АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2001, том 47, № 5, с. 581–585

УДК 531.463

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННУЮ СТРУКТУРУ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ

© 2001 г. А. А. Аредов, В. И. Неклюдов, А. В. Фурдуев

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

Поступила в редакцию 18.12.2000 г.

Приведены результаты компьютерного моделирования влияния внутренних волн и прогрева поверхностного слоя воды на поведение локальных максимумов спектра интерференционного поля для условий берегового клина применительно к работе автогенераторного метода мониторинга среды. Представлены результаты экспериментальных испытаний автогенераторного метода на трассе длиной 1 км.

Одним из перспективных новых методов подводного акустического мониторинга изменчивости океанологических параметров среды является разработанный и опробованный экспериментально в морских условиях так называемый автогенераторный метод мониторинга [1–4]. Основной особенностью, определяющей эффективность и способность самоадаптации к среде, явилось то, что контролируемая среда стала составной частью прибора – автогенератора, выполняя в нем роль петли обратной связи. В автогенераторном методе мониторинга из всего спектра пространственно-частотной структуры интерференции шумового поля выделяется некоторая конкретная частота, обычно с максимальной амплитудой, на которой происходит резонансное усиление сигнала. При фиксированных точках излучения и приема изменение этой резонансной частоты выявляет ряд динамических процессов, протекающих как в толще среды, так и на ее границах, таких как внутренние волны, течения, охлаждение или прогрев воды и т.д.

Для прогнозирования реакции автогенераторной схемы необходимо оценить поведение локальных максимумов спектра интерференционного поля. Были применены методы имитационного компьютерного моделирования, в ходе которого необходимо было определить, как смещается частота максимума в интерференции – монотонно или скачками, то есть будет ли частота автогенератора при изменении условий на акватории плавно изменяться, отражая эти условия, или нет.

Была проведена оценка влияния внутренних волн и прогрева поверхностного слоя воды на спектр интерференции для широкополосного акустического сигнала, прошедшего стационарную трассу на измерительном стенде. Использовалась разработанная в Акустическом институте лучевая программа, позволяющая рассчитывать звуковое поле в точке приема путем суммирования приходящих лучей с учетом их фазы. Для моделирования были выбраны параметры среды, соответствующие району, в котором проводились эксперименты с автогенераторной системой [4], расположенному на Черноморском шельфе вблизи г. Геленджика на базе Южного Отделения Института Океанологии РАН.

Расчеты звукового поля проводились для двух трасс протяженностью 1 км и 5 км с центральными частотами 6570 Гц и 2500 Гц, соответственно. Излучатель и приемник располагались на расстоянии 1 м от дна. Глубина места линейно увеличивалась от 12 м и 15 м вблизи источника до 28 м и 90 м в месте расположения приемника для первой и второй трассы соответственно.

Для учета дна принята модель жидкого полупространства с параметрами, характерными для песчаного грунта: скорость продольных волн – $1.9(1 - i \times 0.01)$ км/с, отношение плотности грунта к плотности воды – 2.15. На рис. 1 представлены профили скорости звука для летнего времени. Влияние внутренней волны (большого масштаба по сравнению с длиной трассы) на интерференционную структуру звукового поля имитировалось изменением скорости звука в слое скачка в диапазоне глубин от 7 м до 50 м с максимальной амплитудой 5 м/с от среднего профиля (рис. 1а). Прогрев поверхности задавался плавным увеличением скорости звука на нулевом горизонте от основного значения на 2 м/с для дистанции 1 км и 10 м/с – для 5 км (кривые 1 и 2 на рис. 1б), что для диапазона температур 15–20 градусов в первом

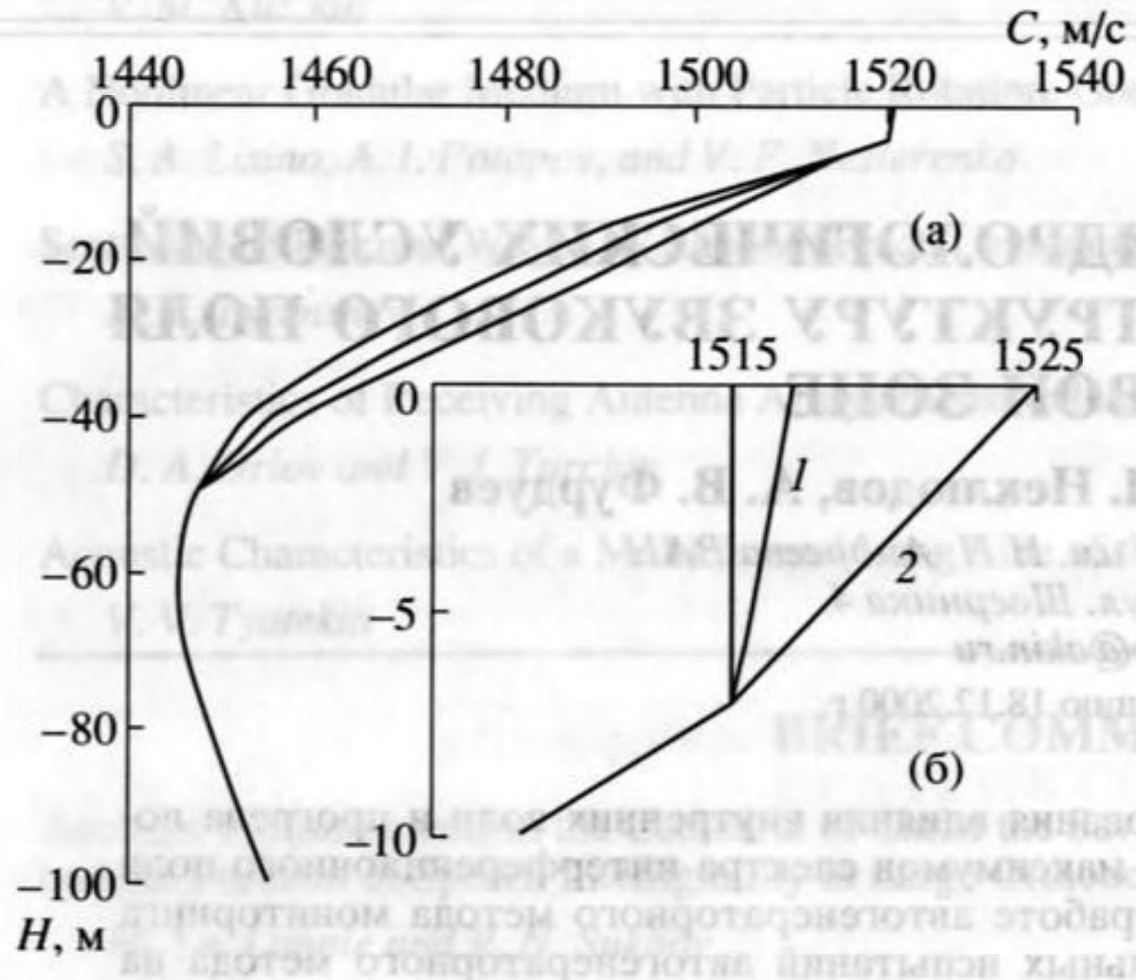

Рис. 1. Изменение профиля скорости звука при расчетах интерференционной картины. а – при прохождении внутренней волны, б – при поверхностном прогреве: *1* – дистанция 1 км, *2* – дистанция 5 км.

приближении соответствует изменению температуры воды на 0.66 градуса и 3.3 градуса соответственно.

Влияние поверхностного прогрева на интерференционную структуру спектра акустического давления на приемнике представлено в виде трехмерных поверхностей на рис. 2а и рис. 2б для дистанций 1 км и 5 км соответственно. По горизонтальным осям отложены частота в герцах и скорость звука в м/с, а по вертикальной – звуковое давление в дБ относительно максимального значения. Данные на рис. 2а получены в диапазоне частот 6520 Гц до 6620 Гц с шагом 5 Гц при увеличении скорости звука на поверхности от 1515 м/с до 1517 м/с шагом 0.1 м/с. Данные на рис. 2б соответствуют частотам от 2450 Гц до 2550 Гц с шагом 5 Гц при росте скорости звука на поверхности от 1515 м/с до 1525 м/с с шагом 0.5 м/с. Выбор таких параметров диктовался необходимостью получения плавных изменений интерференционной структуры звукового поля.

На обоих рисунках хорошо прослеживается смещение максимумов интерференции с изменением поверхностной температуры, при этом их смещение происходит в сторону увеличения частоты с ростом температуры на поверхности. Более плавное смещение интерференционной структуры поля на дистанции 1 км (рис. 2а) обусловлено меньшим шагом изменения скорости звука у поверхности и, соответственно, меньшим диапазоном температуры.

Для большей наглядности на рис. 2в представлена эволюция спектра для дистанции 1 км в виде полутоновой картинки в координатах частота – скорость звука на поверхности. Степень затемненности ячеек пропорциональна уровню звукового поля. Максимумы интерференционной картины изображены в виде светлых почти параллельных полос. При изменении скорости звука на поверхности максимумы плавно сдвигаются со средними скоростями 15 Гц на 1 м/с приращения скорости звука на поверхности, причем при увеличении температуры максимумы спектров смещаются в сторону высоких частот. Следует отметить, что для выбранного при расчетах диапазона углов выхода лучей из источника ±40° в месте приема наблюдалось до 80 лучей с фактором фокусировки – не менее 0.3 на дистанции 1 км и до 70 лучей – на дистанции 5 км. Часть лучей распространялась вблизи дна без отражения от поверхности, однако большая часть лучей (~60%) многократно отражалась от поверхности, что и приводило к смещению спектра сигнала с изменением поверхностной температуры.

Влияние внутренней волны на интерференционную структуру поля представлено на рис. 3 для дистанции 5 км на частотах вблизи 2500 Гц в виде полутоновой картинки. Расчеты интерференции проводились для случая изменения скорости звука в слое скачка за период внутренней волны от минимальных до максимальных значений (рис. 1а). Наблюдается плавное смещение интерференционной структуры в сторону увеличения с частотой в первый полупериод (рост скорости звука) и в сторону уменьшения с частотой во второй полупериод (уменьшение скорости звука) внутренней волны. Из рис. 3 следует, что скорость сдвига максимумов интерференционной картины составляет величину ~5 Гц на 1 м/с приращения скорости звука на горизонте 25 м.

В целом как внутренние волны, так и поверхностный прогрев вызывают монотонное смещение максимумов интерференционной структуры звукового поля, что позволяет надеяться на четкую и однозначную регистрацию такого типа гидрофизических явлений автогенераторным методом.

Автогенераторный способ акустического мониторинга изменчивости среды [4] был испытан и исследован как на короткой (~1 км), так и на длинной (~5 км) трассах. Работу регенеративной схемы описывают коэффициентом кольцевой передачи M, который включает чувствительность приемника звука, коэффициент передачи тракта усилителей с фильтром, АРУ и кабелями, чувствительность излучателя и частотно зависимый коэффициент передачи акустической трассы. При этом, пока $M < 1$ схема представляет собой регенератор морского шума, а при $M \geq 1$ схема превращается в автогенератор, частота которого

будет определяться максимумом спектра интерференции лучей (мод) в точке приема и выполнением условий фазовой согласованности.

Процесс регенерации шума существенно повышает контраст изменения M и отмечает максимум в частотной зависимости M, если достаточно плотно расположены частоты положительной обратной связи, что получается при большой длине акустической трассы. Так, на трассе 1 км, частоты будут следовать через 1.5 Гц, а для 5 км – уже через 0.3 Гц. Очевидно, что при $M = 1$ схема перейдет в автогенераторный режим, при котором генерация возникнет в зоне максимума интерференции лучей.

На рис. 4 приведен результат эксперимента для трассы длиной 1 км. На левом графике представлен контрастированный регенерацией спектр шума в полосе частот 2500 Гц с максимумом на частоте 6509 Гц. Наблюдение за изменением интерференционной картины во времени, по-видимому, весьма информативное для мониторинга трассы, позволяет разделить лучи и обнаруживать наличие неоднородностей, однако как методическая, так и теоретическая разработка этого способа мониторинга впереди. Отметим, что отсчет (по оси частот) максимумов интерференции в схеме регенерации может быть очень точен. Правый график на рис. 4 демонстрирует это. Здесь представлен тот же спектр регенерации в полосе 37 Гц, и лишь в зоне основного максимума интерференционной картины (около 6509 Гц) при $M = 0.9$. Точность слежения за максимумом, как показал эксперимент, – порядка 0.005 Гц на частоте 6500 Гц, т.е. около 10^{-6}, поэтому, такой метод может оказаться целесообразным при развитии "интерференционной томографии" [5, 6, 7, 8].

Экспериментально был отмечен интересный факт постоянства интервалов между частотами положительной обратной связи. Для данного примера все частотные дистанции между пиками положительной обратной связи оказались равными 1.56 Гц, что соответствует времени пробега доминирующего луча, проходившего трассу за 0.64 с. При этом интересно отметить, что длительное наблюдение спектров (подобных правому графику рис. 4) показало, что сетка частот положительных обратных связей продолжительное время остается неизменной и эквидистантной, а максимум интерференции, следуя изменению условий распространения звука на трассе, медленно смещается. Такое поведение спектра регенерации в районе интерференционного максимума наталкивает на вывод о том, что автогенерация (если $M \geq 1$) возникает на частоте близкой к максимуму интерференции, обусловленной совокупностью лучей при фазовом условии, обеспечиваемом лишь одним энергетически доминирующим лучом.

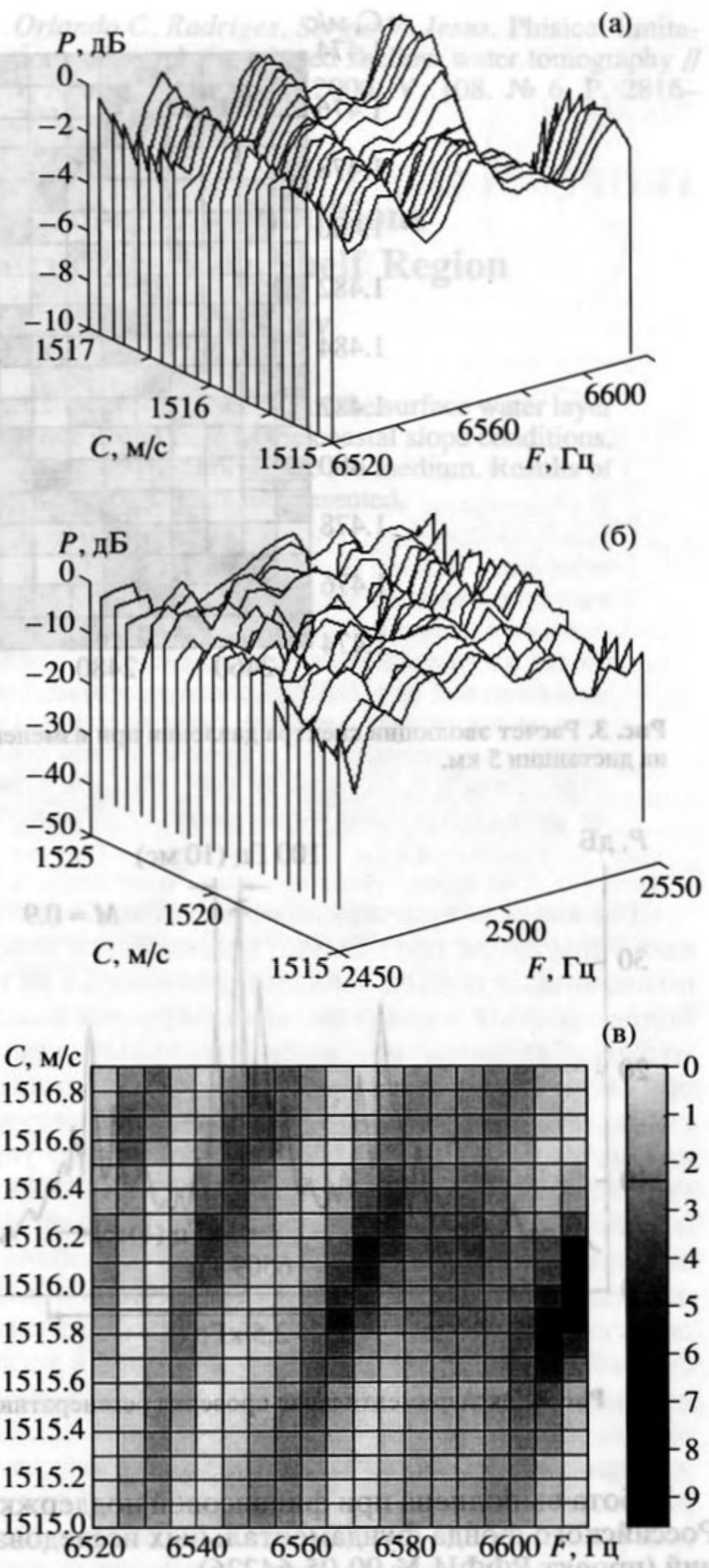

Рис. 2. Эволюция спектра давления при поверхностном прогреве в виде трехмерных поверхностей для дистанции 1 км (а) и 5 км (б) и в виде полутоновой картинки для дистанции 1 км (в).

Увеличение усиления до $M \geq 1$ приводит к самовозбуждению генератора, при этом наблюдается монохроматический сигнал, частота которого реагирует на изменение условий распространения звука по трассе, включая проход судна, рыбного косяка, температуры воды, течений, прохождение гидрографических неоднородностей и т.п.

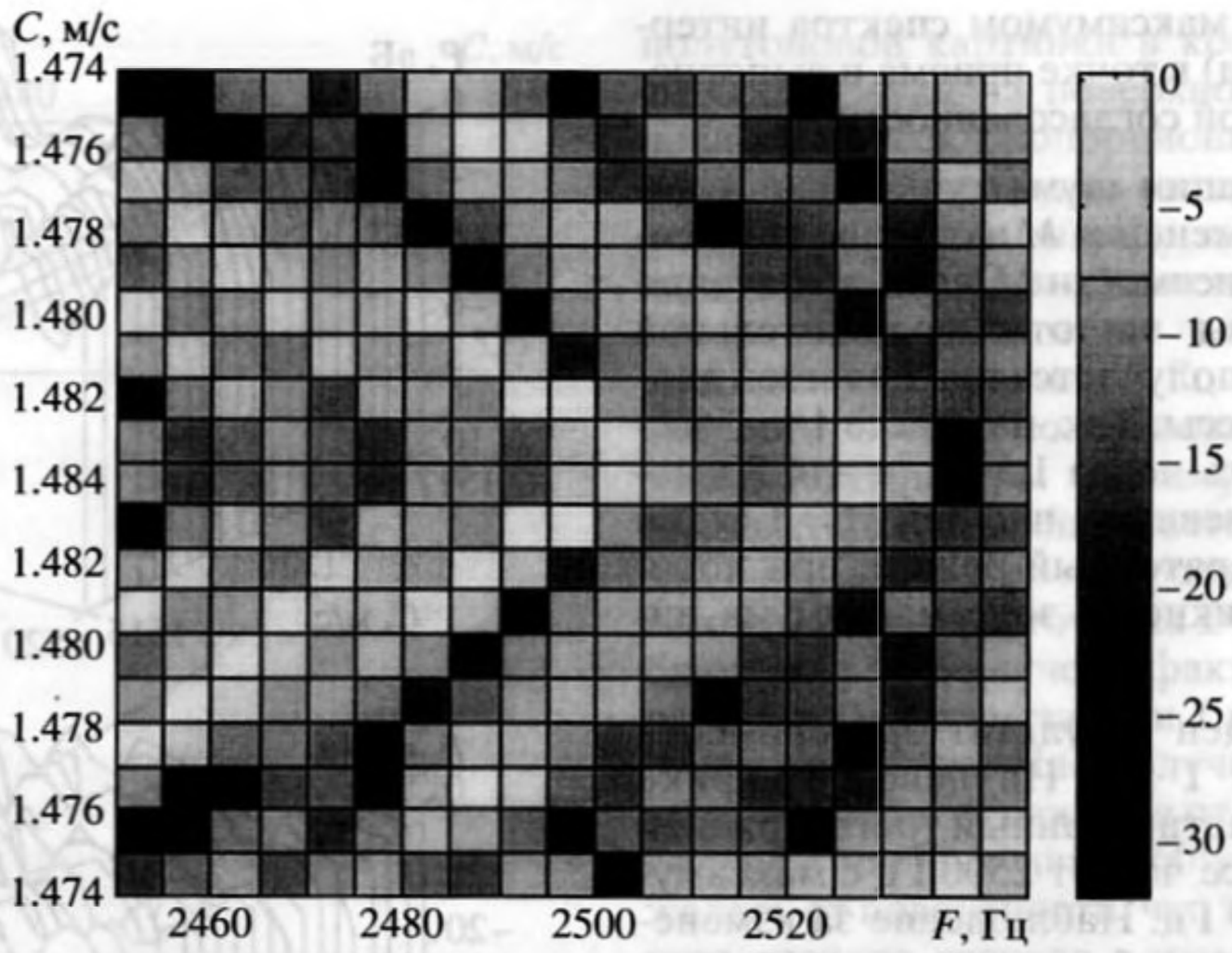

Рис. 3. Расчет эволюции спектра давления при изменении скорости звука в слое скачка за период внутренней волны на дистанции 5 км.

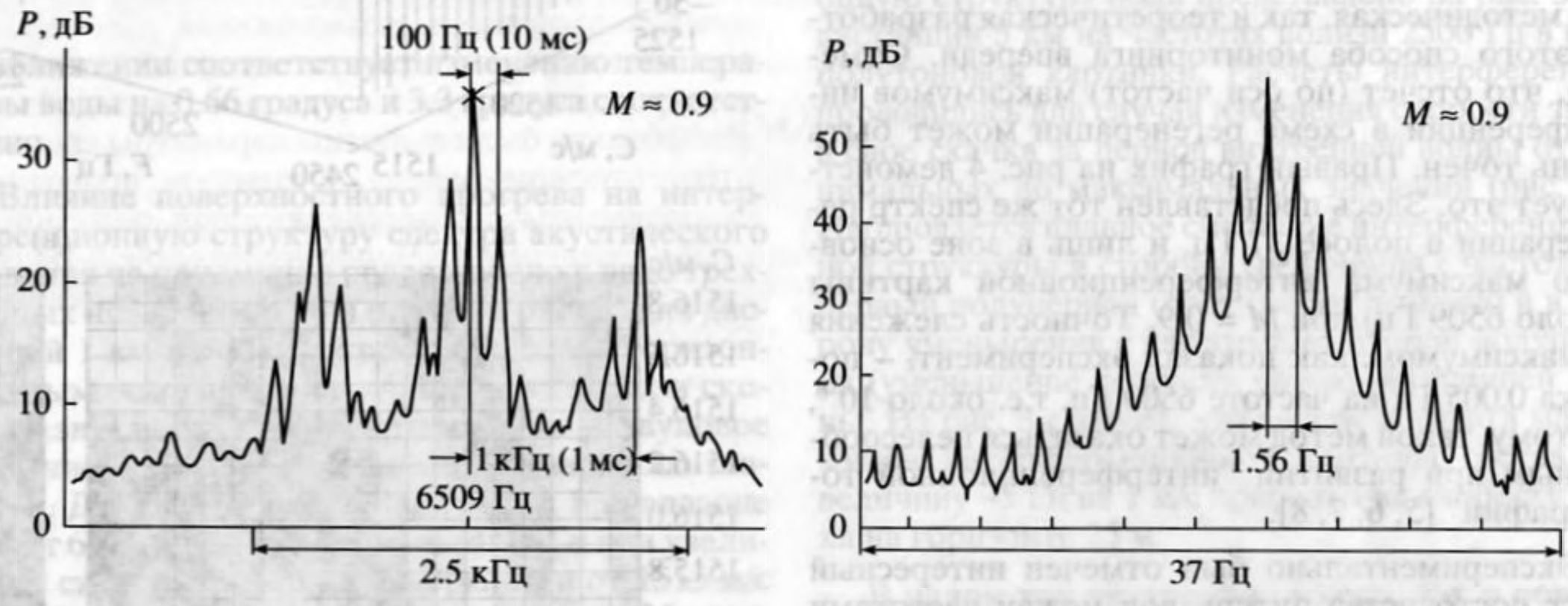

Рис. 4. Экспериментальная проверка регенеративной схемы в режиме измерения спектра интерференции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 00-05-64226).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фурдуев А.В.* Акустическая диагностика изменчивости морских акваторий и трасс // Акустика на пороге XXI века (Сборник трудов VI сессии РАО). М.: Изд-во МГГУ, 1997. С. 169–175.
2. *Фурдуев А.В., Аграновский А.В.* Способ акустического мониторинга изменчивости параметров морских акваторий // Патент на изобретение № 2134432 класс 6G 01S15/00, 3/96. Опубликован в Официальном бюл. по патентам и знакам № 22 от 10.08.99. С. 1–14.
3. *Фурдуев А.В.* О новых способах подводного акустического мониторинга // Доклады VIII школы-семинара акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана". М.: ГЕОС, 2000. С. 25–29.
4. *Фурдуев А.В.* Акустический мониторинг изменчивости подводной среды (экспериментальная проверка новых методов) // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 3. С. 422–430.
5. *Бородин В.В., Миносян Г.Р.* О пределах применимости модовой, лучевой и интерференционной томографии // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 1. С. 34–44.
6. *Орлов Е.Ф.* Акустическая интерференционная диагностика океана // Доклады VIII школы-семинара акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана". М.: ГЕОС, 2000. С. 13–17.

7. *Elisseeff P., Schmidt H., Jonson M., Herold D., Chapmen N.R., McDonald M.M.* Acostic tomography of a coastal front in Haro Strait, British Columbia // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 10. № 1. P. 169–184.

8. *Orlando C. Rodriges, Sergio V. Jesus.* Phisical limitations of travel–time–based shellow water tomography // J. Acoust. Soc. Amer. 2000. V. 108. № 6. P. 2816–2822.

Effect of the Variability of Hydrological Conditions on the Sound Field Interference Structure in a Shelf Region

A. A. Aredov, V. I. Neklyudov, and A. V. Furduev

Computer simulations are performed to study the effect of internal waves and heating of the surface water layer on the behavior of the local spectral maximums of the interference sound field in the coastal slope conditions, as applied to the operation of the self-sustained oscillator technique for monitoring the sea medium. Results of testing the self-sustained oscillator technique on a 1-km-long propagation path are presented.