучевом приближении по программе А.В. Вагина [8] (с учетом меняющихся по трассе гидрологических условий).

Для удобства сопоставительного анализа временной структуры звукового поля, формируемой в различных регионах, в работе [9] было предложено использовать усеченную “ $t/N-R/N$ ”-диаграмму, представляющую собой всего лишь одну кривую, отражающую “ $t-R$ ”-соотношения для сигналов, распространяющихся вдоль лучей, описавших в пространстве N полных циклов. Такая диаграмма полностью определяет времена распространения отдельных “четверок”, их положение во временной структуре многолучевого сигнала практически на любом расстоянии от источника. Путем несложных пересчетов усеченная “ $t/N-R/N$ ”-диаграмма может быть построена по всему объему экспериментальных данных, полученных в каждом из проведенных опытов.

Результаты такого пересчета, выполненного по материалам, полученным на третьей трассе, представлены на рис. 5. Пересчет проводился для значений $N = 1, 2, 3$. Помимо экспериментальных данных на рисунке нанесена аппроксимирующая их кривая. Несмотря на заметную пространствен-

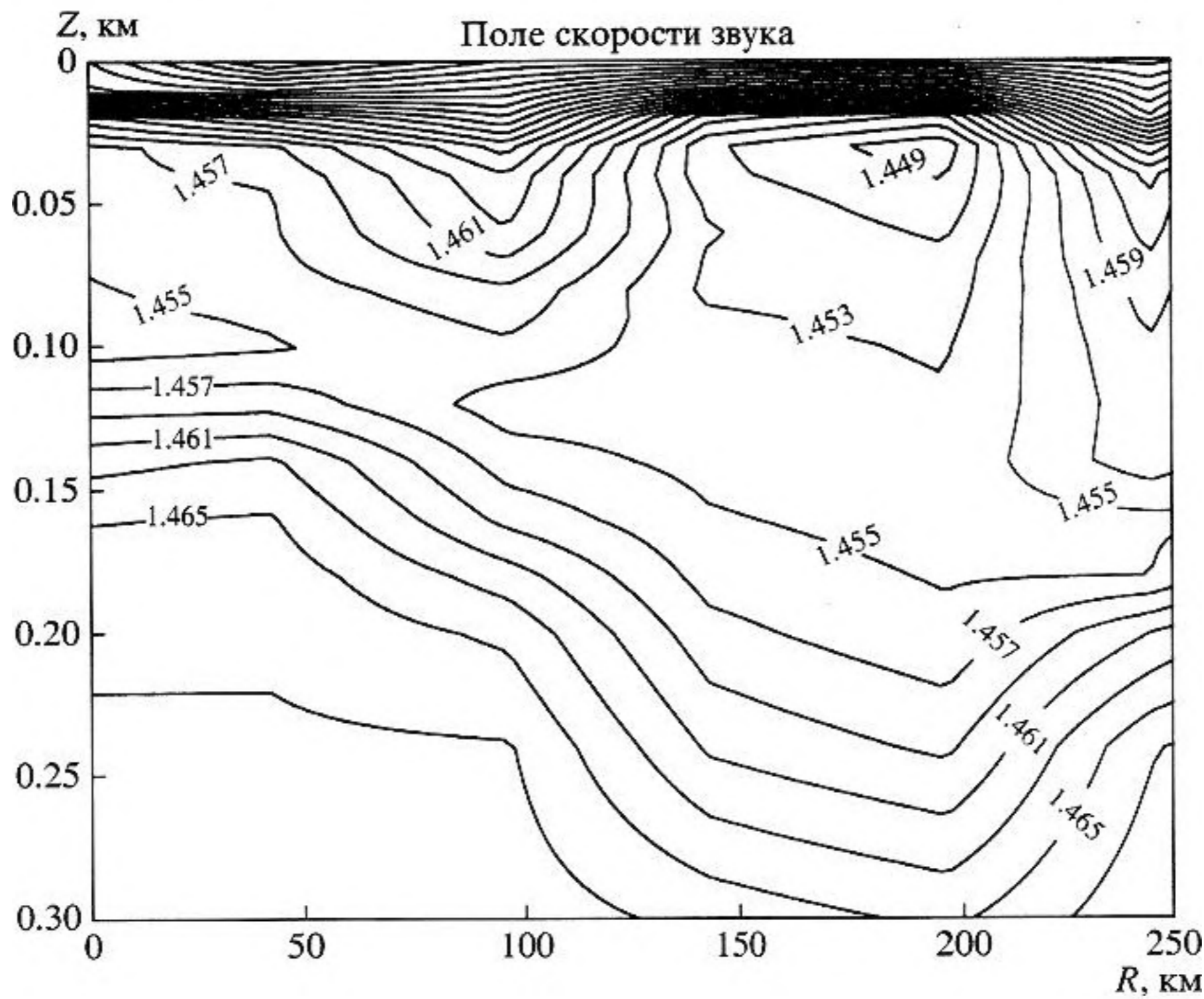


Рис. 4. Поле скорости звука, построенное по материалам гидрологического обследования третьей трассы, проведенного в обеспечение акустического опыта.

ную изменчивость гидрологических условий на трассе распространения, результаты пересчета, выполненного для разных N (на участке трассы до 160 км) хорошо согласуются между собой. Разброс экспериментальных данных незначителен. Достаточно высокая упорядоченность отдельных групп лучей при дальнем распространении в сложных гидрологических условиях отмечалась и другими исследователями (см., например, [10]).

Аналогичный пересчет был выполнен и для первых двух трасс. Для них на рис. 5 “ $t/N-R/N$ ”-диаграммы представлены лишь в виде кривых, аппроксимирующих экспериментальные данные. Различия между “ $t/N-R/N$ ”-диаграммами, построенными для разных трасс, более существенны. Причинами такого различия могут быть как пространственные и временные изменения гидрологической обстановки на трассах (трассы разнесены в пространстве, опыты на них проводились в разные годы), так и различная удаленность от оси ПЗК горизонтов расположения корреспондирующих точек при проведении акустических опытов на разных трассах.

Изменение длительности оконечной не разделяющейся во времени части взрывного сигнала (формируемой чисто “водными” сигналами), ее затягивание происходило пропорционально дистанции с коэффициентом пропорциональности 0.005 с/км – для первой трассы, 0.008 с/км – для второй трассы и 0.007 с/км для третьей трассы.

Спады звукового поля и частотная зависимость затухания звука. При использовании взрывных источников звука в качестве характеристики звукового поля, эквивалентной энергии сигнала в полосе частот Δf , принимается значение

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

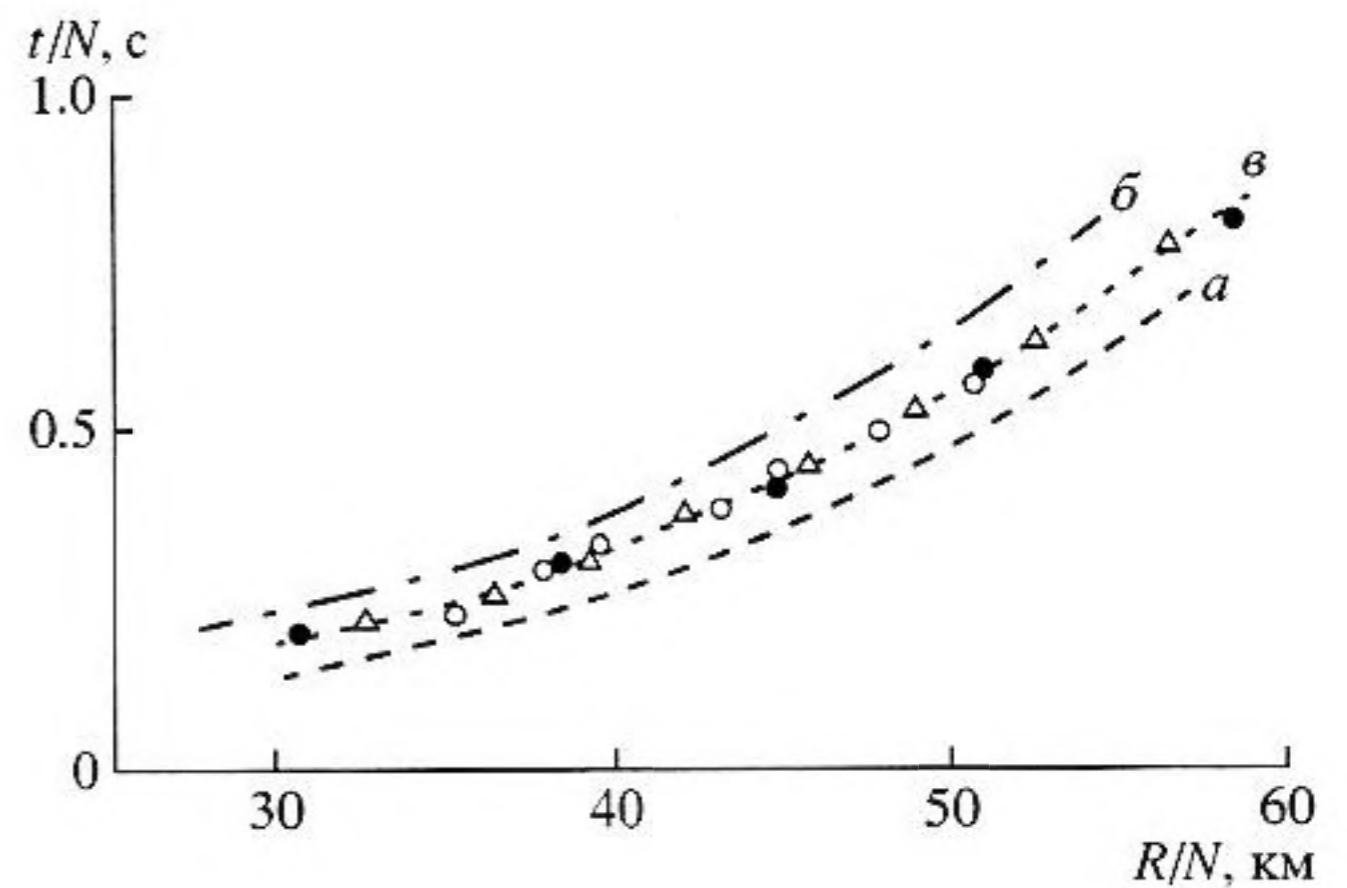


Рис. 5. “ $t/N-R/N$ ”-диаграмма, построенная по экспериментальным данным для первой (а), второй (б) и третьей (в) трасс. ●, ×, ○ – экспериментальные значения t/N , определенные для $N = 1, 2$ и 3 , соответственно, для третьей трассы.

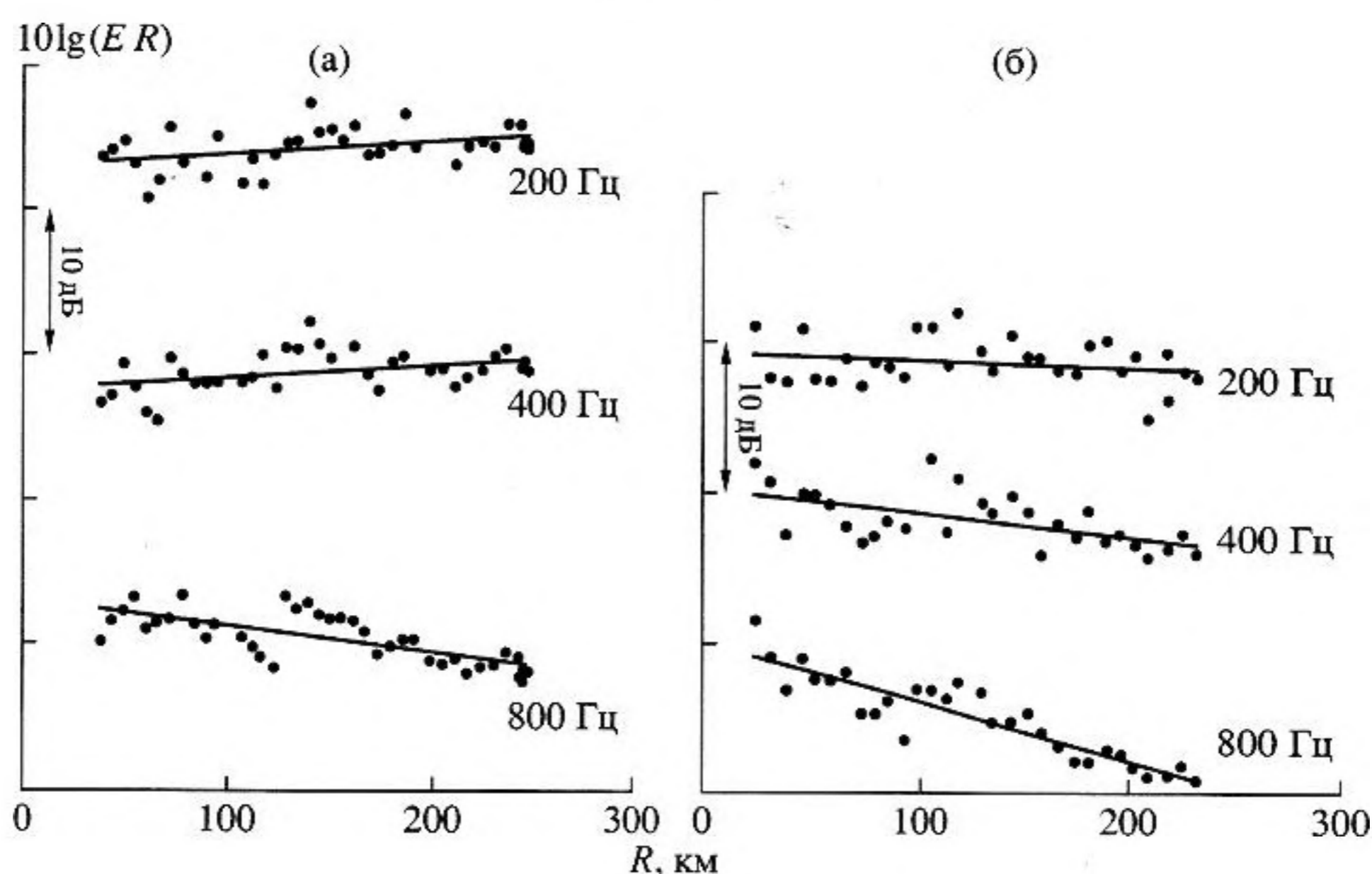


Рис. 6. Экспериментальные законы спада звукового поля для первой (а) и третьей (б) трасс на частотах 200, 400 и 800 Гц.

где T – длительность взрывного сигнала, $p_f(t)$ – давление во взрывном сигнале, приведенное к полосе частот Δf . При обработке сигнала на ЭВМ эквивалентное значение может быть получено при работе с энергетическим спектром сигнала.

В результате обработки сигналов, принятых на каждой из трех трасс, были получены экспериментальные законы спада уровня звукового поля для различных частот, которые и использовались в качестве исходного материала

Таблица 1. Экспериментальные значения β_f , определенные для обследованных трасс

Частота, Гц	Трасса N1 β_f , дБ/км	Трасса N2 β_f , дБ/км	Трасса N3 β_f , дБ/км
100	-0.014	-0.004	-0.0055 (-0.006)
125	-0.004	-0.003	-0.0055 (-0.006)
160	-0.021	-0.002	0.000 (-0.004)
200	-0.0095	-0.001	0.0045 (0.005)
250	-0.002	-0.001	0.0043 (0.002)
315	-0.005	0.000	0.0083 (0.008)
400	-0.009	0.0105	0.0165 (0.0155)
500	0.0035	0.011	0.020 (0.018)
630	0.009	0.017	0.029 (0.028)
800	0.018	0.029	0.0395 (0.0395)
1000	0.027	0.036	0.044 (0.043)
1250	0.037	0.047	0.0575 (0.0575)
1600	0.052	0.057	0.069 (0.0685)
2000	0.069	0.078	0.083 (0.083)

для оценки частотной зависимости коэффициента затухания.

На рис. 6 для иллюстрации представлен спад звукового поля, скорректированный на цилиндрический закон геометрического расхождения, для частот 200, 400 и 800 Гц для (первой и третьей) обследованных трасс. Как для первой, так и для третьей трассы наблюдается небольшой скачок уровня звукового поля (на 3–4 дБ) в районе расположения ближней к точке приема границы течения (на первой трассе на расстоянии от точки приема 120–150 км, для третьей трассы – на расстоянии 90–110 км).

Для диапазона частот 100–2000 Гц по отклонению экспериментального закона спада звукового поля от цилиндрического закона геометрического расхождения были оценены значения коэффициента затухания звука. Строго говоря, цилиндрический закон геометрического расхождения справедлив лишь для условий канального распространения звука в горизонтально-слоистой среде. В нашем случае коэффициент затухания, определенный таким образом, является всего лишь количественной характеристикой крутизны спада уровня звукового поля с дистанцией, ее отличия от цилиндрического закона. Для исключения путаницы в терминологии условно назовем его значения “формально определенными значениями коэффициента затухания” (β_f). Значения β_f оцененные по экспериментальным материалам для обследованных трасс приведены в табл. 1.

Экспериментальные законы спада звукового поля с дистанцией, особенно на низких час-

тотах, где поглощение и рассеяние звука на неоднородностях морской среды малы, существенным образом зависят от характера изменений по трассе ПЗК (его формы, глубины расположения его оси). При этом, как отмечалось ранее [11], отклонения от цилиндрического закона могут наблюдаться как в сторону увеличения крутизны спада, так и в сторону ее уменьшения, приводящего к отрицательным значениям β_f .

В наших опытах, как следует из таблицы, уменьшение крутизны спада относительно цилиндрического закона наблюдалось на всех трех трассах. На первой трассе оно проявилось на частотах 400 Гц и ниже, на второй – на 250 Гц и ниже, на третьей – на 125 Гц и ниже. Приведенные в таблице значения β_f на частотах выше 400 Гц увеличиваются от первой к третьей трассе. При этом различие их значений (в среднем) между второй и первой трассой составило 0.0085 дБ/км, между третьей и первой трассой 0.018 дБ/км, оставаясь практически независимым от частоты.

Для третьей трассы дополнительно (в скобках) приведены значения β_f , определенные по укороченным взрывным сигналам. Искусственно вырезались четверки разделяющихся элементарных (однолучевых) сигналов, отраженных от морской поверхности (волнение моря достигало 2–3 баллов). Так мы постарались исключить влияние взволнованной поверхности на результаты определения β_f , которое в нашем случае оказалось (как следует из сравнения приведенных значений) пренебрежимо малым.

В условиях меняющихся по трассе гидрологических характеристик среды, когда невозможно определить с достаточной степенью точности закон геометрического расхождения, для оценки коэффициента затухания следует воспользоваться так называемым “дифференциальным” методом, примененным впервые в середине 50-х годов [12]. Этот метод оценки затухания построен на двух предположениях: первое – закон геометрического расхождения неизвестен, но одинаков для всего исследуемого диапазона частот, второе – частотная зависимость коэффициента затухания выражается степенной функцией с нулевой 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. Аппроксимируя частотную зависимость “дифференциального” коэффициента затухания степенной зависимостью, и отбрасывая свободный член, получаем для определения полного коэффициента затухания аналитическое выражение вида:

$$\beta = af^n. \quad (1)$$

Таблица 2. Экспериментально определенные “дифференциальные” значения коэффициента затухания (“реперная” частота $f_0 = 800$ Гц)

Частота, Гц	Трасса N1 Затухание, дБ/км	Трасса N2 Затухание, дБ/км	Трасса N3 Затухание, дБ/км
400	-0.027	-0.018	-0.023
500	-0.015	-0.018	-0.020
630	-0.009	-0.011	-0.011
800	0	0	0
1000	0.009	0.008	0.005
1250	0.019	0.018	0.018
1600	0.034	0.029	0.030
2000	0.051	0.049	0.044

Относительно небольшая протяженность трасс не позволила с достаточной надежностью произвести оценки значений коэффициента затухания на нижних частотах (100–315 Гц). Оценки производились для диапазона частот 400–2000 Гц. “Дифференциальные” значения коэффициента затухания были определены для каждой из обследованных трасс. Эти значения приведены в табл. 2. При этом в качестве “реперной” была принята частота 800 Гц.

При переходе от “дифференциальных” значений к общепринятым значениям коэффициента затухания принимались во внимание экспериментальные материалы, полученные на всех трех трассах. Для описания частотной зависимости затухания выражением (1) при размерности частоты – кГц, затухания – дБ/км были получены следующие значения параметров: $a = 0.063$, $n = 0.7$.

В табл. 3 для сравнения помимо экспериментальных значений приведены значения коэффициента затухания, рассчитанные в соответствии с полученным выражением (1), а так же в соответствии с соотношением, приведенным в работе [13] для описания частотной зависимости коэффициента поглощения (с учетом релаксационных процессов, связанных с серноокислым магнием и бором, содержащимися в морской воде).

По результатам проводимого перед каждым опытом гидрологического обследования трассы распространения взрывных сигналов характерными для глубин 20–400 м были определены температура 4°C, соленость 34‰. Концентрация водородных ионов при обследовании трассы не определялась. Однако, на основании архивных материалов по этому региону для этих глубин можно ориентироваться на значение рН 7.9–8.1. Как следует из табл. 3, на частотах 400–1000 Гц значения коэффициента затухания звука в Прикамчатском регионе Тихого океана в 2–3 раза превышает поглощение.

Таблица 3. Сравнение полученных экспериментально для прибрежного Прикамчатского региона Тихого океана данных по затуханию со значениями коэффициента поглощения, рассчитанными для условий проведения эксперимента

Частота, Гц	Затухание, дБ/км расчет по ф-ле (1)	Экспериментальные значения затухания, дБ/км			Поглощение, дБ/км расчет по ф-лам работы [13]
		Трасса 1	Трасса 2	Трасса 3	
400	0.033	0.028	0.037	0.032	0.007–0.009
500	0.039	0.041	0.038	0.036	0.011–0.014
630	0.045	0.047	0.044	0.045	0.016–0.020
800	0.054	0.055	0.055	0.055	0.023–0.029
1000	0.063	0.065	0.063	0.060	0.031–0.039
1250	0.073	0.074	0.074	0.073	0.042–0.052
1600	0.087	0.089	0.084	0.085	0.058–0.070
2000	0.102	0.107	0.104	0.099	0.078–0.091

Этот регион, так же как и Норвежское море [14], глубоководная южная часть Охотского моря [15], Гренландское море [16] (по крайней мере, его восточная часть), следует отнести к районам Мирового океана, отличающимся повышенным затуханием низкочастотного звука. Наиболее вероятной причиной такого затухания в этом регионе (так же, как и в регионах перечисленных выше), по-видимому, следует считать рассеяние звука на тонкослоистых тепловых неоднородностях, генератором которых является, как установлено в работе [2], холодное Камчатское течение.

В заключение сформулируем основные результаты проведенного анализа материалов трех опытов по дальнему распространению взрывных сигналов, выполненных на разных трассах в Прикамчатском регионе Тихого океана:

– Для трех обследованных 230–250-километровых трасс характерна заметная пространственная изменчивость гидрологических условий, приводящая к заметным на частотах ниже 200–400 Гц отклонениям закона геометрического расхождения от цилиндрического.

– Во временной структуре взрывных сигналов, зарегистрированных в опытах, присутствуют хорошо разделяющиеся классические “четверки”, образуемые элементарными (однолучевыми) сигналами, отраженными от морской поверхности; построенные для обследованных трасс по экспериментальным материалам усеченные “ $t/N-R/N$ ”-диаграммы несколько различаются, хотя разброс определенных для одной и той же трассы значений t/N пренебрежимо мал. Чисто “водные” элементарные (однолучевые) сигналы практически не разделяются во времени, приходят компактной группой, длительность которой растет пропорционально расстоянию от источника; коэффициент пропорциональности для разных трасс изменяется от 0.005 до 0.008 с/км.

– На одной из трасс в районе пересечения ближней к точке приема границы Камчатского

течения были зарегистрированы резкие изменения в структуре этой группы – амплитуда оконечной ее части (~10% ее длительности) резко возросла и стала превышать в 3–4 раза амплитуду ее основной части.

– Значения коэффициента затухания звука в регионе, определенные дифференциальным методом по спадам уровня звукового поля на частотах 400–1000 Гц превышают расчетные значения коэффициента поглощения в 2–3 раза; этот регион Мирового океана следует отнести к районам с повышенным затуханием, к которым ранее были отнесены Норвежское, Охотское, Гренландское моря.

Автор выражает свою искреннюю признательность сотрудникам института Микрюкову А.В. и Немченко В.В. за неоценимую помощь, оказанную ими при проведении отдельных опытов, и обсуждение полученных материалов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 01-02-16636, 01-05-64711).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вадов Р.А. Влияние континентального склона и шельфа на формирование структуры и энергетики сигнала, распространяющегося к берегу // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 5. С. 606–615.
2. Ростов И.Д. Тонкая термохалинная стратификация различных районов Тихого океана / Дисс. на соискание ученой степени канд. географических наук. Владивосток: ТОИ ДВНЦ, 1985, 117 с.
3. Wilson W.D. Extrapolation of the equation for the speed of sound in sea water // J. Acoust. Soc. Amer. 1962. V. 34. № 6. P. 866.
4. Ивинг М., Ворцель Д. Сверхдальнее распространение звука. / Распространение звука в океане. М.: Изд-во иностр. лит., 1951, 216 с.
5. Вагин А.В., Мальцев Н.Е. Расчеты низкочастотных звуковых полей в слоистом океане // Вопросы судостроения, сер. Акустика 1977. Вып. 9. С. 61–81.

6. Белов А.И., Микрюков А.В., Попов О.Е. Влияние волновых эффектов на структуру сигнала вне пределов подводного звукового канала // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 2. С. 157–163.
7. Авилов К.В. Псевдодифференциальные параболические уравнения распространения звука в океане, плавно неоднородном по горизонтали // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 1. С. 5–12.
8. Вагин А.В. Расчет лучевых картин, суммарного звукового поля в точке, его угловой, временной, фазовой и энергетической структуры в двумерно-неоднородной среде / Отчет. М.: Акустический институт, 1974. 63 с.
9. Вадов Р.А. О временах затягивания сигнала в различных районах океана // Акуст. журн. 1994, Т. 40. № 6. С. 930–934.
10. Michael A. Wolfson, Steven Tomsovic. On the stability of long-range sound propagation through a structured ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 2001. V. 109. № 6. P. 2693–2703.
11. Вадов Р.А. Затухание низкочастотного звука в океане / В кн. Проблемы акустики океана. Изд-во "Наука", 1984, С. 31–42.
12. Sheehy M.J., Halley R. Measurement of attenuation of low-frequency underwater sound // J. Acoust. Soc. Amer. 1957. V. 29. № 4. P. 464–469.
13. Вадов Р.А. Поглощение и затухание низкочастотного звука в морской среде // Акуст. журн., 2000, Т. 46. № 5. С. 624–631.
14. Вадов Р.А. Некоторые результаты исследований дальнего распространения звука, проведенных в Норвежском море // Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 1. С. 28–38.
15. Вадов Р.А. Канальное распространение звука в Охотском море // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 2. С. 174–182.
16. Вадов Р.А. Некоторые результаты исследований дальнего распространения звука в Гренландском море // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 1. С. 47–59.

Some Features of the Sound Field Formation in the Kamchatka Region of the Pacific Ocean

R. A. Vadov

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

Abstract—The data of three experiments on long-range propagation of explosion-generated sound signals in the coastal Kamchatka region of the Pacific Ocean are analyzed. The experimental conditions correspond to summertime (July) with a fully-developed underwater sound channel. The propagation paths are oriented towards the coast and cross the cold Kamchatka current. A considerable spatial variability of the hydrological environment on the 250-km deep-water parts of the paths leads to pronounced deviations from the cylindrical law of the geometric spread of the sound field level. The time structure of the sound field formed in the conditions of channel-type sound propagation in this region is analyzed. For the classical quartets of signals reflected from the surface, reduced $t/N-R/N$ diagrams are obtained. The diagrams are found to be slightly different for three different paths. The "purely water" signals arriving at the receiver are nearly unresolved in time. One of the experiments reveals pronounced changes in the structure of the explosion-generated signals at distances of 100–120 km from the reception point: the terminal parts of the signals show a sharp increase in level. For the same part of the path, a pronounced level increase is also observed in the range dependence of the sound field. The hydrological data obtained for the water medium in this experiment show that these distances correspond to the boundary of the cold current. From the decay of the sound field level, the attenuation coefficient is determined by the differential method for the frequencies within 400–2000 Hz. The experimental data on the attenuation of low-frequency sound in the Kamchatka region of the Pacific Ocean noticeably exceed the calculated values of the sound absorption coefficient.