АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2003, том 49, № 6, с. 832–842

УДК 551.463

СТРУКТУРА ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ ТОНАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ В КУРИЛО-КАМЧАТСКОМ РАЙОНЕ ТИХОГО ОКЕАНА ПРИ НАЛИЧИИ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО КАНАЛА И ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ

© 2003 г. **Н. В. Студеничник**

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника 4

E-mail: vadov @akin.ru

Поступила в редакцию 29.11.2002 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований закономерностей распространения тональных сигналов высокостабилизированных источников звука в береговом клине северо-западной части Тихого океана у восточного побережья полуострова Камчатки. Эксперименты осуществлены в зимних условиях при наличии мощного приповерхностного канала и развитого поверхностного волнения на частотах 100, 230 и 400 Гц на трассе протяженностью 1000 км. Излучение сигналов производилось при непрерывной буксировке излучающих устройств на глубине 50 ± 5 м со скоростью 4.5–5 узлов в течение 115 часов. Изучены закономерности спада уровней звукового поля с расстоянием в зависимости от состояния поверхности океана и частоты. Результаты исследований и особенности спада уровней звукового поля по трассе сопоставлены с расчетными данными при различной степени поверхностного волнения.

В развитие широкомасштабных экспериментальных исследований энергетических и пространственно-временных характеристик звуковых полей в северо-западной части Тихого океана, проводимых нами и другими исследователями в основном в летне-осенних условиях при наличии подводного звукового канала (например, комплексные исследования по программе "Восток-80" [1]), в период с 31 марта по 5 апреля 1984 года Акустическим институтом им. Н.Н. Андреева совместно с Институтом прикладной физики АН СССР, Гидрографической службой ВМФ СССР и другими организациями в рамках экспедиции "Восток-84-1" осуществлены исследования структуры звуковых полей в зимних условиях при наличии мощного приповерхностного канала и развитого поверхностного волнения. Эти исследования подготавливались в течение трех лет (вслед за выполнением работ по программе "Восток–80") и проведены по той же трассе, что и эксперименты 1980 г. [1]. Трасса протяженностью 1000 км ориентировалась по обратному ортодромическому пеленгу 120° от шельфовой зоны восточного побережья полуострова Камчатка. Приповерхностный канал простирался от поверхности до дна при глубинах от 150–200 до 5000 м. Поверхностное волнение по трассе изменялось в пределах от 1–2 до 5–6 баллов.

Постановкой этих экспериментов предусматривалось исследовать тонкую структуру звуковых полей и закономерности спада силы звука с расстоянием в условиях приповерхностного канала и поверхностного волнения при дальнем распространении. Особое внимание было обращено на изучение пространственно–временных и частотно–фазовых характеристик и их устойчивости в условиях развитого поверхностного волнения. В настоящей статье представлены результаты исследований только энергетических характеристик.

В экспериментах использовались гидрографические исследовательские суда (ГИСу) Гидрографии ВМФ "Пегас" (излучающее судно) и "Галс" (судно, обеспечивающее измерения гидрометеорологических характеристик акватории) и приемная направленная система, установленная в районе берегового шельфа. Исследования, как и в прежних наших опытах, проводились по методике непрерывной буксировки излучающих устройств с независимым излучением на рабочих частотах, управляемым единым задающим манипулятором. В опытах использовались те же, что и в опытах 1980 г. [1], высокостабилизированные тональные источники звука с частотами 100, 230 и 400 Гц. Все три излучателя совместно с контрольным гидрофоном и глубиномером располагались на одной общей раме, опускаемой на кабель–тросе с кормовой части ГИСу "Пегас". Глубина излучающих систем при номинальной скорости буксировки 5 узлов (2.5 м/с) была в пределах 50 ± 5 м. Формирование режимов излучения производилось с использованием измерительного комплек-

са, состоящего из задающих кварцевых генераторов, блока формирования и управления, усилителей мощности, излучателей и системы контроля параметров излучаемого сигнала. Блок формирования и управления совместно с программным устройством позволял формировать различные режимы работы излучателей. Для работы был выбран режим излучения, близкий к непрерывному: 500 с – излучение и 20 с – пауза. Один раз в 3 часа включался дополнительный режим – попеременная работа излучателей в течение 100 с с паузой 20 с. Уровень излучения непрерывно контролировался и поддерживался в заданных (и учитываемых) пределах в течение всего опыта. Буксировка излучающих систем осуществлялась в течение пяти суток, и непрерывное излучение составило 115 часов. Излучение производилось, начиная с точки, находящейся за приемной системой, лежащей на продолжении генерального направления трассы (120°), и удаленной от нее на 5 км. В процессе движения излучающее судно прошло над приемной системой, установленной в шельфовой зоне на глубине 200 м на расстоянии 3 км от кромки материкового склона, и удалялось от нее по выбранному курсу в направлении открытого океана. Максимальный интервал изменения скорости буксирующего судна по трассе лежал в пределах 1 узла. Неравномерность движения приводила, вследствие доплеровских смещений, к нестабильности частоты излучаемых сигналов. На расстоянии 330–350 км из-за поломки одного из излучателей, в течение 4 часов излучение не производилось ни на одной из частот.

Прием сигналов осуществлялся на отдельные гидрофоны, вертикальные линейки и выборочно с отдельных лепестков направленной приемной системы. Регистрация сигналов производилась на магнитную ленту 14-канального магнитофона типа TEAC-50C и 4-канального магнитофона фирмы "Брюль и Кьер" типа 7003. Запись выполнялась непрерывно в течение всех 115 часов: с четырех рядом лежащих в горизонтальной плоскости лепестков приемной системы, формируемых аналоговыми компенсаторами, семи линеек, равномерно расположенных по апертуре антенны, и отдельного ненаправленного приемника антенной решетки. Вертикальная линейка на используемых частотах обладала слабой направленностью в вертикальной плоскости и направленностью, близкой к кардиоиде, в горизонтальной. Кроме того, запись сигналов на всех частотах с одиночного гидрофона и остронаправленного в горизонтальной плоскости лепестка приемной системы после фильтрации в 3% полосах частот осуществлялась также на самописцах уровня типа 1621 фирмы "Брюль и Кьер", Н-100.

Рельеф дна вдоль трассы характеризовался наличием непротяженной отмели с глубинами 250–300 м, крутого материкового склона с углом до 10°, протяженного плато при глубинах 3000–3500 м на расстояниях до 150 км, глубоководной впадины Курило-Камчатского желоба с глубиной свыше 7000 м и абиссального плато с глубинами 5000–5500 м. На расстояниях 750–950 км трасса пересекала северные отроги гряды Императорских гор (гора Теньга), где глубина океана уменьшалась до 3000–3500 м. Выборочные профили скорости звука в поверхностных слоях, рельеф дна, полученный при непрерывном эхолотном промере на ГИСу "Пегас", и поле скорости звука, построенное по данным 26 гидрологических станций, выполненных на ГИСу "Галс" по трассе, представлены на рис. 1. Видно, что вдоль трассы существовал мощный приповерхностный канал с минимумом скорости звука у поверхности океана. Скорость звука при этом у поверхности изменялась от 1444 м/с, в точке приема, до 1458 м/с – на расстояниях 700–1000 км. Однако, как показано в работе [3], при высокой насыщенности приповерхностного слоя воздушными пузырьками, что обычно реализуется при сильном ветровом волнении, скорость звука у поверхности может быть значительно ниже значений, рассчитанных по измеренным величинам температуры и солености, уменьшаясь до значений 1000–1300 м/с. Скорость звука на горизонте излучения 50 м (вдоль трассы) превосходила скорость звука у поверхности на 6–15 м/с, а на горизонте приема 200 м это превосходство достигало 18 м/с. В результате этой изменчивости энергетическая емкость канала в конце трассы за счет трансформации углового спектра и преобразования части рефрагированных лучей с большими характеристическими (углы пересечения лучами оси канала) углами в донно-поверхностные отражения уменьшалась на ±6–9° по отношению к емкости канала в прибрежной зоне. Наличие по трассе подъемов дна до глубин 3000–3500 м также дополнительно сужало угловой спектр рефрагированных составляющих с характеристическими углами, лежащими в пределах ±14.7–21°, и, соответственно, уменьшало его энергетическую емкость дополнительно на ±4–5°. Обеднение углового спектра рефрагированных лучей за счет трансформации их в донно-поверхностные отражения, естественно, снижало уровень суммарного поля и соответственно усиливало спад силы звука с расстоянием. Полная энергетическая емкость канала при глубине 5000 м и скорости звука у поверхности 1444 м/с составляет ±21°, а при глубине 3000 м и скорости звука на оси канала, равной 1458 м/с, уменьшается до ±14.7°. Полный диапазон углов скольжения лучей, отражающихся от поверхности по трассе, находится в пределах ±5–21°.

Геолого-акустические свойства дна вдоль трассы характеризовались большим разнообразием состава осадков и их параметров. В ближней зоне они характеризуются песчаными и другими

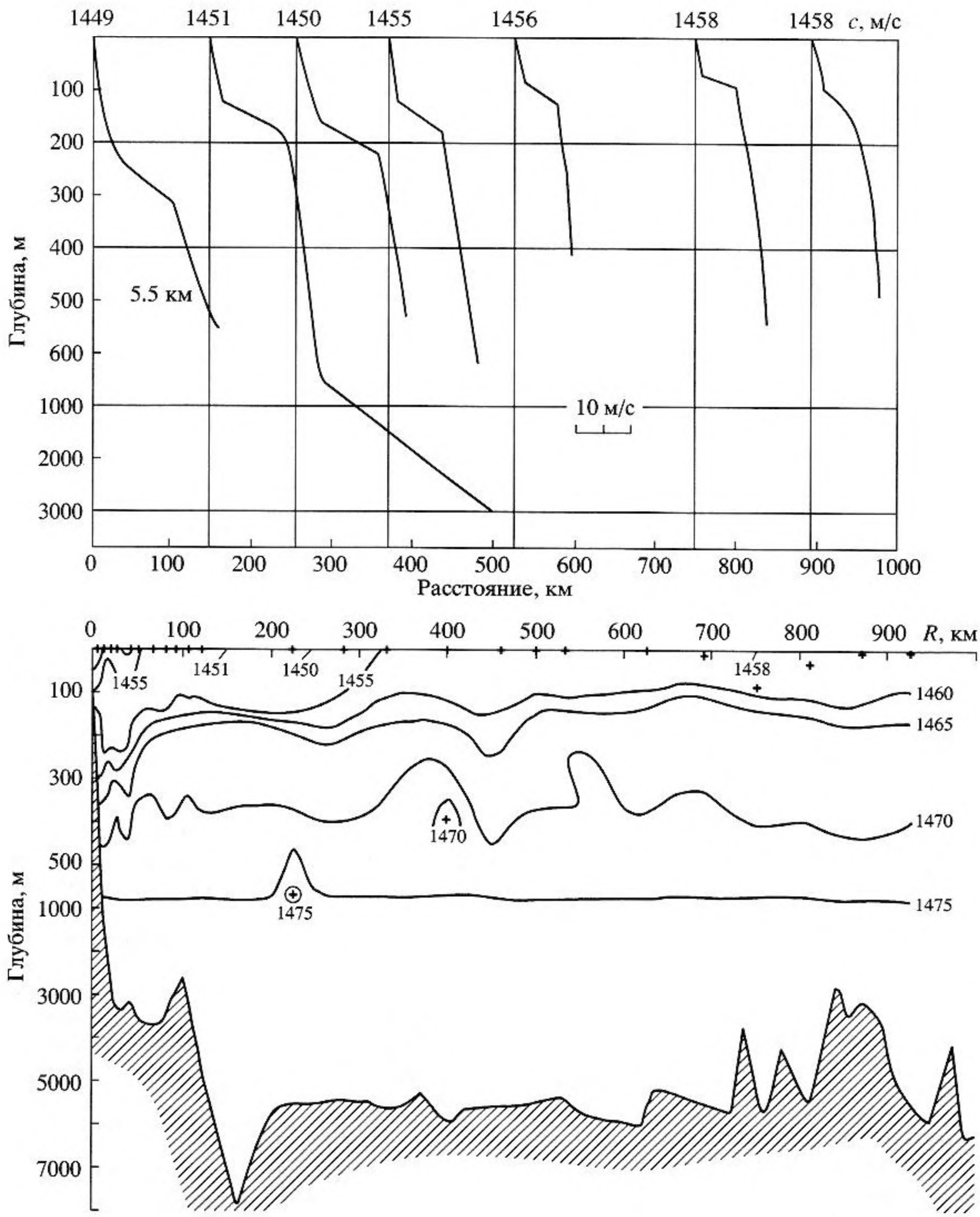

Рис. 1. Рельеф дна и поле скорости звука по трассе. Крестики – минимум скорости звука, ось канала; сплошные линии – изоскорости по трассе.

грубообломочными отложениями со скоростями звука, на 50–120 м/с превосходящими скорость звука в воде, и плотностями от 1.5 до 2.2 г/см^3. Материковый склон и глубоководную впадину выстилают фракции алевритовых осадков со скоростями, близкими к скорости звука у дна, или меньше их на 10–15 м/с, при плотности 1.30–1.50 г/см^3. Преобладающая часть исследуемого региона и всей трассы представлена преимущественно глинистыми илами, которые обладают скоростями звука на 10–30 м/с меньше скорости звука в воде и плотностями 1.25–1.45 г/см^3.

Метеорологические условия в течение опыта характеризовались значительной нестабильностью как в регионе в целом, так и по отдельным участкам вдоль трассы: времена относительного затишья сменялись резкими усилениями ветра, что было обусловлено периодическим прохождением циклонов с переменами скорости и направления ветра в различных точках трассы. Наблюдения за погодой велись обоими судами, находящимися в разное время опыта на удалении от 50 до 300 км друг от друга. В районе преобладали ветры преимущественно северо-западного и северного направлений со скоростями, изменяющимися на различных участках трассы в пределах от 2–5 до 14–20 м/с. Направление ветра в основном было попутным и отклонялось от генерального направления трассы не более чем на ±60°. В прибрежной зоне, у приемной системы, скорость ветра не превосходила 3–7 м/с, а волнение поверхности – 1–3 баллов в течение всего опыта. При излучении сигналов на участках трассы 0–250 и 550–700 км скорость ветра изменялась в пределах 3–7, на участке 300–550 км увеличивалась до 9–14, а на расстояниях 700–1000 км достигала 15–20 м/с. Поверхностное волнение при этом возрастало до 5–7 баллов.

Экспериментальные материалы, полученные в виде записей на лентах самописцев, использовались в основном для изучения пространственно-энергетических характеристик звукового поля и закономерностей спада силы звука с расстоянием. Основной интерес при этом состоял в том, чтобы выявить частотную зависимость исследуемых характеристик поля от степени поверхностного волнения. Эти материалы использовались также и для косвенной (качественной) оценки частотно–фазовой устойчивости составляющих поля. На рис. 2 приведены выборочные 1700–секундные фрагменты записи сигналов на частотах 230 и 400 Гц на расстояниях от 160 до 1000 км. Получены они с центрального лепестка антенны. На близких расстояниях (до 200–300 км) на записях четко проявляется строгая интерференционная структура поля, обусловленная многолучевостью, частотой и скоростью движения источников звука, как это наблюдалось летом в экспериментах 1980 г. в условиях подводного звукового канала [1, 2]. Пространственный период интерференции на частоте 230 Гц составляет около 600 м, а на частоте 400 Гц лежит в пределах 250–400 м. Глубина модуляции в ближнем поле (до 100–200 км) достигает 30 дБ и более, на предельных расстояниях – падает до нуля. Вместе с тем в условиях приповерхностного канала и ветрового волнения, независимо от частоты и наличия на малых расстояниях регулярной интерференционной структуры поля, на всем протяжении трассы наблюдается сильная интерференционная изрезанность огибающей (на частоте 400 Гц она четко видна, начиная с расстояний 100–160 км) с разницей в максимумах и минимумах до 10–20 дБ и частотой 0.1–0.2 Гц. В итерференционных максимумах при соотношении сигнал/помеха 30–40 дБ и более глубина высокочастотной модуляции (0.1–0.2 Гц) составляет 1–2 дБ, в минимумах достигает 20–30 дБ. Эта изрезанность обусловлена, в основном, поверхностным волнением. Она могла вызываться также крупномасшабной неоднородностью волновода, рельефом дна в прибрежной зоне и килевой качкой буксируемого судна. Однако влияние последних факторов в этом эксперименте не было определяющим. На всех более далеких расстояниях, особенно при усиливающемся ветре, регулярные низкочастотные максимумы и минимумы постепенно сглаживаются или исчезают полностью, как это реализуется на частоте 400 Гц, начиная с расстояний 300–400 км. Структура поля приобретает свойства шумоподобного хаотического процесса без упорядоченного фазового сложения составляющих. Преобладающее влияние здесь, естественно, имеет поверхностное волнение и в соответствии с этим мощная предреверберация [4]. На частоте 230 Гц когерентность отдельных составляющих сохраняется до расстояний 600–700 км.

При усилении ветра до 12–14 м/с в структуре поля, наряду со значительной потерей составляющими регулярных фазовых характеристик, наблюдается и существенное уменьшение суммарных уровней. Особенно резкое падение уровня наблюдалось на частоте 400 Гц. Уже на расстоянии 380 км соотношение сигнал/помеха составило всего 10–15 дБ. В дальнейшем, при непрерывном излучении сигналов в течение 30 часов и увеличении расстояния от 380 до 650 км, уровень сигнала на той же частоте 400 Гц не только не уменьшился (или остался постоянным, как это реализовалось на частоте 230 Гц), но и возрос на 5–10 дБ. Соотношение сигнал/помеха увеличилось до 20–22 дБ. Этот рост вызван снижением скорости ветра (в точках излучения) от 12–14 до 5–7 м/с, и, соответственно, уменьшением потерь при отражениях. На расстояниях 700–1000 км скорость ветра вновь возросла до 14–20 м/с. Уровень сигналов стал резко убывать. На частоте 400 Гц он достиг уровня помех на расстоянии 760 км. На частоте 230 Гц соотношение сигнал/помеха 20–25 дБ сохранялось вплоть до 900–930 км и только на расстоянии около 1000 км оно резко уменьшилось и составило 5–7 дБ (последний фрагмент записи на рис. 2). На этой дистанции, из-за усиливающегося шторма и опасности потери излучающих устройств, эксперимент был прекращен.

В заключение проведенного анализа следует отметить, что в течение опыта при регистрации сигналов постоянно ощущалось присутствие в регионе посторонних судов, проявляющееся в значительном повышении уровня помех. Например,

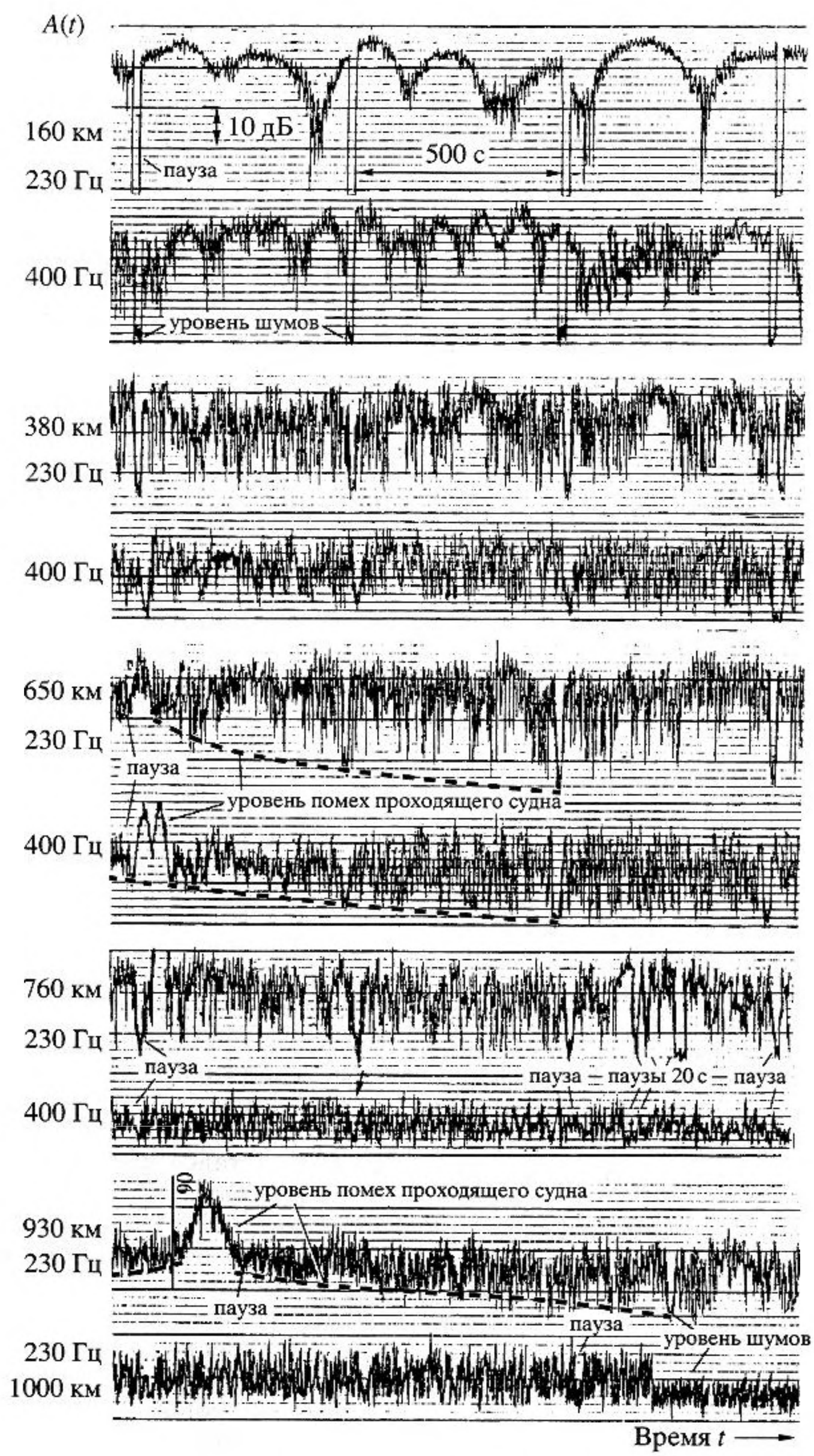

Рис. 2. Фрагменты записей тональных сигналов на частотах 230 и 400 Гц на расстояниях от 160 до 1000 км.

при прохождении судов на траверсе антенны и пересечении ими сформированных в горизонтальной плоскости остронаправленных лепестков, уровни помех значительно возрастали и на 5–20 дБ превышали уровень принимаемых сигналов. Это видно, например, на обеих частотах на расстоянии 650 км и на частоте 230 Гц на расстоянии 930 км.

Относительные спады уровней полного поля с расстоянием на частотах 100, 230 и 400 Гц представлены на рис. 3. На расстояниях от 1 до 300–500 км значения уровней поля определены по данным одиночного гидрофона, а на больших – с центрального лепестка приемной антенны. При смене используемых приемников уровни сигналов на каждой из частот взаимно согласованы. По оси

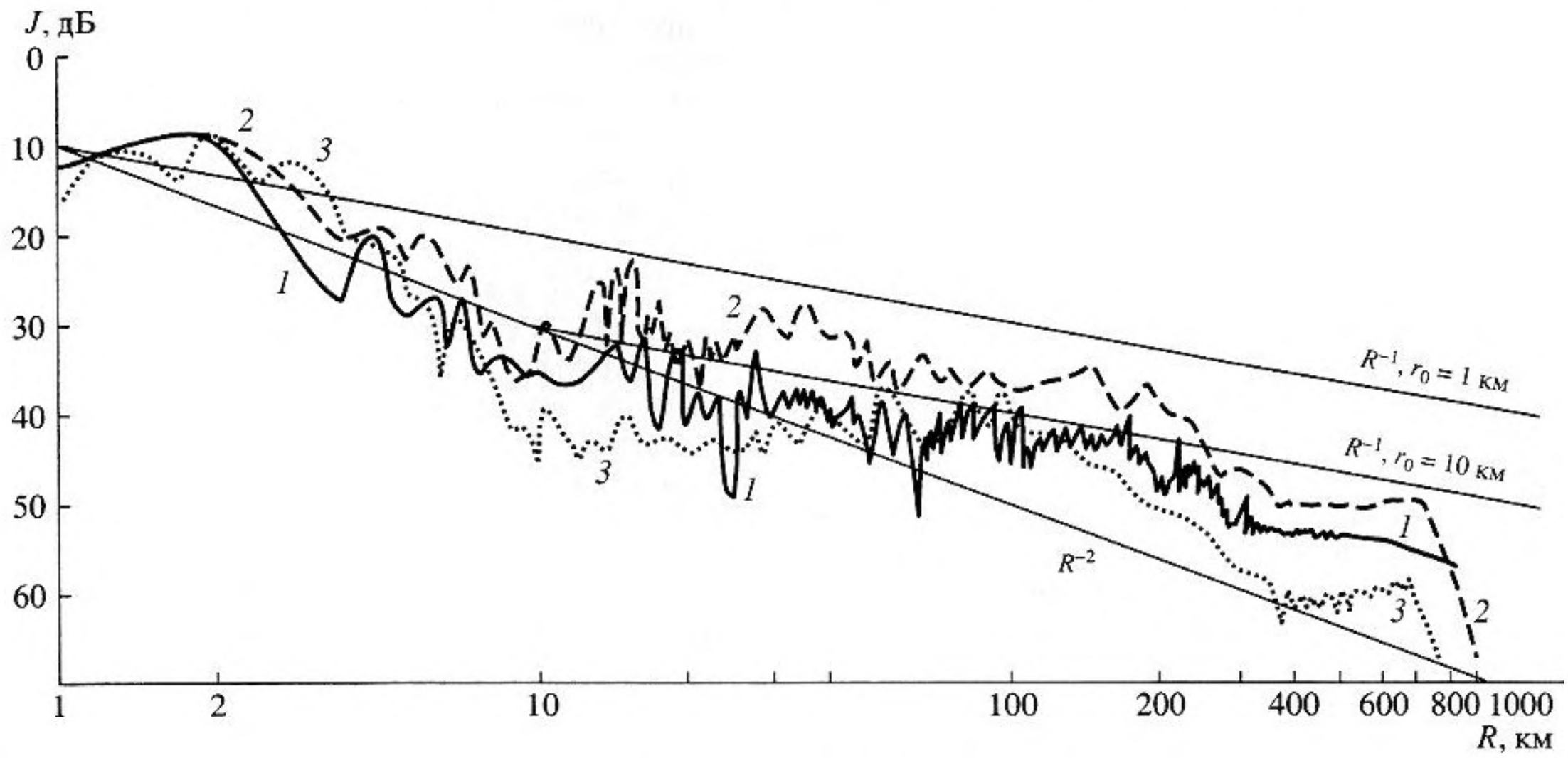

Рис. 3. Спад уровня звукового поля по трассе на частотах 100 (*1*), 230 (*2*) и 400 Гц (*3*). Расстояние дано в логарифмическом масштабе.

абсцисс отложено расстояние в километрах в логарифмическом масштабе, по оси ординат – сила звука в децибелах. При приеме на отдельном гидрофоне дальность обнаружения сигналов на частоте 100 Гц составляла 500 км, а на частотах 230 и 400 Гц не превышала 350 км. При совмещении всех трех кривых на одном графике уровни сигналов на разных частотах нормированы по ближнему полю. На рисунке видно, что интенсивность сигналов по трассе и характер спада силы звука с расстоянием существенно зависят от частоты. Разница в уровнях достигает 10–20 дБ. Генеральный спад силы звука с расстоянием на частотах 100 и 230 Гц на участке трассы от 10 до 200 км следует по закону, близкому к цилиндрическому, с переходными расстояниями, равными соответственно 12 и 5 км. На частоте 400 Гц после резкого падения уровня сигнала в ближней зоне (от 2 до 10 км), достигающего 35 дБ (кривая *3*), в дальнейшем при увеличении дистанции в 10 раз (от 10 до 100 км) уровень сигнала не только не падает с расстоянием, а, наоборот, – возрастает, повышаясь на 5–6 дБ. В интервале дистанций от 100–200 до 300–400 км происходит довольно монотонное уменьшение интенсивности всех частот, что обусловлено постепенным усилением ветра по трассе и в точках излучения до 15–16 м/с. При непрерывном излучении на участке трассы протяженностью в 400 км (от 300 до 700 км) средние уровни сигналов всех частот в течение 45 часов почти не изменялись. Более того, на частотах 400 и 230 Гц заметен даже некоторый подъем. Наблюдаемая стабильность уровня обусловлена уменьшением скорости ветра от 14–16 до 4–5 м/с и поверхностного волнения до 2–3 баллов. В конце трассы (700–1000 км) надвигающийся шторм и усиление ветра до 14–20 м/с привели к новому интенсивному уменьшению уровня сигналов. Особенно резко оно выражено на частотах 230 и 400 ГЦ. На частоте 400 Гц амплитуда сигнала упала до уровня помех уже на расстояниях 700–750 км, а на частоте 230 Гц, при несколько более медленном спаде, соотношение сигнал/помех составляло еще до 5–7 дБ на расстоянии 1000 км. Здесь уместным будет (для сравнения) отметить, что на этой трассе в летних условиях, при наличии подводного звукового канала и слабого поверхностного волнения, на тех же частотах, при тех же уровнях излучения и с использованием той же приемной системы, соотношение сигнал/помеха на расстоянии 1000 км составляло 30–40 дБ, а на расстоянии 2100 км, даже после падения уровня сигнала до 10–15 дБ на фронтальной зоне, обусловленной теплыми водами течения Куросио и заглублением оси канала со 150 до 1000 км на удалениях 2000–2100 км от береговой черты, это соотношение составляло 15–25 дБ. При этом в структуре поля четко сохранялись когерентные составляющие в диапазоне характеристических углов ±9–14° [1, 2].

Записи сигналов, полученные на магнитных лентах, дают возможность исследовать спектрально-энергетические характеристики поля и закономерности спада силы звука с расстоянием не только суммарного поля, но и отдельных его компонент. С этой целью записи сигналов (с центрального лепестка антенны) обрабатывались путем визуализации и отображения информации

на регистрирующих устройствах с помощью узкополосных фильтров. Для примера рассмотрим результаты обработки на частоте 230 Гц. Обработка сигналов произведена на ЭВМ "Плюримат" В.Я. Фаизовым. Перед вводом в ЭВМ сигналы подвергались узкополосной фильтрации с помощью двух последовательно соединенных фильтров типа 1621 и "Брюль и Кьер". Ввод информации производился в режиме ускоренного воспроизведения записи с коэффициентом ускорения 32. При вводе сигналы подвергались дискретизации, кодировались в цифровом коде и заносились в дисковую память ЭВМ. Так как спектральная функция анализируемых сигналов занимала узкую полосу, то это позволило использовать частоту выборок, значительно меньшую, чем частота выборок, определяемая по теореме Котельникова. Для получения необходимой частоты выборок пилот-сигнал частотой 500 Гц делился с помощью счетчикового делителя с коэффициентом деления 247. Параметры ввода: размер блока информации n = 2048, число уровней квантования N = 2048, частота выборок 2.02429 Гц, длительность реализации T = 1012 с (около 17 мин). Оценка текущего спектра производилась по временным интервалам T = 1012 с, на которое была разбита 113-часовая запись информации. Частотное разрешение Δf = 0.001 Гц. Оценка спектра выполнялась с использованием процедуры быстрого преобразования Фурье. Для получения усредненной оценки она подвергалась процедуре спектрального сглаживания цифровым фильтром нижних частот. Способ вычисления состоял в том, что в каждой реализации выделялась огибающая, затем производилось компрессирование и упаковка данных в один блок. Для выделения огибающей использовалось наиболее общее ее определение, связанное с преобразованием Гильберта. После выполнения соответствующих операций каждое полученное таким образом значение соответствует интервалу расстояний 700 м. Сглаживание значений производилось с помощью 10-точечного окна, что соответствовало интервалу расстояний в 7 км. Результаты обработки представлены на рис. 4. По оси абсцисс отложено расстояние в линейном масштабе, по оси ординат – сила звука в дБ. Сплошные кривые *1–3* соответствуют сферическому (кривая *1*) и цилиндрическому законам спада (кривая *2* – при переходном расстоянии r_0 = 1 км, кривая *3* – при r_0 = 10 км). На рис. 4а приведена зависимость спада уровня суммарного (когерентных и некогерентных составляющих) поля с расстоянием в аналоговом, на рис. 4б – в цифровом виде при дискретно-кусочном осреднении по 7-километровым отрезкам трассы. Вертикальный размер заштрихованной области на рис. 4б соответствует некогерентному полю. На рис. 4 отображены уровни поля когерентной компоненты в зависимости от расстояния при дискретно-кусочном осреднении по 700-метровым (точки) и 7-километровым отрезкам трассы (ломанная кривая). Усредненный закон спада на участке трассы до 300 км при любом виде обработки можно аппроксимировать цилиндрической зависимостью с переходным расстоянием r_0, лежащим в пределах 5–10 км, а на расстояниях 350–700 км – с r_0, близким 12–13 км. На расстояниях 700–1000 км реализуется экспоненциальный спад с коэффициентом затухания полного поля, лежащим в пределах 0.6–0.7 дБ/км, а когерентной составляющей – 0.8 дБ/км. Если предположить, что на момент измерений в конечной точке состояние поверхности было одинаковым по всей длине трассы, а потери при отражениях от поверхности равномерно распределены по трассе, при цилиндрической зависимости спада с r_0 = 10 км, то коэффициент потерь для полного поля составит 0.018–0.020, а когерентной составляющей – 0.024 дБ/км.

Нестабильность метеоусловий в течение эксперимента создает ситуацию, когда энергетические уровни поля и закономерности их спада с расстоянием на различных участках трассы и по всей трассе в целом могут быть самыми различными. В этих случаях при недостаточности информации о состоянии поверхности по трассе становится затруднительным получение соответствия результатов расчетов экспериментальным данным на любой из частот и на каждом из участков трассы. Однако представляется целесообразным сопоставить полученные уникальные экспериментальные результаты с расчетными данными хотя бы для простейшей модели волновода и в отдельных точках и оценить их степень адекватности. Поскольку рассматриваемый волновод представляет собой приповерхностный канал, а используемые частоты относительно высокие, то для ориетировочных расчетов в первом приближении могут быть использованы лучевые приближения. Для этих целей нами использована лучевая программа расчета звуковых полей А.В. Вагина, Н.Е. Мальцева [5], позволяющая учитывать горизонтальную изменчивость профиля скорости звука, неровный рельеф дна, потери в грунте и при отражении от неровной поверхности. Коэффициент отражения от поверхности для когерентной части сигнала использован в форме Рэлея. Спектр поверхностного волнения выбран в форме Пирсона–Московитца, согласно которому средне-квадратичная высота волн $h = 0.53 \times 10^{-2} v^2$, где h – в м, а v – скорость ветра в м/с. Расчеты выполнены на частотах 230 и 400 Гц с учетом измеренного по трассе рельефа дна, водоподобного грунта в виде бесконечного полупространства с параметрами: скорость звука – 1550 м/с, плотность – 1.6 г/см^3 при двух различных значениях потерь η = 0.1 и 0.01 и одинаковых по

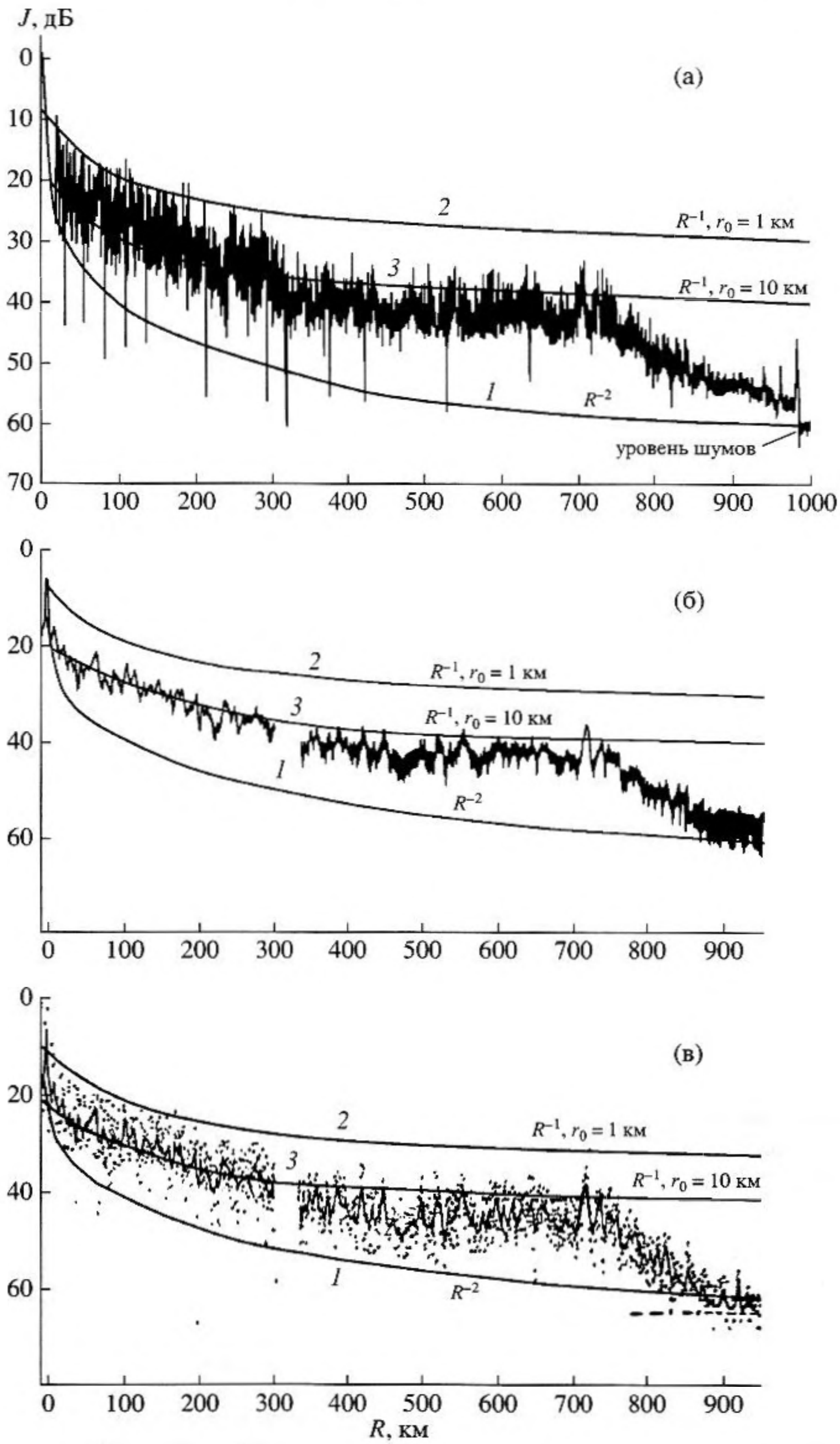

Рис. 4. Спад уровня звукового поля с расстоянием на частоте 230 Гц при воспроизведении и машинной обработке сигналов: а – полного поля в аналоговом виде, б – полного поля (когерентной и рассеянной компонент) при цифровой обработке, в – когерентной компоненты. Вертикальный размер заштрихованной области на рисунке (б) соответствует некогерентному полю.

трассе скоростях ветра при $v = 0$ и 15 м/с, что соответствовало высотам волн 0 и 3 м. Профили скорости звука по трассе в верхних слоях выбраны в соответствии с рис. 1, а на глубинах – по данным других измерений [1]. Излучатели размещены на глубине 50 м, приемники – в шельфовой зо-

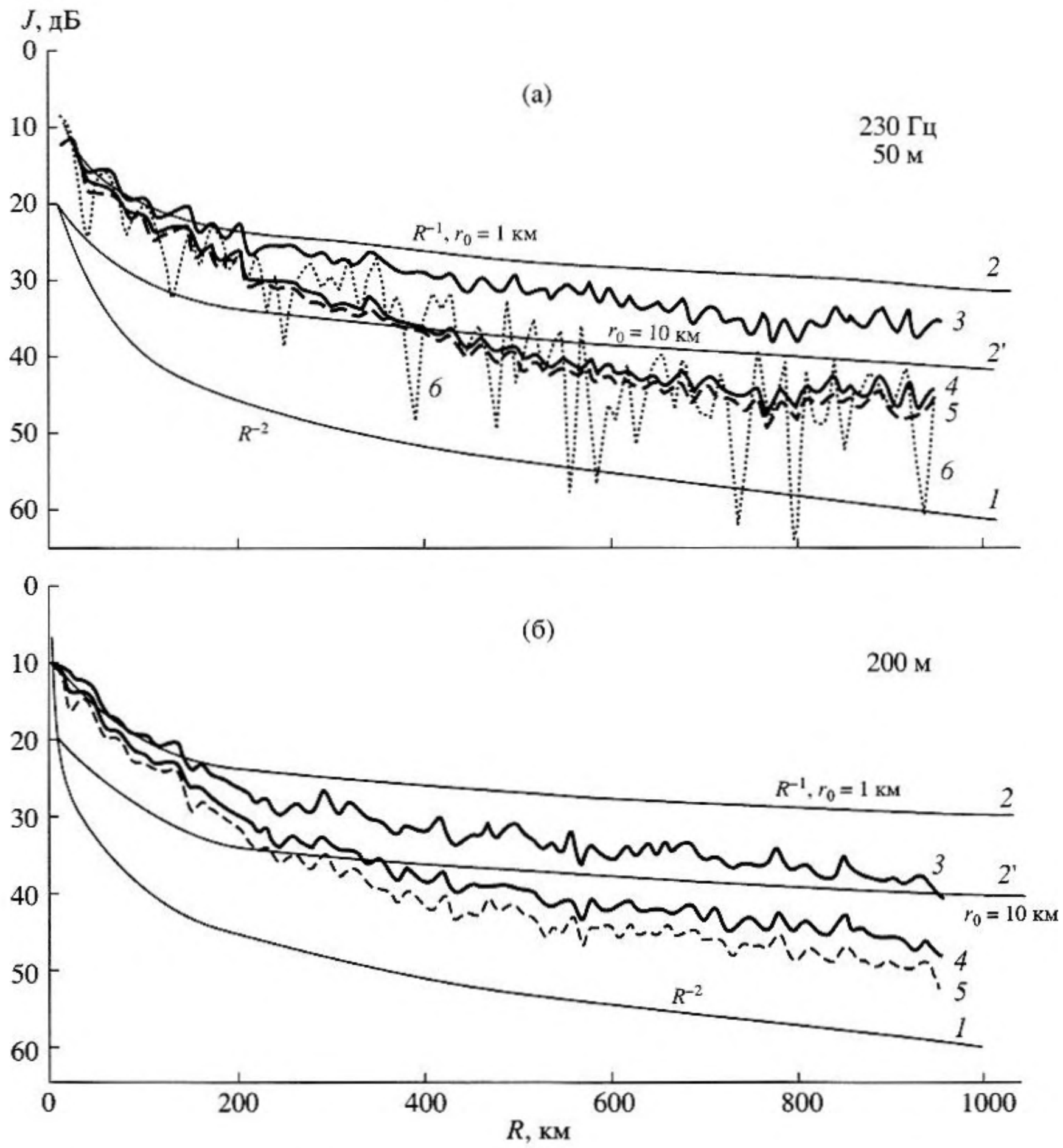

Рис. 5. Расчетные зависимости спада силы звука с расстоянием на частоте 230 Гц. а – горизонт приема 50 м, б – горизонт приема 200 м. Кривые *1*, *2* и 2^1 – сферический и цилиндрический законы спада, кривая *3* – при $h = 0$, $\eta = 0.01$, *4* – $h = 3$ м, $\eta = 0.01$, *5* – $h = 3$ м, $\eta = 0.1$, кривая *6* на (а) – $h = 3$ м, $\eta = 0.01$ при фазовом сложении составляющих.

не на глубинах 50 и 200 м на расстоянии 3 км от кромки материкового склона.

Расчетные значения уровня (когерентного) поля на частоте 230 Гц при энергетическом сложении составляющих приведены на рис. 5. Кривые *1*, *2* и 2^1 на графиках отображают сферический и цилиндрический законы спада, кривая *3* – при $h = 0$, $\eta = 0.01$, *4* – $h = 3$ м, $\eta = 0.01$, *5* – $h = 3$ м, $\eta = 0.1$, кривая *6* на рис. 5а при приеме на горизонте 50 м соответствует высоте волны $h = 3$ м, $\eta = 0.01$ при фазовом сложении составляющих. Видно, что даже при гладкой поверхности на расстоянии 1000 км потери в клине относительно цилиндрического спада с переходным расстоянием $r_0 = 1$ км только вследствие отражений от дна составляют от 5–6 дБ на горизонте 50 м и до 8–10 дБ на горизонте 200 м. Дополнительные потери, обусловленные волнением при $h = 3$ м, составляют всего 10 дБ, что не превосходит 0.01 дБ/км. Расчетные суммарные потери с учетом дна и поверхности составляют около 20 дБ, что близко к данным, полученным в эксперименте. На рис. 6 приведены результаты расчета на частоте 400 Гц при тех же входных данных и той же маркировке кривых на графиках. Потери в клине при отражениях от грунта на обеих частотах практически совпадают. Потери на поверхности значительно увеличились и составили на расстоянии 760 км 20 дБ (при суммарных 30 дБ), что так же, как и на частоте 230 Гц, близко к данным, полученным в эксперименте. Увеличение коэффициента потерь в грунте в 10 раз в данных условиях несущественно влияет на общие потери при распростра-

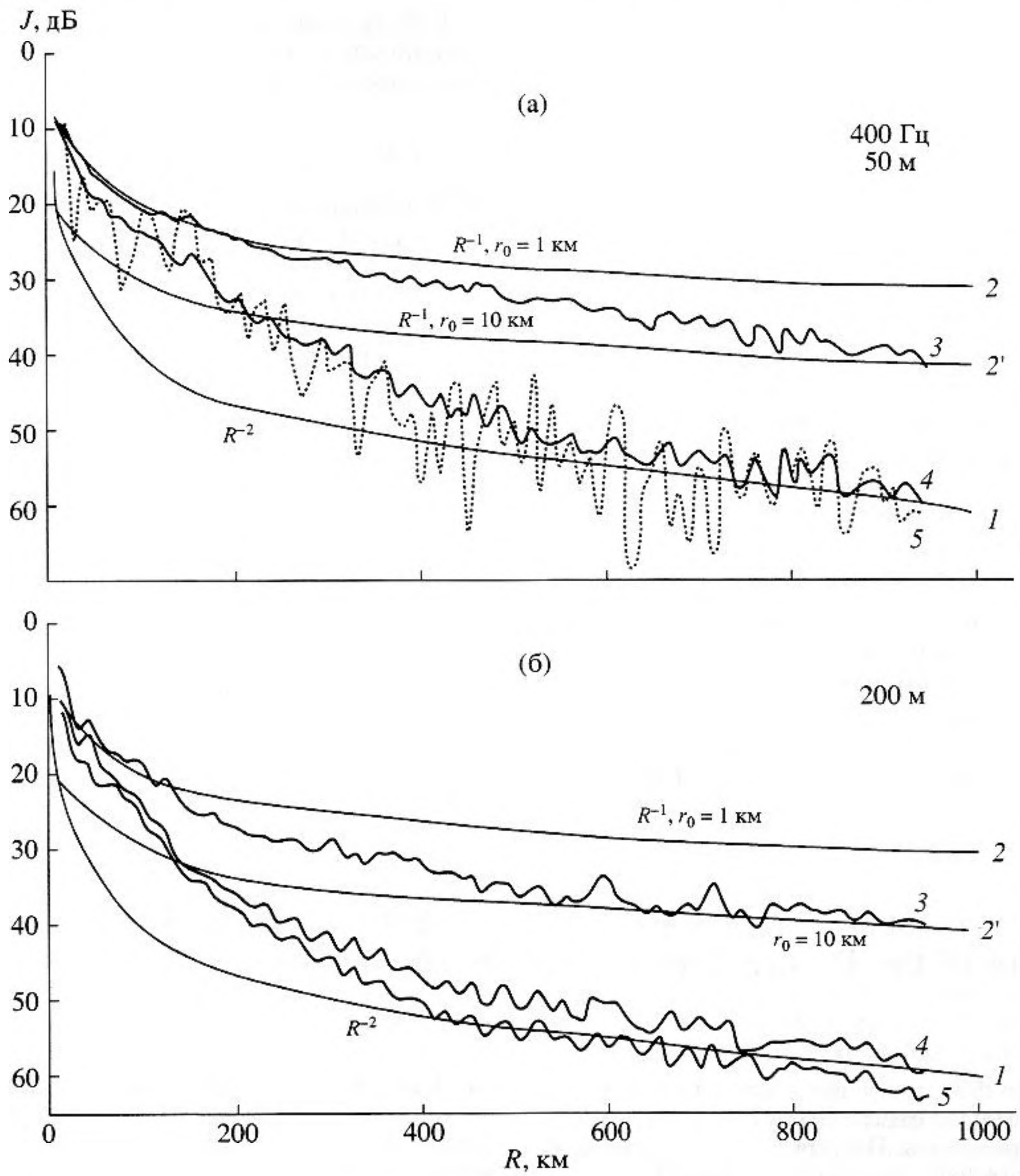

Рис. 6. Расчетные зависимости спада силы звука с расстоянием на частоте 400 Гц. а – горизонт приема 50 м, б – горизонт приема 200 м. Кривые *1*, *2* и 2^1 – сферический и цилиндрический законы спада, кривая *3* – при $h = 0$, $\eta = 0.01$, *4* – $h = 3$ м, $\eta = 0.01$, кривая *5* (на нижнем рисунке) – $h = 3$ м, $\eta = 0.1$, кривая *5* (на верхнем рисунке) – $h = 3$ м, $\eta = 0.01$ при фазовом сложении составляющих.

нении. При приеме у поверхности на горизонте 50 м разница в уровнях поля не превышает 1–2 дБ, а на горизонте 200 м лежит в пределах 3–4 дБ на всех расстояниях вплоть до 1000 км на обеих частотах. Близость экспериментально полученных и расчетных данных по суммарным потерям обеспечивается только в отдельных точках. Соотношения в уровнях звукового поля по трассе и характер его спада с расстоянием в целом в экспериментальном и расчетном вариантах существенно различны.

В результате осуществленных экспериментов:

1. Впервые исследована энергетическая и пространственно-временная структура звуковых полей тональных высокостабилизированных источников звука с частотами 100, 230 и 400 Гц на трассе протяженностью 1000 км в зимних условиях в Прикамчатском районе Тихого океана при наличии мощного приповерхностного канала и взволнованной поверхности океана.

2. Получены закономерности спада силы звука с расстоянием при дальнем распространении звука в низкочастотном диапазоне в зимних условиях при непрерывной буксировке излучателей по трассе в течение 115 часов и при переменном ветровом волнении, изменяющемся в пределах от 1–2 до 5–6 баллов.

3. Оценены закономерности спада полного поля (включая когерентные и рассеянные компоненты) и когерентных компонент на частоте 230 Гц.

4. Экспериментально полученные закономерности спада на частотах 230 и 400 Гц сопоставлены с расчетом, выполненным по лучевому алгоритму с учетом меняющегося по трассе поля скорости звука, рельефа дна для различных, но постоянных по трассе параметров грунта и поверхностного волнения.

5. Полученные результаты представляют собой исключительно большой интерес как в плане научных исследований структуры звуковых полей в реальных волноводах, так и в практическом отношении при выборе исходных данных и оценке эффективности работы стационарных гидроакустических средств в условиях берегового клина с учетом поверхностного волнения.

В заключение выражаю глубокую благодарность А.С. Шиляхину и В.Я. Фаизову за помощь в проведении экспериментов, обработке полученных материалов и выполнении расчетов на ЭВМ, Г.А. Студеничник за помощь при обработке материалов и выполнении графических работ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 01-02-16636).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Студеничник Н.В.* Комплексные исследования звуковых полей в Курило-Камчатском районе северо-западной части Тихого океана //Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 6. С. 850–860.
2. *Студеничник Н.В.* Пространственно-временная и частотно-фазовая устойчивость звукового поля в подводном звуковом канале // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 4. С. 542–550.
3. *Guy V. Norton, Jorge C. Novarini.* Enhancement of the total acoustic field due to the coupling effects from a rough sea surface and a bubble layer.// J. Acoust. Soc. Amer. 1998. V. 103. № 4. April. P. 1836–1844.
4. *Студеничник Н.В.* Исследования времен предреверберации в глубоководном и приповерхностном звуковых каналах // Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 1. С. 123–130.
5. *Вагин А.В., Мальцев Н.Е.* Расчеты низкочастотных звуковых полей в слоистом океане// Вопросы судостроения, сер. Акустика. 1977. Вып. 9. С. 61–81.

Sound Field Structure Produced by Tone Sources in the Kurile–Kamchatka Region of the Pacific Ocean with a Surface Channel and Wind Waves

N. V. Studenichnik

Results of the experimental studies of sound signal propagation in the continental wedge of the north-western Pacific, near the eastern coast of the Kamchatka Peninsula, are presented. The signals are produced by highly stable tone sources. The experiments are carried out in winter, in the presence of a strong surface sound channel and intense wind waves, at frequencies of 100, 230, and 400 Hz, on a 1000-km-long path. The signal transmission is performed by continuously towing the sound sources at a depth of 50 ± 5 m with a speed of 4.5-5 knots, for 115 hours. The decay of the sound field level with distance is studied as a function of the sea state and the frequency. The results of the experiments, including the sound field decay along the path, are compared with the calculations for different sea states.