АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2000, том 46, № 5, с. 671–679

УДК 543.231.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕННÓЙ СТАБИЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА

© 2000 г. А. В. Кулаков, Р. Ю. Попов

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

Поступила в редакцию 24.09.99 г.

Исследуется временна́я изменчивость параметров океанического волновода протяженностью до ~300 км вблизи восточного побережья Камчатки. Используются сигналы, линейно модулированные по частоте в полосе 600–800 Гц. Анализируются относительные вклады различных процессов, проистекающих в океанической среде. Оценено влияние дрейфа излучающего судна. Получены оценки снизу интервалов стабильности параметров волновода. Основной вклад во временну́ю изменчивость условий распространения, по-видимому, дает динамика внутренних волн. Рассмотрена возможность адаптации приема к характеристикам звукового канала.

Фундаментальная проблема исследования океана акустическими методами, как правило, сопряжена с необходимостью обнаружения слабых сигналов на фоне помех. Для преодоления этой трудности приходится применять разные способы, причем один из самых действенных заключается во временно́м накоплении информации. Такое накопление особенно эффективно в период, когда условия распространения звука остаются неизменными. В связи с этим важно знание интервалов временно́й корреляции звукового поля в различных условиях.

Приемные антенны с большими апертурами обычно располагаются в прибрежных районах океана, где значительная часть сигналов по отдельным лучам испытывает донно-поверхностные отражения. Это обстоятельство снижает пространственную корреляцию звукового поля в районе приема и, следовательно, вопрос об интервалах времени, в пределах которых возможно когерентное накопление информации, весьма актуален. Настоящая работа посвящена исследованию временно́й изменчивости параметров неоднородного океанического волновода в прибрежном районе Тихого океана вблизи восточного побережья Камчатки. Отметим, что для точного измерения временно́й изменчивости условий распространения звука в океаническом волноводе необходимы стационарные трассы. Однако в описываемом эксперименте конечные точки трассы располагались при большой глубине места (до 5.5 км), так что излучающий корабль дрейфовал и по существу оценивалась пространственно-временная изменчивость параметров гидроакустического канала. Вместе с тем величина и направление дрейфа контролировались с помощью спутниковой навигационной системы. Поэтому влияние дрейфа можно оценить расчетным путем. Ниже показано, что в рассматриваемых измерениях интервалов стабильности преобладающую роль играет жизнь среды и, следовательно, со значительной степенью уверенности можно говорить об оценках временны́х интервалов изменчивости канала (по крайней мере об определении нижней границы значений). Следует отметить, что проблема временно́й изменчивости условий распространения звука в океане исследовалась в значительном числе работ (см. например [1–3]). Отметим одну из последних [4], в которой изучалось распространение звука в частотной полосе 0.3–7.5 кГц по стационарной трассе длиной ~16 км в мелководном районе Средиземного моря. На самых низких частотах в указанном диапазоне интервал стабильности был не менее 36 часов. Однако исследования на глубоководных трассах, включающих в себя прибрежный клин, весьма малочисленны. В 1995 году была опубликована работа [5], где показано, что в диапазоне частот 30–50 Гц при распространении звуковых сигналов по трассе длиной ~100 км и их приеме в шельфовой зоне Камчатки интервал временно́й стабильности был более 45 мин. Настоящая работа по существу является продолжением измерений, описанных в [5]. Однако использовались более высокие частоты (600–800 Гц), а дистанция до источника достигала 300 км.

Кроме того, в настоящей статье проанализирована возможность и эффективность адаптации приема к параметрам звукового канала на интервале их стабильности.

Перейдем к описанию эксперимента. На рис. 1 представлен район работ и исследуемая трасса, а также зависимость скорости звука от глубины в ряде точек трассы. Прием сигналов производился

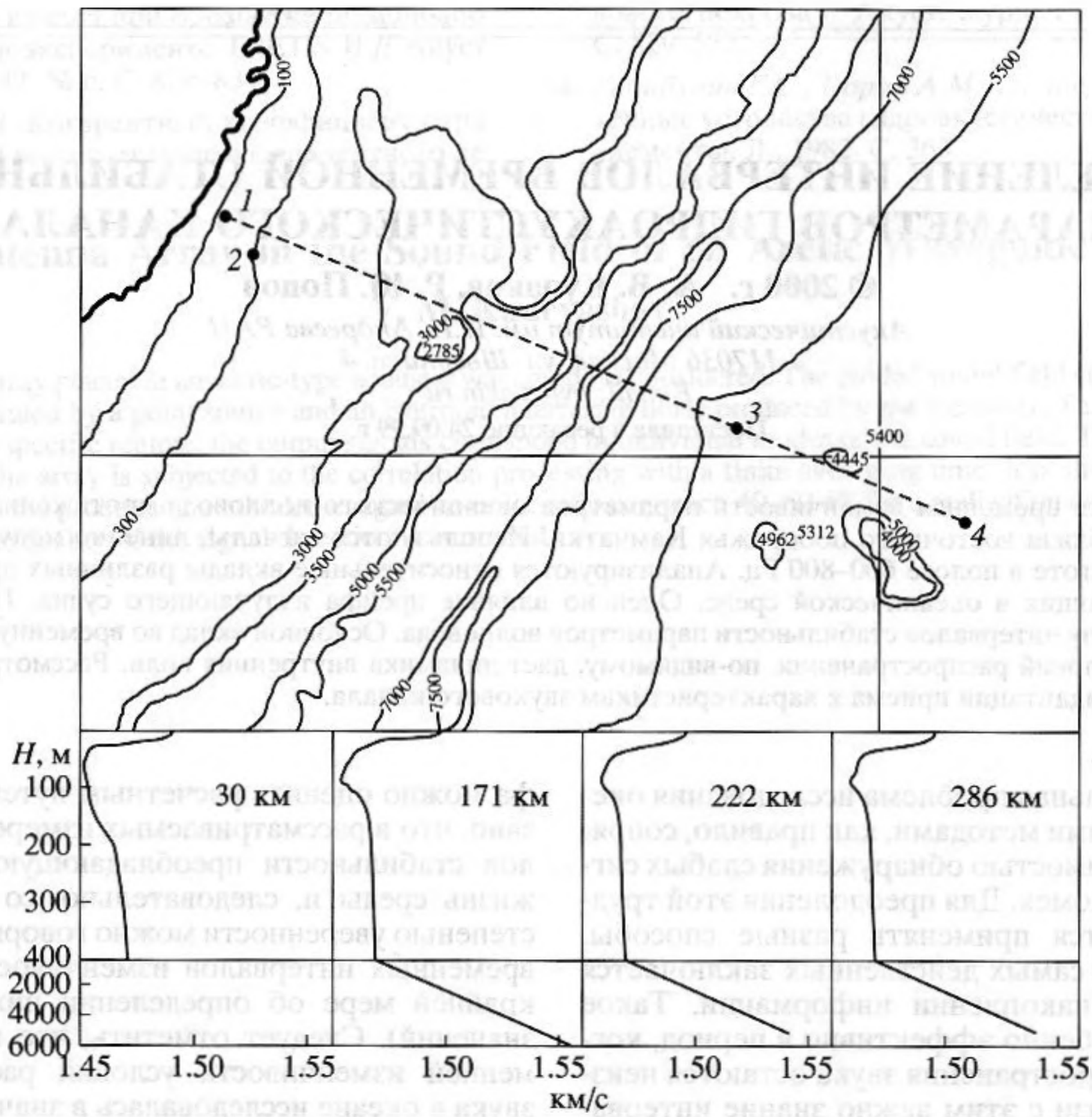

Рис. 1. Район работ и исследуемая трасса, зависимость скорости звука от глубины в ряде точек трассы. Точки *1* и *2* – места размещения гидрофонов; точки *3*, *4* – места дрейфующего излучающего судна.

на два гидрофона (точки *1* и *2* на рисунке), один из которых свешивался на горизонт 74 м с борта научно-исследовательского судна, стоящего на якоре при глубине места 130 м, а второй лежал на дне, вблизи изобаты 300 м, и был удален от первого на дистанцию 17 км. Сигнал от донного гидрофона через радиобуй передавался на борт того же научно-исследовательского судна. Судно, с которого производилось излучение (на горизонте 100 м), дрейфовало в рабочих точках *3* и *4* трассы, удаленных от приемного судна на ~215 км и ~305 км соответственно. В качестве зондирующих посылок использовались цуги сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-сигналы) и девиацией частоты в диапазоне 600–800 Гц. Первый цуг общей длительностью ~30 мин был образован посылками длительностью 1 с и интервалом между посылками 3 с, а второй цуг той же длительности – с импульсами 10 с и интервалом 3 с. Временнóй интервал между цугами составлял 10 мин.

В период эксперимента скорость дрейфа излучающего судна изменялась в пределах 0.5–1.7 узла, а ее проекция на направление трассы распространения звуковых сигналов – в пределах 0.1–1.0 узла. Волнение поверхности океана было порядка 3–4 баллов.

Принимаемые сигналы вводились в ЭВМ, где проводилась их обработка. Прежде всего вычислялся коэффициент корреляции $R(\tau)$ между эталонным (излучаемым) сигналом и сигналами, принимаемыми одним из гидрофонов. На рис. 2 представлены графики огибающей $R(\tau)$ для первого цуга при удалении излучателя от свешиваемого гидрофона на ~215 км. Известно, что при достаточной ширине частотной полосы сигнала функция $R(\tau)$ позволяет оценить функцию отклика волновода. В нашем случае $\Delta f = 200$ Гц и следовательно можно было разрешить (по уровню 0.7) приходы сигналов по лучам, отличающиеся более чем на 5 мс. Отметим, что функция $R(\tau)$ естественно имеет многопиковый характер, причем амплитуда каждого пика $R_i(\tau)$ не очень велика (не более 0.3); последнее легко объяснить условием нормировки.

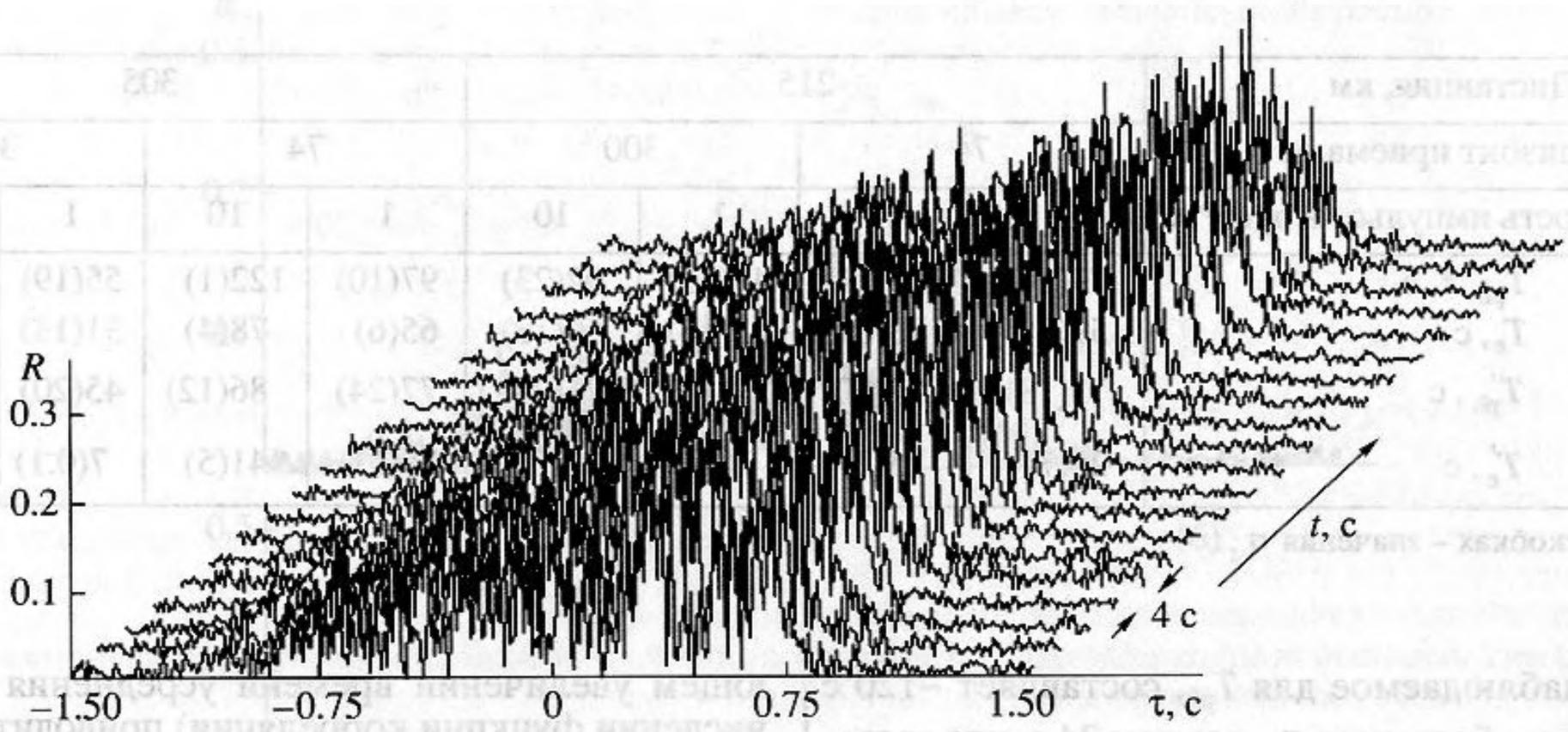

Рис. 2. Временнáя изменчивость огибающей функции корреляции посылки с принимаемыми сигналами в цуге. Длительность импульса в цуге 1 с, период 4 с. Прием производился на гидрофон, расположенный на горизонте 74 м и удаленный от источника на 215 км. $\Delta f = 600$–800 Гц.

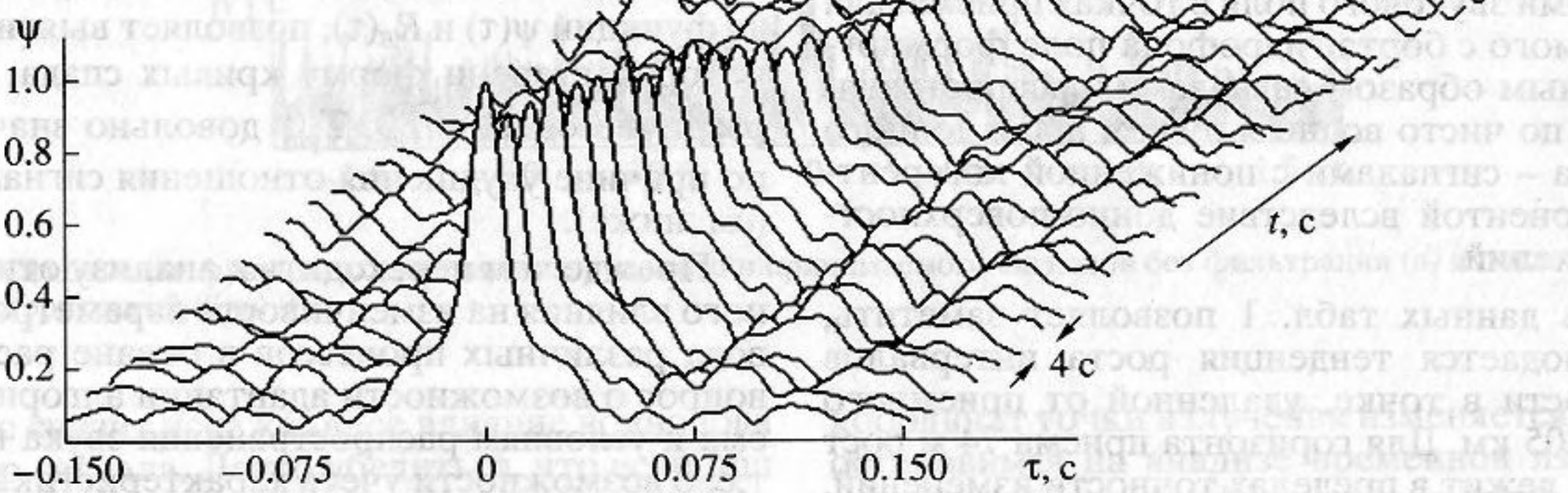

Рис. 3. Зависимость функции $\psi(\tau)$ от интервала времени между сравниваемыми функциями $R_0(\tau)$ и $R_n(\tau)$.

На графиках рис. 2 можно заметить определенную похожесть кривых $R(\tau)$. В качестве количественной меры изменчивости функции $R(\tau)$ и, следовательно, функции отклика канала как и в [5] использовалось выражение вида

$$\psi(\tau) = \frac{1}{T\sigma_0\sigma_n}\int_0^T R_0(\tau_1)R_n(\tau_1 \pm \tau)d\tau_1,$$

где R_0 и R_n – функции взаимной корреляции посылки с нулевым и n-ым принятыми сигналами в цуге; σ_0 и σ_n стандартные отклонения R_0 и R_n; T – время усреднения, равное длительности сигнала в точках приема.

На рис. 3 представлены графики огибающей функции $\psi(\tau)$. Если интервал стабильности функции отклика канала T_{st} определить как время T_e, за которое пиковое значение функции $\psi(\tau)$ уменьшится в e раз (или как время T_{ph} – спадание $\psi(\tau)$ до фонового уровня), то из рис. 3 следует, что $T_e \sim 60$ с ($T_{ph} \sim 110$ с).

Длительность цугов позволяет измерить интервалы стабильности при различных опорных функциях $R_{0,i}(\tau)$ (i = 1, 2, …, 10). В таблице приведены полученные значения T_e, T_{ph} и T'_e, T'_{ph} для двух цугов, двух гидрофонов, двух дистанций и двух способов определения интервала (по спаданию функции $\psi(\tau)$ и $R_B(\tau)$ соответственно; определение функции $R_B(\tau)$ см. ниже). По 10 измерениям определялось среднее значение интервалов стабильности и среднеквадратичное отклонение от среднего σ_{st}. Временнóй интервал стабильности характеристик гидроакустического канала для частот в диапазоне 600–800 Гц не менее нескольких десятков секунд. Максимальное значение ин-

Таблица 1

Дистанция, км	215				305			
Горизонт приема, м	74		300		74		300	
Длительность импульса в цуге*, с	1	10	1	10	1	10	1	10
T_{ph}, *, с	79(14)	113(21)	48(33)	92(23)	97(10)	122(1)	55(19)	98(5)
T_e, с	59(8)	73(6)	23(16)	50(13)	65(6)	78(4)	31(13)	60(7)
T'_{ph}, с	73(18)	85(10)	22(17)	76(24)	77(24)	86(12)	45(20)	82(7)
T'_e, с	26(7)	25(2)	7(0.2)	23(0.7)	26(9)	41(5)	7(0.1)	36(0.8)

* Цифры в скобках – значения σ_{st}.

тервала, наблюдаемое для T_{ph}, составляет ~120 с при довольно большом σ_{st} равном 24 с, что связано с флуктуациями фонового уровня функции $\psi(\tau)$. Значения T_e меньше значений T_{ph} почти в 2 раза, а σ_{st} – почти в 5 раз. Отметим, что для донного гидрофона интервал стабильности всегда меньше на 20–30%.

Последнее обстоятельство объясняется характеристиками звукового поля в точках приема: для свешиваемого с борта гидрофона поле формируется главным образом сигналами, распространяющимися по чисто водным лучам, а для донного гидрофона – сигналами с пониженной когерентной компонентой вследствие донно-поверхностных отражений.

Анализ данных табл. 1 позволяет заметить, что наблюдается тенденция роста интервалов стабильности в точке, удаленной от приемного судна на 305 км. Для горизонта приема 74 м рост невелик и лежит в пределах точности измерений. В случае приема на донный гидрофон увеличение интервалов существенно выше, причем наблюдается большой разброс значений интервалов и σ_{st}. Причина такого необычного на первый взгляд поведения интервала состоит в периодическом изменении с дистанцией r условий вхождения многолучевого сигнала в прибрежный клин. Известно [1], что по мере роста r число сигналов по лучам, приходящих в точку приема в клине, и диапазон углов прихода изменяются периодически. Расчет поля свидетельствует о том, что для донного гидрофона диапазон углов прихода сигналов по лучам при $r = 305$ км на 30% у́же, чем при $r = 215$ км. Этим и объясняется несколько большее значение интервалов стабильности. Для гидрофона на глубине 74 м значительная доля энергии поступает по чисто водным лучам, по этой причине изменение T_{st} с расстоянием гораздо менее выражено, чем для донного гидрофона.

Определенное влияние на оценки стабильности оказывает длительность импульсов в цугах, T_{imp}. Так, увеличение T_{imp} в 10 раз (и соответствующем увеличении времени усреднения при вычислении функции корреляции) приводит для гидрофона на горизонте 74 м к росту на 16% и 40% величин T_e, T_{ph} и T'_e, T'_{ph} соответственно. При приеме на донный гидрофон увеличение T_{st} с ростом T_{imp} гораздо больше (до 300%) при значительном разбросе данных. При росте дистанции r до 305 км такое увеличение T_{st} с T_{imp} замедляется.

Отметим, что сопоставление оценок T_{st} по спаду функций $\psi(\tau)$ и $R_B(\tau)$, позволяет выявить до некоторой степени форму кривых спада. Обычно различие оценок T'_e, T'_{ph} довольно значительно по причине ухудшения отношения сигнал/помеха (см. ниже).

Прежде чем переходить к анализу относительного влияния на изменчивость параметров волновода различных процессов в океане рассмотрим вопрос о возможности адаптации алгоритма приема к условиям распространения звука в океане, т.е. о возможности учета характеристик волновода при приеме сигнала. Отметим более ранние работы, относящиеся к этой проблеме [6–8].

Обычно волновод характеризуется импульсной характеристикой (функцией отклика) $h(t)$ во временной области и передаточной функцией $H(\omega)$ – в частотной области. Если $f(t)$ – излучаемый сигнал, а $F(j\omega)$ – его спектр, то сигнал на выходе волновода можно записать в виде свертки сигнала с функцией отклика $h(t)$

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) f(t-\tau) d\tau$$

во временной области, либо в виде произведения передаточной функции волновода и спектра посылки

$$S(j\omega) = H(j\omega) F(j\omega)$$

в частотной области.

Более удобно проводить рассмотрение в частотной области. Наша цель заключается в такой фильтрации принимаемого сигнала, которая мак-

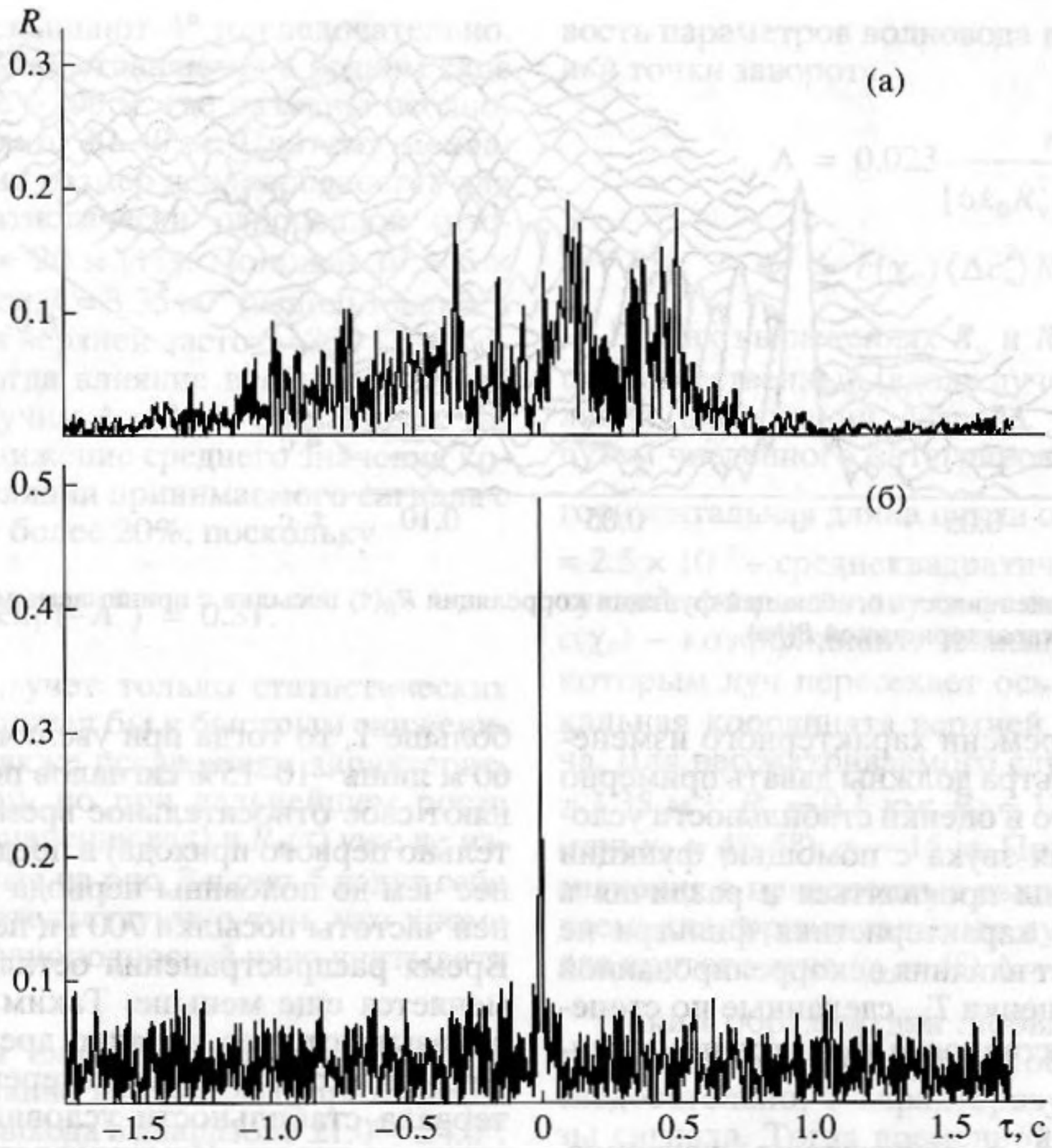

Рис. 4. Огибающая функции корреляции излучаемого и принимаемого сигналов без фильтрации (а) и после фильтра с характеристикой $B(j\omega)$ (б).

симально снизит искажающее влияние волновода на спектр сигнала. Легко убедиться, что если при приеме использовать фильтр с характеристикой

$$B(j\omega) = H^*(j\omega)/|H(j\omega)|^2,$$

(знак * означает комплексно сопряженную величину), то на выходе фильтра мы получаем спектр исходного сигнала.

На рис. 4, где представлены огибающие функции корреляции излучаемого и принимаемого сигналов без фильтрации (а) и после фильтрации с характеристикой $B(j\omega)$ (б), ясно виден результат такой адаптации к параметрам волновода: множество небольших максимумов функции $R(\tau)$ после фильтрации собираются в один пик большой амплитуды (амплитуда пика увеличивается в 2.5 раза). Наблюдаемое на рис. 4 ухудшение отношения сигнал/помеха после фильтрации обусловлено тем обстоятельством, что в выражении для $B(j\omega)$ мы не учитывали шумовую помеху, которая уже не коррелирована для соседних импульсов в цуге. График на рис. 4 (б) получен при фильтрации соседнего с опорным импульса. Характеристика фильтра $B(j\omega)$ с течением времени и изменением координат точки излучения изменяется. Здесь мы остановимся на анализе временнóй изменчивости, хотя влияние дрейфа и качки судна необходимо всегда оценивать. В работе [9] было показано, что при волнении поверхности 3–4 балла вертикальным перемещением излучателя, свешиваемого со свободно дрейфующего крупнотоннажного судна, можно пренебречь, а что касается дрейфа, то необходим расчет степени изменения угловой и временнóй структуры поля.

График на рис. 5 иллюстрирует поведение огибающей функции взаимной корреляции эталонного сигнала и последовательности принимаемых сигналов в цуге после фильтрации $R_B(\tau)$, причем характеристика фильтра формировалась по первому принимаемому сигналу в цуге. Функция $R_B^n(\tau)$, т.е. корреляция опорного и n-го сигналов в цуге после фильтрации, определяется выражением

$$R_B^n(\tau) = \frac{1}{2\pi T}\int_0^T f(t-\tau)\int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega)H_n(j\omega)\times$$
$$\times B(j\omega)e^{j\omega t}d\omega dt.$$

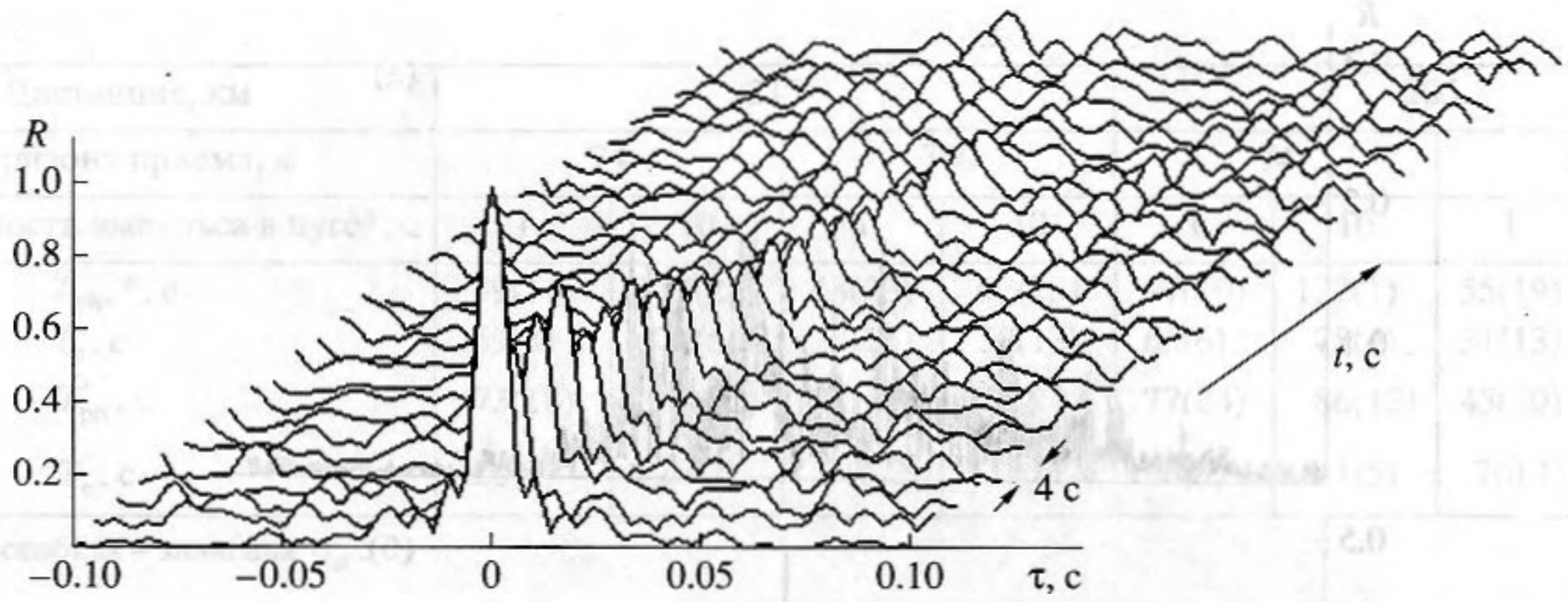

Рис. 5. Временна́я изменчивость огибающей функции корреляции $R_B(\tau)$ посылки с принимаемыми сигналами в цуге после фильтрации с характеристикой $B(j\omega)$.

Ясно, что оценки времени характерного изменения параметров фильтра должны давать примерно тот же результат, что и оценки стабильности условий распространения звука с помощью функции $\psi(\tau)$. Однако должны проявляться и различия в оценках, поскольку характеристика фильтра не включала в себя учет влияния некоррелированной шумовой помехи. Оценки T_{st}, сделанные по степени снижения эффективности фильтрации, представлены в табл. 1.

Перейдем теперь к обсуждению факторов, влияющих на сделанные оценки стабильности условий распространения звука и прежде всего постараемся дать ответ на вопрос насколько правомерно утверждение о том, что в анализируемом эксперименте измеряется главным образом временная изменчивость параметров волновода, несмотря на дрейф излучающего судна. Был проведен расчет изменений угловой и временной структур поля в точке приема вследствие дрейфа излучателя, величина и направление которого определялись спутниковой навигационной системой. Конечно, такая система давала точные параметры дрейфа только в момент пролета спутников над районом работ, что происходило обычно один раз в час (иногда реже). По этой причине проводилась линейная интерполяция данных в интервалах между точными определениями. В таком приближении проекция дрейфа на исследуемую трассу в период измерений не превышала 1 узла. Таким образом, за 120 с интервала стабильности длина трассы увеличивалась на 60 м. Влияние такого удлинения трассы на параметры волновода рассчитывалось (для гидрофона в точке *1* на горизонте 74 м и излучателя, удаленного на 215 км и дрейфующего в рабочей точке *3*, см, рис. 1). Интервал изменения дистанции при расчете был выбран 10 м, что позволило детально проанализировать влияние дрейфа. Если учитывать только те лучи, фактор фокусировки которых равен или больше 1, то тогда при увеличении дистанции на 60 м лишь ~10–15% сигналов по этим лучам изменяют свое относительное время прихода (относительно первого прихода) в пределах 0.5 мс, т.е. менее чем до половины периода несущей (для средней частоты посылки 700 Гц период равен 1.4 мс). Время распространения остальных сигналов изменяется еще меньше. Таким образом, расчеты показывают, что влияние дрейфа явно недостаточно для объяснения измеренных значений интервала стабильности условий распространения звука по трассе. Изменчивость параметров волновода связана главным образом с жизнью среды и можно считать, что полученные оценки характеризуют временной интервал стабильности.

Проанализируем теперь возможное влияние факторов, приводящих к временной изменчивости характеристик волновода. Начнем с учета относительно мелкомасштабных случайных неоднородностей морской среды. Задача рассматривалась многими авторами; мы будем следовать работе Л.А. Чернова [10] и воспользуемся известным выражением для оценки сверху среднеквадратичного значения флуктуаций фазы тонального сигнала, прошедшего в статистически неоднородной среде дистанцию r:

$$A = \left|\sqrt{\sigma^2}\right| = \left[\frac{\sqrt{\pi}}{2} a\mu^2 k_0^2 r\right]^{1/2},$$

где a – средний размер случайных неоднородностей; μ^2 – средний квадрат флуктуаций показателя преломления; k_0 – волновое число звука.

Обычно из-за вертикальной рефракции сигналы, распространяющиеся от излучателя к гидрофонам, проходят как в верхних, так и в глубинных слоях океана. Поэтому размер неоднородностей может изменяться от 1 до 100 м. Однако в рассматриваемом случае углы выхода наиболее энергонесущих лучей, попадающих в гидрофон на гори-

зонте 74 м, не превышают 4° и, следовательно, сигналы по ним распространяются в водном слое толщиной не более ~200 м, где размеры неоднородностей составляют 30–40 м. Поэтому можно считать, что средний размер неоднородностей для эквивалентной статистически однородной (изотропной) среды $a \approx 20$ м [11]. Положив $\mu^2 \approx 5 \times \times 10^{-9}$ [12], $r = 215$ км, $k = 3.35$ м$^{-1}$ (использовалось волновое число для верхней частоты 800 Гц рабочего диапазона, когда влияние неоднородностей максимально), получим $A = 0.46$. Связанное с таким значением A снижение среднего значения коэффициента корреляции принимаемого сигнала с посылкой будет не более 20%, поскольку

$$R = \exp(-A^2) = 0.81.$$

Таким образом, учет только статистических неоднородностей привел бы к быстрым снижениям значений R, а также искажениям характеристики фильтра $B(j\omega)$, но при дальнейшем росте времени пиковые значения $\psi(\tau)$ и $R_B(\tau)$ уже не изменялись бы. Кривые на рис. 3 и рис. 5 ведут себя по-другому и свидетельствуют о том, что кроме статистических неоднородностей надо учитывать и другие факторы.

Проанализируем влияние внутренних волн и сосредоточим внимание на сигналах, приходящих по лучам с углами выхода в диапазоне ±1.0°–±4.0°. Эти сигналы не испытывают отражений от границ водного слоя до прихода в гидрофон. Изменчивость свойств волновода, обусловленная внутренними волнами, может быть описана для этих сигналов такими параметрами как Λ и Φ [13]. Дифракционный параметр Λ характеризует влияние пространственного масштаба неоднородностей на дифракционные эффекты; параметр неоднородности среды Φ в области справедливости геометрического приближения, где $\Lambda \ll 1$, характеризует среднеквадратичное значение флуктуаций фазы сигнала по рассматриваемому лучу в точке приема. Приближенные оценки влияния внутренних волн на параметры распространяющегося сигнала могут быть сделаны с использованием спектра Гаррета–Манка и канонического профиля скорости звука [13]. В монографии [13] получены следующие выражения, описывающие параметры Λ и Φ:

для прямолинейного луча

$$\Lambda = \frac{12}{\pi^3} 2D_0[6k_0R_v^2(z)]^{-1},$$

$$\Phi^2 = k_0^2 r R_p(0)\langle \Delta c_n \rangle^2;$$

для сигналов, распространяющихся по крутым лучам в приближении верхней точки заворота [13] (предполагается, что основной вклад в изменчивость параметров волновода вносит область верхней точки заворота)

$$\Lambda = 0.023\frac{r}{[6k_0R_v^2(z_a)]^{1/2}},$$

$$\Phi^2 = c(\chi_0)\langle \Delta c_n^2 \rangle R_p(0)k_0^2 r.$$

В этих выражениях R_v и R_p – вертикальный и пространственный (вдоль луча) интервалы корреляции флуктуаций сигнала, полученные в [13] путем численного интегрирования; $D_0 = 41.6$ км – горизонтальная длина цикла осевого луча; $\langle \Delta c_n^2 \rangle = 2.5 \times 10^{-7}$ – среднеквадратичное значение флуктуаций скорости звука у поверхности океана; $c(\chi_0)$ – коэффициент, зависящий от угла χ_0, под которым луч пересекает ось канала; z_a – вертикальная координата верхней точки заворота луча. Для рассматриваемого случая $r = 215$ км; $k_0 = 3.35$ м$^{-1}$; $R_v \approx 0.1$ км; $R_p \approx 12.7$ км; $c(\chi_0) \approx 0.034$ (при $\chi_0 = 4°–5°$); $z_a \sim 15$ м. Подставляя указанные значения в приведенные выше выражения, получаем: для горизонтального луча $\Lambda = 0.08$, $\Phi = 86$, для крутого луча ($\chi_0 = 4°$) $\Lambda = 0.02$, $\Phi = 16$.

Таким образом, для любых лучей $\Lambda \ll 1$, т.е. справедливо геометрическое приближение и, следовательно, Φ характеризует флуктуации фазы сигнала. Тогда временной интервал корреляции сигнала в часах равен $1/\Phi$ [13]. Упомянутые выше расчеты звукового поля в точке приема показали, что прямолинейного луча нет (поскольку источник и приемник расположены на разных горизонтах), и не менее 70% звуковой энергии приходит по чисто водным лучам с углами прихода ±1.5°–±3.0°. Остальная часть энергии распространяется по лучам, испытывающим донные и донно-поверхностные отражения (до 10 донных и до 6 поверхностных) с углами прихода в диапазоне ±3°–±17°. Если предположить, что значения Φ для прямолинейного луча и луча, вышедшего под углом 1.5°, не сильно отличаются друг от друга, то диапазон изменения Φ для чисто водных лучей составляет ~80–18 и, следовательно, временной интервал корреляции T_{st} лежит в пределах 42–200 с. Измеренные значения T_{st} лежат в этих пределах (см. табл. 1).

Остановимся теперь на ~30% энергии, распространяющейся по лучам, испытывающим донно-поверхностные отражения. Если говорить только о морской поверхности, волнение которой не очень велико (для рассматриваемого случая не более 4–5 баллов), то в результате многократных отражений сигнала от нее значительно возрастет рассеянная компонента. Условия распространения зеркальной составляющей сигнала практически не будет изменяться со временем. Однако отражения от различных участков наклонного дна с

неизвестным микрорельефом могут заметно искажать траекторию луча, и следовательно, и время прихода сигнала по этому лучу. Изменение участков, от которых происходит отражение, может возникать как под влиянием внутренних волн, так и под влиянием дрейфа и качки излучающего судна.

Таким образом, приходится констатировать, что хотя влияние перемещения в пространстве излучателя на изменчивость параметров той части поля, которое формируется сигналами, приходящими по чисто водным лучам, в описываемом эксперименте незначительно и им можно пренебречь, однако для ~30% звуковой энергии такое же перемещение может изменить условие вхождения сигналов в прибрежный клин и оценки временной изменчивости условий распространения звука по таким лучам могут быть заметно искажены. Оценки интервалов стабильности для донного гидрофона, когда практически все приходящие по лучам сигналы испытывают донно-поверхностные отражения, уменьшаются только на 20–30%. Следовательно, влияние дрейфа излучателя на полученные результаты не следует преувеличивать.

Подведем итоги.

– Интервалы в основном временной стабильности характеристик гидроакустического канала, протяженностью до ~300 км вблизи восточного побережья Камчатки, включающего прибрежный клин, для частот 600–800 Гц и гидрологических условий летне-осеннего периода, составляют десятки секунд (не более 120 с). Использовалась квазистационарная трасса (излучающее судно свободно дрейфовало). Однако влияние дрейфа незначительно и можно говорить об оценках временной стабильности характеристик канала.

– Основной вклад во временную изменчивость условий распространения звука в канале по-видимому дает динамика внутренних волн в океанической среде.

– Использование адаптивных алгоритмов обработки гидроакустической информации, учитывающих характеристики канала на интервале их временной стабильности, дает заметный эффект; пиковое значение взаимной корреляции принимаемого сигнала с посылкой на выходе процессора возрастает в 2.5 раза.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность О.П. Галкину за помощь в проведении вычислений звукового поля в прибрежном клине, а также О.П. Галкину и Ю.И. Тужилкину за ценные советы при обсуждении полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lynch J., Jin Y., Pawlovicz R., Ray D., Plueddemann A., Chin C., Miller F., Bourke R., Rost Pursons A., Muench R.* Acoustic travel–time perturbations due to shallow–water internal waves and internal tides in the Barents Sea Polar Front: Theory and experiment // J. Acoust. Soc. Amer. 1996. V. 99. № 2. P. 803–821.
2. *Ticeburger D., Finette S., Woef S.* Acoustic propagation through an internal wave field in shallow water waveguide // J. Acoust. Soc. Amer. 1997. V. 101. № 2. P. 789–806.
3. *Дьяченко В.Р., Тужилкин Ю.И.* Изменчивость времен распространения сигналов по отдельным лучам в мелком море // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 2. С. 202–207.
4. *Nielsen P., Bini-Verona, Jensen F.* Time stability and predictability of broadband propagation in shallow water // Proceedings of the Fourth European Conference on Underwater Acoustics. 1998. Rome. P. 631–636.
5. *Попов Р.Ю., Семенов Ю.В.* Временная изменчивость функции акустического отклика океанического волновода, включающего шельфовую зону // Акуст. журн. 1995. Т. 41. Вып. 4. С. 644–646.
6. *Parvulescu A., Clay C.* Reproducibility of Signal Transmissions in the Ocean // Radio Elect. Eng. 1965. V. 29. № 4. P. 223–228.
7. *Попов Р.Ю., Чупров С.Д.* Пространственно-временная изменчивость передаточных функций многомодового океанического волновода // Акустические волны в океане. М.: Наука, 1987. С. 92–100.
8. *Баронкин В.М., Железняков М.В., Попов Р.Ю.* Влияние изменчивости звуковых полей в океаническом волноводе на эффективность пространственно-временной обработки сигналов // Акустика в океане. М.: Наука, 1992. С. 127–135.
9. *Богунец С.В., Галкин О.П., Попов Р.Ю., Семенов Ю.В., Симакина Е.В.* Анизотропия в вертикальной плоскости амплитудных и фазовых флуктуаций тонального сигнала, принимаемого в прибрежном клине // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 6.
10. *Чернов Л.А.* Распространение волн в среде со случайными неоднородностями. М.: Изд-во АН СССР, 1958.
11. *Кузнецова Н.Г.* Корреляционные свойства поля в неоднородной среде с изменяющимися статистическими характеристиками // Вопр. судостроения. Сер. Акустика. 1978. № 11. С. 89–95.
12. *Швачко Р.Ф.* Случайные неоднородности толщи океана // Акустика океана / Л.М. Бреховских. М.: Наука. 1974. С. 72.
13. Распространение звука во флуктуирующем океане / Под ред. Флатте. Пер. с англ. М.: Мир. 1982. С. 138–144.

Determination of the Temporal Stability Intervals for the Parameters of a Hydroacoustic Channel

A. V. Kulakov and R. Yu. Popov

The temporal variability of the parameters of an oceanic waveguide extending for ~ 300 km near the eastern coast the Kamchatka peninsula is investigated. Signals with linear frequency modulation in the frequency band 600–800 Hz are used. Relative contributions of various processes that occur in the oceanic medium are analyzed. The effect of the transmitting ship drift is estimated. The lower bounds of the stability intervals of the waveguide parameters are estimated. The main contribution to the temporal variability of the propagation conditions is presumably determined by the internal wave dynamics. The feasibility of adapting the reception to the sound channel characteristics is considered.