АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1997, том 43, № 4, с. 486–491

УДК 534

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ АКУСТИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ОКЕАНИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА, ВКЛЮЧАЮЩЕГО ШЕЛЬФОВУЮ ЗОНУ

© 1997 г. **О. П. Галкин, Н. П. Поварнина, Р. Ю. Попов, Ю. В. Семенов**

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

Поступила в редакцию 26.12.95 г.

Исследовалась пространственная изменчивость отклика гидроакустического канала в низкочастотном диапазоне. Работы проведены вблизи тихоокеанского побережья Камчатки на двух трассах длиной ≈100 км, ориентированных под углом 45° относительно друг друга. Использовалась последовательность ЛЧМ-сигналов с девиацией от 41 до 48 Гц. Наблюдается значительная пространственная изменчивость характеристик звукового канала.

Знание характеристик звукового канала в океане позволяет заметно увеличить эффективность использования различных гидроакустических устройств. Поэтому оценка пространственной и временной изменчивости таких характеристик (в общем случае акустического отклика или передаточной функции) существенна при определении объема необходимых измерений в исследуемой акватории. Расчет параметров канала с точностью до фазовых соотношений в настоящее время практически невозможен, особенно в случаях, когда район включает в себя шельфовую зону. Объем экспериментальных измерений желательно свести к минимуму и использовать процедуру интерполяции [1].

Следует отметить, что проблеме изменчивости отклика волновода посвящен целый ряд исследований (см., например [2–5]), причем в большинстве из них анализируются временные изменения параметров канала. Ниже представлены результаты исследования в основном пространственной изменчивости акустического отклика канала в низком звуковом диапазоне частот.

Работы проводились в летний период в северо-западной части Тихого океана вблизи берегов Камчатки. На рис. 1 представлен район исследований. Две трассы распространения звука ориентированы под углом ≈45° друг к другу, причем одна из них приблизительно перпендикулярна генеральной линии изобат вблизи размещения приемных систем. Прием производился на систему гидрофонов, лежащих на дне, информация от которых передавалась с помощью радиобуев на приемное судно, стоящее на якоре в некотором удалении. Десять гидрофонов (номера 1–10 на рис. 1) располагались с интервалом ≈1 км примерно вдоль изобаты 300 м, а один (номер 11 на рисунке) находился в ≈14 км ближе к берегу в точке с глубиной места 134 м.

Излучающее судно свободно дрейфовало в рабочих точках (I–VI на рис. 1) со спущенным на горизонт 100 м (т.е. вблизи оси звукового канала) преобразователем. Длина трасс ограничивалась мощностью широкополосного излучателя и была несколько больше 100 км.

Профили дна по трассам А (примерно соответствующей точкам III, IV, VII) и В (точки I, V, VI) представлены на рис. 2; там же (справа) приведен типовой вид зависимости скорости звука от глубины для глубоководных частей обеих трасс. По мере приближения к береговому шельфу глубина залегания оси звукового канала изменялась от ≈100 до ≈80 м.

В качестве зондирующих посылок использовались два цуга низкочастотных ЛЧМ-сигналов (сигналов с линейной частотной модуляцией). Один цуг, общей длительностью ≈15 мин был образован ЛЧМ-сигналами с девиацией частоты в полосе 41–48 Гц и длительностью 10 с каждый с 2-секундными интервалами между отдельными посылками. Второй цуг также продолжительностью ≈15 мин был образован ЛЧМ-сигналами с той же девиацией частоты, но длительность каждой отдельной посылки в цуге составляла 60 с, а период повторения – 66 с. Общая продолжительность измерений в каждой рабочей точке была около 1 ч. Дрейф судна, измеряемый с помощью спутниковой навигационной системы, составлял угол около 90° к трассе А и равнялся ≈1.2 узла.

На борту приемного судна сигналы регистрировались, а обработка велась в лабораторных условиях. Определялась функция взаимной корреляции излучаемого (опорного) и принимаемых сигналов, что позволяет оценить функцию откли-

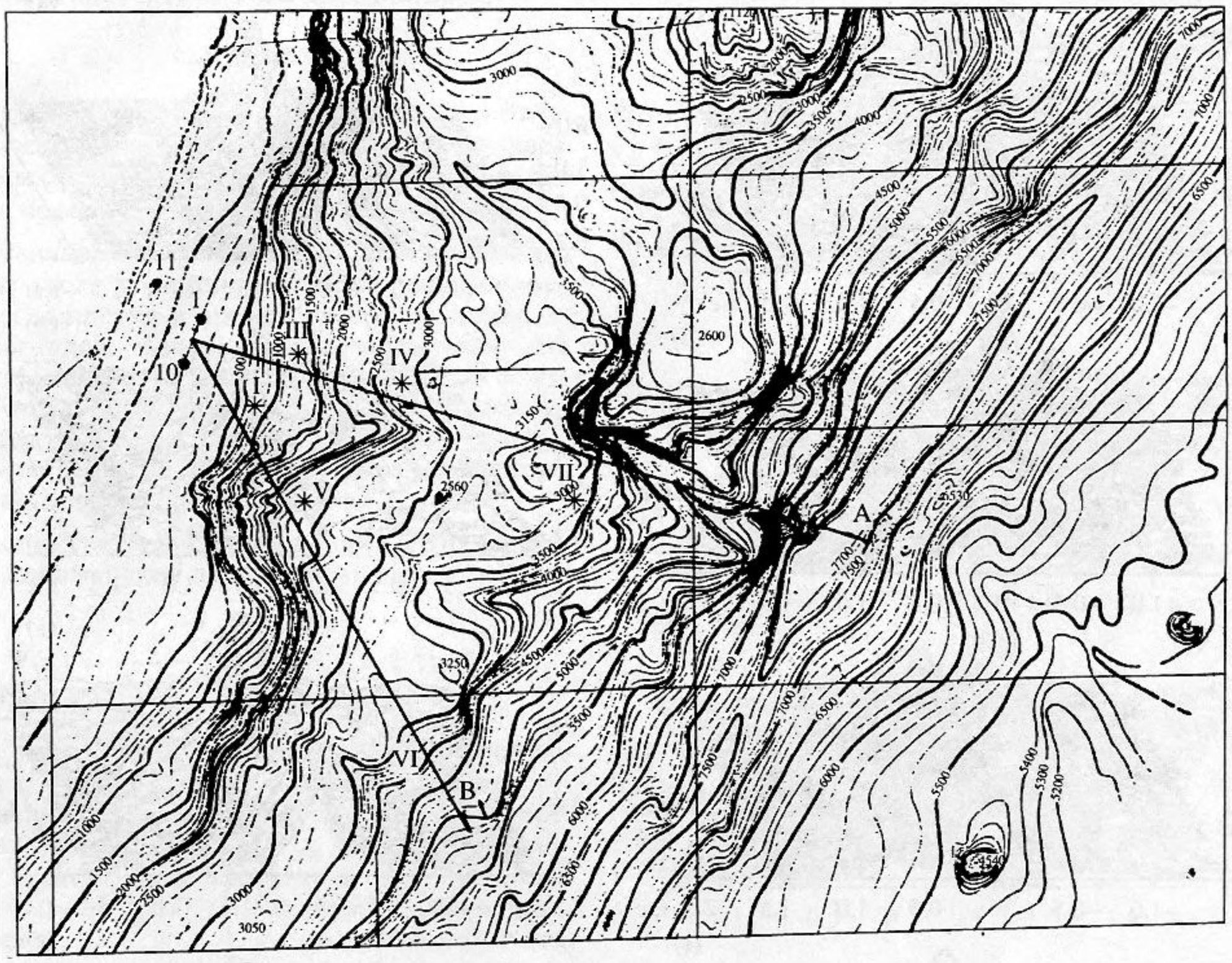

Рис. 1. Район проведения работ.

ка гидроакустического канала с разрешающей способностью $1/\Delta f = 140$ мс.

На рис. 3 в изометрии представлены зависимости от временного сдвига огибающих коэффициентов взаимной корреляции R излученного ЛЧМ-сигнала с каждым принятым 10-секундным сигналом. Отметим, что по оси абсцисс отложено не абсолютное значение временного сдвига между излученным и принятым сигналами, а временной сдвиг относительно некоторого выбранного при обработке момента времени. Каждая последующая кривая на рис. 3 представляет собой аналогичную зависимость для очередного сигнала в цуге. Таким образом, в изометрической проекции представлены огибающие коэффициентов взаимной корреляции излученного и принятого донными гидрофонами сигналов, полученные в течение 15 мин.

Из данных рис. 3 прежде всего следует вывод о практически неизменных параметрах звукового канала в течение ≈15 мин, что согласуется с результатами работы [2]. Однако, те же графики рис. 3 свидетельствуют о значительной пространственной изменчивости функции отклика. Даже при разнесении всего на ≈1 км вдоль изобаты 300 м наблюдается существенное различие формы функций отклика канала.

Будем использовать модовое представление звукового поля в районе приема. Усредненное значение скорости звука в верхних слоях дна

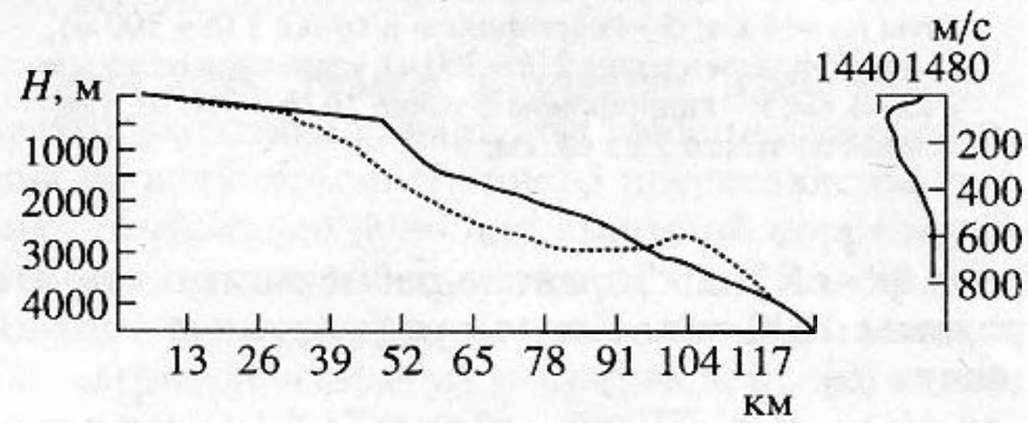

Рис. 2. Профиль дна по трассам А (пунктир) и В (сплошная кривая), а также типовая зависимость скорости звука от глубины.

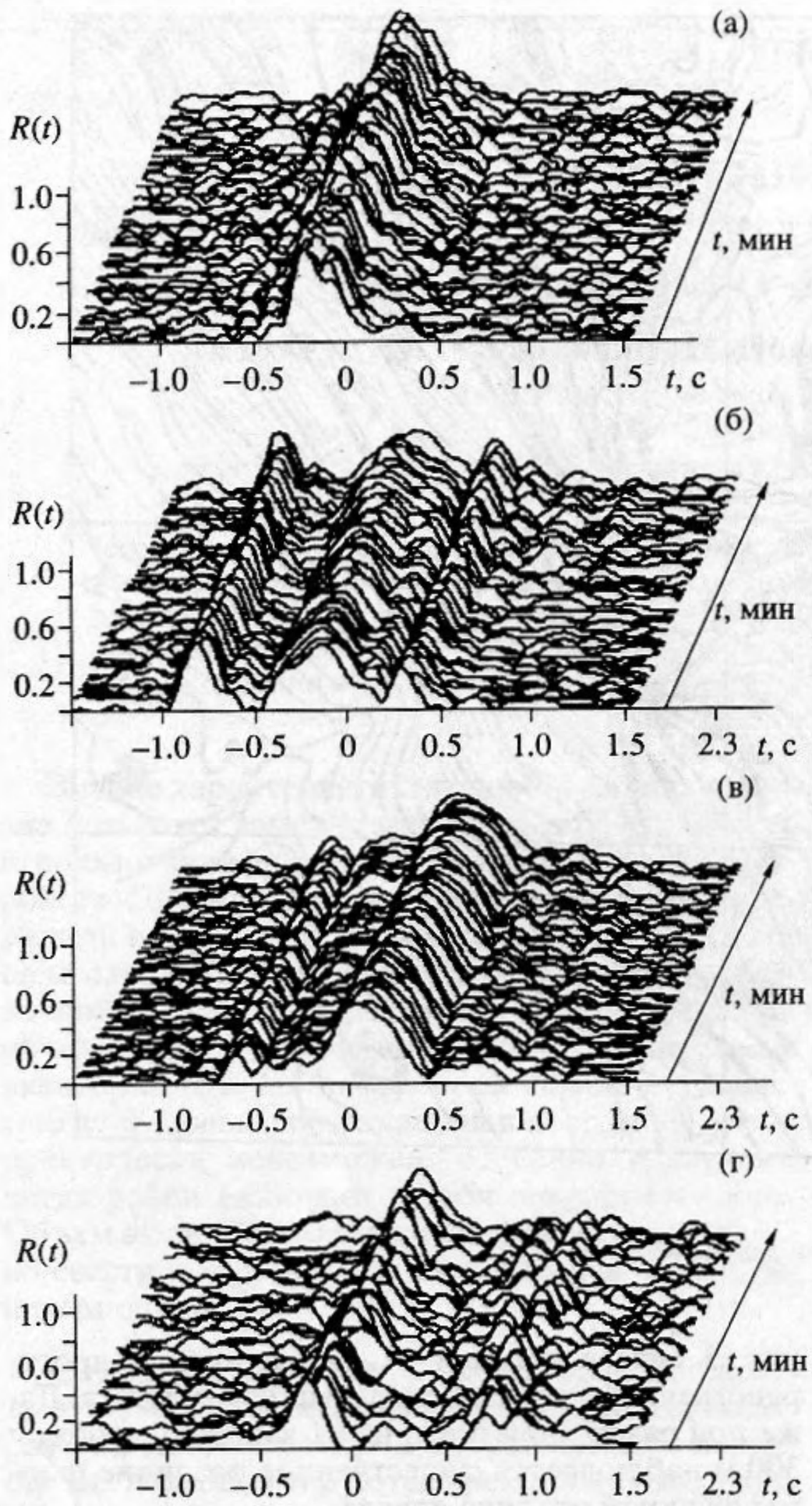

Рис. 3. Зависимость от времени огибающих коэффициента взаимной корреляции R последовательности излученных ЛЧМ-сигналов с принимаемыми. Длина трассы ≈30 км, излучение на станции I. Прием сигналов осуществлялся: а – гидрофоном, расположенным в точке 11 ($h \approx 134$ м), удаленной от 300-метровой изобаты на ≈14 км; б – гидрофоном в точке 1 ($h \approx 300$ м), в – гидрофоном в точке 2 ($h \approx 300$ м), удаленной от точки 1 на ≈1 км; г – гидрофоном в точке 10 ($h \approx 300$ м), удаленной от точки 2 на ≅8 км.

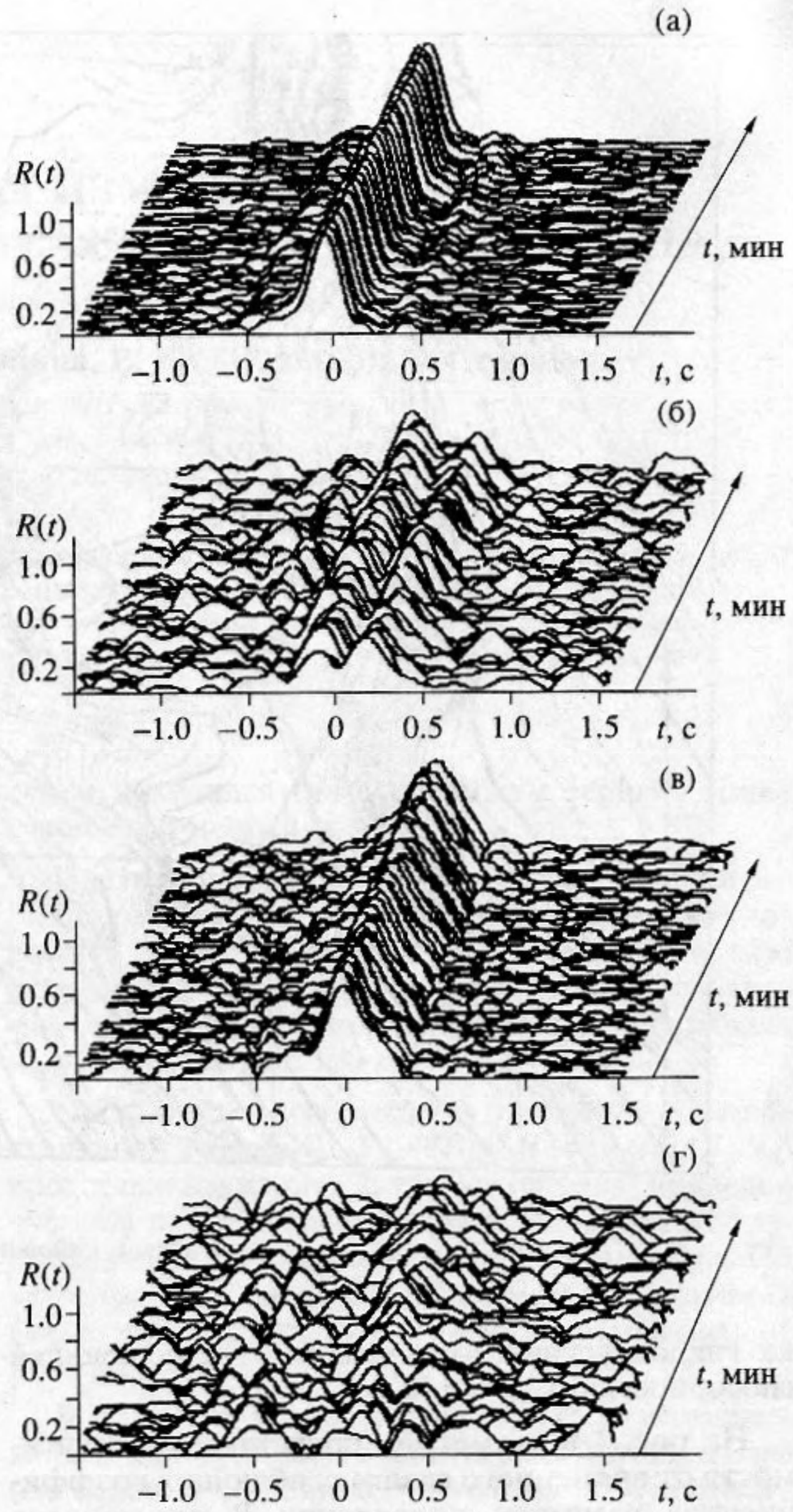

Рис. 4. Зависимость от времени огибающих коэффициента R. Длина трассы ≈30 км, угол вхождения сигналов в прибрежный клин составляет ≈45° с направлением для данных на рис. 3 (излучение на станции III). Здесь а соответствует приему сигналов донным гидрофоном, расположенным в точке 11; б – в точке 1; в – в точке 2; г – в точке 10.

шельфовой зоны в районе работ можно считать равным 1620 м/с. Используя известные соотношения [6]:

$$f_{\text{кр}} = \frac{2l-1}{4h}\frac{c}{\sqrt{1-n^2}}, \quad l \le \frac{2h\sqrt{1-n^2}}{\lambda} + \frac{1}{2},$$

где $l \neq 0$ – номер моды, n – коэффициент преломления на границе вода–грунт и $c = 1470$ м/с, получим, что в указанном выше диапазоне частот при глубине места $h \approx 134$ м могут распространяться только первые три моды, а при $h \approx 300$ м не более первых восьми. Взаимодействия мод можно не учитывать, поскольку выполняется условие при-

менимости адиабатического приближения [7].

$$k_0 h^2/m \ll 1.$$

Здесь k_0 – волновое число звука, а m – горизонтальный масштаб изменения параметров волновода. В нашем случае $f_{\text{ниж}} = 41$ Гц, наклон дна, равный в районе приема 0.5°, вдоль трасс на превышает 4°.

Изменчивость графиков на рис. 3 связана прежде всего с различием числа принимаемых мод, их амплитуд и времен распространения по ним сигналов. Число энергетически значимых мод при $h = 300$ м не превышает 3, а при 134 м звуковое поле образуется двумя неразрешаемыми (при используемых характеристиках сигналов и системе обработки) модами, что не противоречит сделанным выше оценкам.

В качестве меры изменчивости функции отклика канала будем использовать выражение:

$$\Psi(\tau) = \frac{1}{\sigma_{xn}\sigma_{yn}}\int_0^T R_{xn}(\tau_1)R_{yn}(\tau_1 \pm \tau)d\tau_1,$$

где R_{xn} и R_{yn} – функции взаимной корреляции посылки с n-принимаемым сигналом цуга в пространственно разнесенных точках x и y. Были определены пиковые значения $\Psi_{\text{пик}}$ для последовательности принимаемых сигналов в цуге (n может изменяться от 1 до ≈75) в различных точках приема. Для точек 1 и 2 (рис. 1, разнесение 1 км) имеем среднее значение $\overline{\Psi} = 0.58$ при среднеквадратичном отклонении $\sigma = 0.036$; для точек 1 и 10 (разнесение 9 км) $\overline{\Psi}_{\text{пик}} = 0.33$ при $\sigma = 0.0057$. При разнесении поперек изобат на ≅14 км (точки 2 и 11 рис. 1) $\overline{\Psi}_{\text{пик}} = 0.60$ и $\sigma = 0.039$. Увеличенное значение $\overline{\Psi}_{\text{пик}}$ в последнем случае, несмотря на большой пространственный интервал между гидрофонами, объясняется тем, что при $h \approx 134$ м число мод заметно уменьшается.

Для иллюстрации азимутальной зависимости передаточной функции на рис. 4 представлены графики, аналогичные изображенным на рис. 3; излучение проводилось в точке III, которая также как и станция I удалена от линии буев на ≈30 км, но азимутальный угол вхождения сигналов в прибрежный клин отличается на 45°. В отличие от соответствующих графиков рис. 3, неразрешенные для станции I моды в основном разрешены для станции III, время затягивания стало меньше, также как и число энергетически значимых мод. Пространственная изменчивость функций отклика при расположении излучателя в точке III характеризуется следующими значениями $\overline{\Psi}_{\text{пик}}$: $\overline{\Psi}_{\text{пик}} = 0.43$ при $\sigma = 0.072$ (разнесение гидрофонов вдоль изобаты 1 км) $\Psi_{\text{пик}} = 0.31$ при $\sigma = 0.05$ (разнесение вдоль изобаты 9 км) и $\overline{\Psi}_{\text{пик}} = 0.71$ при $\sigma = 0.037$ (разнесение поперек склона 14 км). Таким образом, по сравнению с данными для станции I пространственная изменчивость вдоль изобаты несколько увеличилась при заметном росте флуктуаций, а в перпендикулярном направлении – несколько уменьшилась.

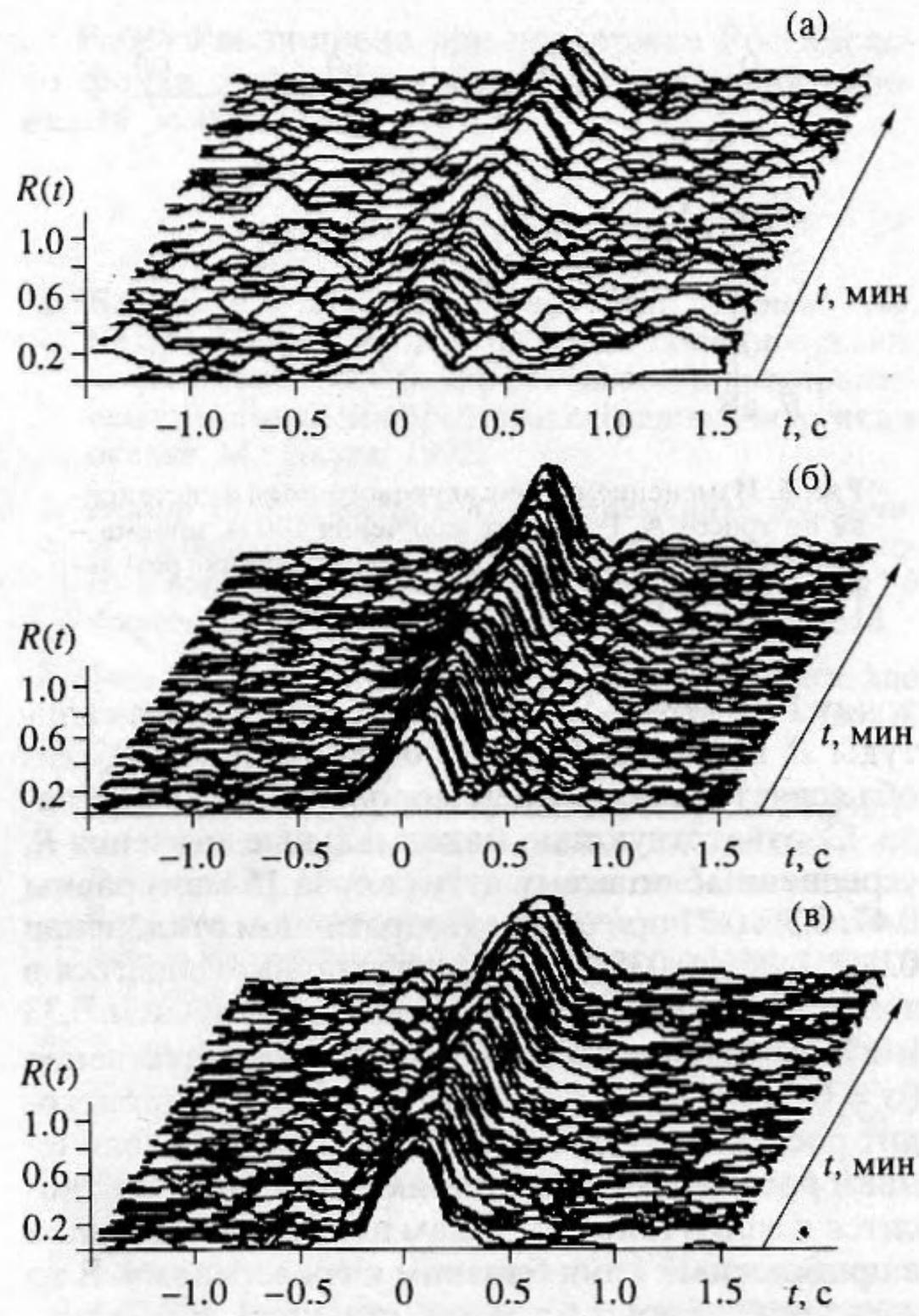

Рис. 5. Зависимость от времени огибающих коэффициента R при различной длине трассы – 50 км (станция IV) и 100 км (станция VII). Прием сигналов в точке 1: а – излучение в точке IV, б – излучения в точке VII. Прием сигналов в точке 10, в – излучение в точке IV.

Обратимся теперь к оценке изменчивости функций отклика канала при увеличении расстояния до излучателя. На рис. 5 представлены графики огибающей функции взаимной корреляции посылок, излучаемых в точках IV и VII (≈50 км и ≈100 км от гидрофонов, расположенных вдоль 300-метровой изобаты) и принимаемыми сигналами в точке 1 и 10 (для станции III соответствующие данные изображены на рис. 4). Видно изменение модового состава при приеме в точке 1 после перехода излучающего судна из точки III в

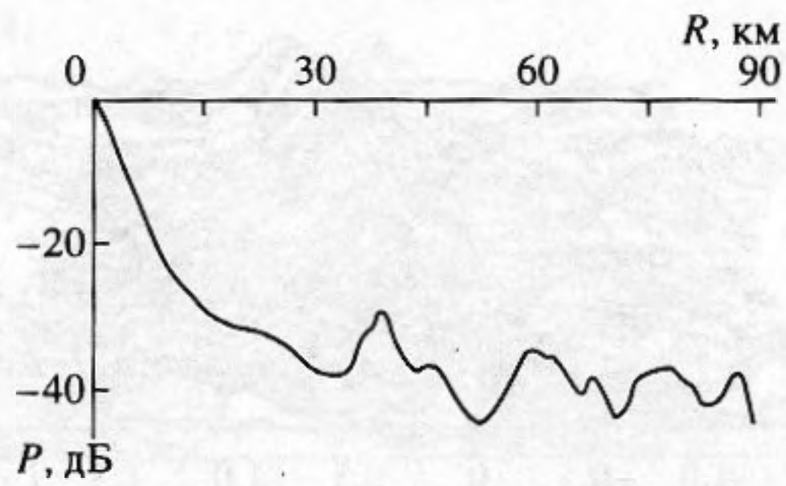

Рис. 6. Изменение уровня звукового поля с дистанцией по трассе А. Горизонт излучения 100 м, приема – 300 м. Производилось скользящее усреднение результатов на интервале 5 км.

точку IV и точку VII, а также увеличение амплитуды R на расстоянии ≈100 км (точка VII), что объясняется обеднением модового состава сигнала. Соответствующие максимальные значения R, усредненные по всему цугу (т.е. за 15 мин) равны 0.47; 0.36; 0.71 при среднеквадратичном отклонении 0.047; 0.066; 0.038. Для гидрофона, находящегося в точке 10, для среднего значения R_{max} получаем: 0.33 и 0.71 при длине трасс ≈30 и ≈50 км соответственно ($\sigma = 0.043$ и $\sigma = 0.039$). Следовательно, происходит рост амплитуды функции отклика с увеличением расстояния до источника. Этот вывод относится к азимутальным углам вхождения сигналов в прибрежный клин близким к траверзному. В то же время для другой трассы (станции I, V, VI) имеем значение $\bar{R}_{max}$ при приеме в точке 1: 0.60; 0.87 и 0.85 при $\sigma = 0.031$; 0.013 и 0.015 соответственно, а при приеме в точке 10: 0.61; 0.69 и 0.26 при $\sigma = 0.029$; 0.039 и 0.077.

Из представленных данных вытекает, что наблюдается сложная зависимость амплитуды и формы функции отклика от расстояния до источника. В ряде случаев для объяснения получаемых данных приходится предполагать увеличение отношения сигнала/шум с ростом дистанции. В связи с этим были проведены модельные расчеты по программе, использующей метод конечных разностей для вычисления поля точечного гармонического излучателя в нерегулярном волноводе [8]. Для исследования распространения звука из глубоководной части волновода в береговой шельф была использована двухслойная модель плоского океанического волновода, в котором ровная граница водного слоя и жидкого поглощающего грунта плавно переходит в береговой клин. Для математического описания звукового поля была использована двухмерная (r, z)-модель, r – расстояние, z – глубина. Рассматривалась система двух уравнений для огибающей $v(r, z) = \frac{p(r, z)}{\sqrt{r}} \exp(-ik_0 r)$ звукового давления $p(r, z)$:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 v_1}{\partial r^2} + \dfrac{\partial^2 v_1}{\partial z^2} + 2ik_0 \dfrac{\partial v_1}{\partial r} + k_0^2(n_1^2 - 1)v_1 = 0, \\ 0 < z < z_0; \\ \dfrac{\partial^2 v_2}{\partial r^2} + \dfrac{\partial^2 v_2}{\partial z^2} + 2ik_0 \dfrac{\partial v_2}{\partial r} + k_0^2(n_2^2 - 1 + i\delta)v_2 = 0, \\ z_0 < z < H; \end{cases}$$

H – общая глубина волновода, z_0 – граница водного слоя и грунта, $n_1(r, z)$ – коэффициент преломления в водном слое, $n_2(r, z)$ – коэффициент преломления продольных волн в жидком грунте, а δ – коэффициент поглощения в грунте. На границе раздела двух сред предполагалось выполнение граничных условий непрерывности поля и его производной:

$$v_1(r, z_0) = v_2(r, z_0); \quad \rho_2 \frac{\partial v_1(r, z_0)}{\partial z} = \rho_1 \frac{\partial v_2(r, z_0)}{\partial z};$$

где ρ_1 – плотность воды, ρ_2 – плотность грунта. На границах волновода выполнены условия $v_1(r, 0) = v_2(r, H)$.

На расстоянии длины волны от источника было задано начальное распределение поля, аппроксимирующее поле вблизи источника при условии однородности среды в малой окрестности источника. Для численного решения поставленной задачи была использована явная разностная схема, условия устойчивости и оценка точности которой подробно исследованы в [9].

Расчеты проводились на частоте 45 Гц для источника, расположенного на глубине 100 м, и на расстояниях 30, 50 и 100 км от приемника. Глубина океана плавно менялась от 3000 м (на расстоянии 100 км) до 134 м. Распределение скорости звука в водном слое дано на рис. 2. Скорость звука продольных волн в грунте задавалась равной 1620 м/с. Чтобы избежать влияния нижней границы общая глубина волновода была увеличена до 4000 м и предполагалось, что скорость звука в грунте меняется линейно от 1620 м/с до 1700 м/с. Коэффициент потерь в грунте $\eta = 0.1$, относительная плотность $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 1.8$. Два принимающих гидрофона были расположены в шельфовой зоне на дне, на глубине 134 и 300 м. Для оценки среднего уровня сигнала на каждом гидрофоне поле вычислялось на горизонтах приемников с последующим текущим пространственным усреднением на интервале 5 км. Пример расчетной кривой изменения уровня поля с расстоянием представлен на рис. 6 (прием на изобате 300 м). Видно, что наряду с плавным уменьшением с расстоянием ус-

редненного значения уровня поля его изменения, несмотря на проведенное усреднение, могут достигать ±5–6 дБ. Этого более чем достаточно для объяснения увеличенного значения уровня сигнала на некоторых дистанциях до источника.

Конечно, здесь приведены только ориентировочные оценки уровня поля. Однако, проведение более точных расчетов с использованием трехмерных программ, по-видимому, не имеет большого смысла вследствие отсутствия подробной информации о характеристиках дна, а также об изменяющихся со временем и вдоль трассы гидрологических условиях.

Все представленные выше результаты получены для 10-секундных ЛЧМ-посылок в цуге. Обработка цугов с 60-секундной длительностью отдельных посылок принципиально не меняет результатов. Однако увеличение отношения сигнал/помеха после вычисления R приводит к росту значения $\Psi_{пик}$. Так, при разнесении гидрофонов на 1 км ($h \approx 300$ м) и излучении в точке VII (дистанция ≈100 км) имеем при 10-секундных посылках $\Psi_{пик} = 0.55$ при $\sigma = 0.048$, а при 60-секундных посылках $\Psi_{пик} = 0.75$ при $\sigma = 0.078$.

Таким образом, можно констатировать что в случаях, когда исследуемый район включает в себя прибрежную зону со сложным рельефом и строением дна, параметры функции отклика гидроакустического канала существенно зависят от координат и точек приема и точек излучения. Пространственная изменчивость функции отклика волновода в низкочастотном диапазоне обусловлена главным образом сильной изменчивостью модового состава звукового поля, амплитуд приходящих мод и различием в групповых скоростях энергонесущих мод, что связано со значительными пространственными изменениями характеристик грунта и рельефа дна в шельфовой зоне.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 94-02-04149).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баронкин В.М., Железников М.В., Попов Р.Ю.* Влияние изменчивости звуковых полей в океаническом волноводе на эффективность пространственно-временной обработки сигналов. Акустика в океане. М.: Наука, 1992.
2. *Попов Р.Ю., Семенов Ю.В.* "Временная изменчивость функции акустического отклика океанического в волновода, включающего шельфовую зону" // Акустический журнал. 1995. Т. 41. № 4. С. 644–646.
3. *Susanto R. Dwi, Schmidt H.* Spatial coherence and rough bottom scattering in shallow water // J. Acoust. Soc. Amer. 1994. Vol. 96. № 5. P. 3329 (A).
4. *Lynch J.F., Jin G., Pawlowich R., Ray D., Plueddemann A.J., Ching-Sang Chiu, Miller J.H., Bourke R.H., Parsons A.R., Munench R.* Acoustic travel-time perturbations due to shallow–water internai waves and internal tides in Barents Sea Polar Front: Theory and experiment // J. Acoust. Soc. Amer. 1996. Vol. 99. № 2. P. 803–821.
5. *Traykovski P.* Travel-time perturbations due to internel waves; Equivalence of modal and ray solutions // J. Acoust. Soc. Amer. 1996. Vol. 99. № 2. P. 822–830.
6. *Исакович М.А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973. С. 264.
7. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1982.
8. *Поварнина Н.П.* Явные разностные схемы в численной модели распространения звука // Судостроительная промышленность, серия Акустика, вып. 7, 1990. С. 9–15.
9. *Завадский В.Ю.* Метод сеток для волноводов. М.: Наука, 1986.

The Spatial Variability of the Acoustic Response of an Oceanic Waveguide Including a Shelf Zone

O. P. Galkin, N. P. Povarnina, R. Yu. Popov, and Yu. V. Semenov

The spatial variability of a hydroacoustic channel response in a low-frequency range was investigated. Field measurements were carried out near the Pacific coast of the Kamchatka peninsula at 100-km tracks oriented at an angle of 45° to one another. A sequence of LFM signals with the frequency deviation from 41 to 48 Hz was used. A significant spatial variability of sound channel characteristics was observed.