АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2007, том 53, № 6, с. 786–790

АКУСТИКА ОКЕАНА. ГИДРОАКУСТИКА

УДК 534.26

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕКТОРНЫХ ПРИЕМНИКОВ В ЗАДАЧАХ ТОМОГРАФИИ ОКЕАНА

© 2007 г. А. В. Буренин, Ю. Н. Моргунов, Д. С. Стробыкин

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041 Владивосток, ул. Балтийская, 43
E-mail: shurick_burenin1@mail.ru

Поступила в редакцию 26.09.06 г.

В работе обсуждаются результаты экспериментальных исследований временной и угловой структуры акустических полей на шельфе Японского моря, полученные с применением векторно-фазовой обработки сложных зондирующих сигналов типа М-последовательностей с центральной частотой 2500 Гц. В контролируемых гидрологических условиях установлена однозначная связь изменчивости температурного режима на стационарной акустической трассе с временами и углами приходов акустической энергии. Показано, что применение векторных приемников в томографических схемах позволит получить независимый дополнительный параметр импульсной характеристики диагностируемого волновода и, таким образом, повысить эффективность решения задач реконструкции гидрофизических полей по данным акустического зондирования.

PACS: 43.60.Pt

Внедрение акустических методов в практику океанологических измерений и мониторинга гидрофизических параметров морской среды во многом зависит от экономической и технической целесообразности их применения. Например, акустическая томография динамики и структуры вод имеет несомненные преимущества перед традиционно используемыми океанологами методами и приборами. Вместе с тем, для решения многих задач требуется построение сложных, громоздких и дорогостоящих систем. Так реконструкция полей течений в вертикальной плоскости по данным акустического зондирования требует размещения на диагностируемой акватории вертикально развитых приемно-излучающих антенн для измерения угловой структуры акустического поля [1]. В работах [2–4] авторами обсуждались экспериментальные результаты томографического исследования полей течений и температур, которые были получены при использовании одиночных приемников и источников звука, размещаемых вблизи дна. Решение проблемы идентификации лучевых приходов акустической энергии по различным траекториям при анализе импульсных характеристик диагностируемых волноводов потребовало разработки нового способа зондирования с применением векторных приемников звука [5]. Физической предпосылкой для его разработки явилась идея совмещения преимуществ временной селекции лучевых приходов на приемной системе путем применения сложных широкополосных зондирующих сигналов и так называемой "векторно-фазовой" обработки выделенных импульсов, позволяющей измерять углы приходов по соотношению амплитуд в ортогональных каналах векторного приемника. В работе [6] были приведены предварительные результаты экспериментальной апробации метода, подтвердившие принципиальную возможность измерения углов с использованием фазоманипулированных сигналов при приеме на точечный приемник колебательной скорости.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований закономерностей формирования и взаимодействия гидроакустических и температурных полей в мелком море, демонстрирующие возможности акустической томографии для исследования и мониторинга температурных полей при использовании в качестве приемников гидроакустических сигналов гидрофона и точечного приемника колебательной скорости.

Эксперимент проводился на акустико-гидрофизическом полигоне ТОИ ДВО РАН у мыса Шульца в Японском море в сентябре 2004 года. Ежеминутное излучение сложных сигналов (М-последовательностей, 511 символов, 4 периода несущей частоты на символ) в течение суток осуществлялось на частоте 2500 Гц источником звука, стационарно размещенном вблизи дна на глубине 40 мет-

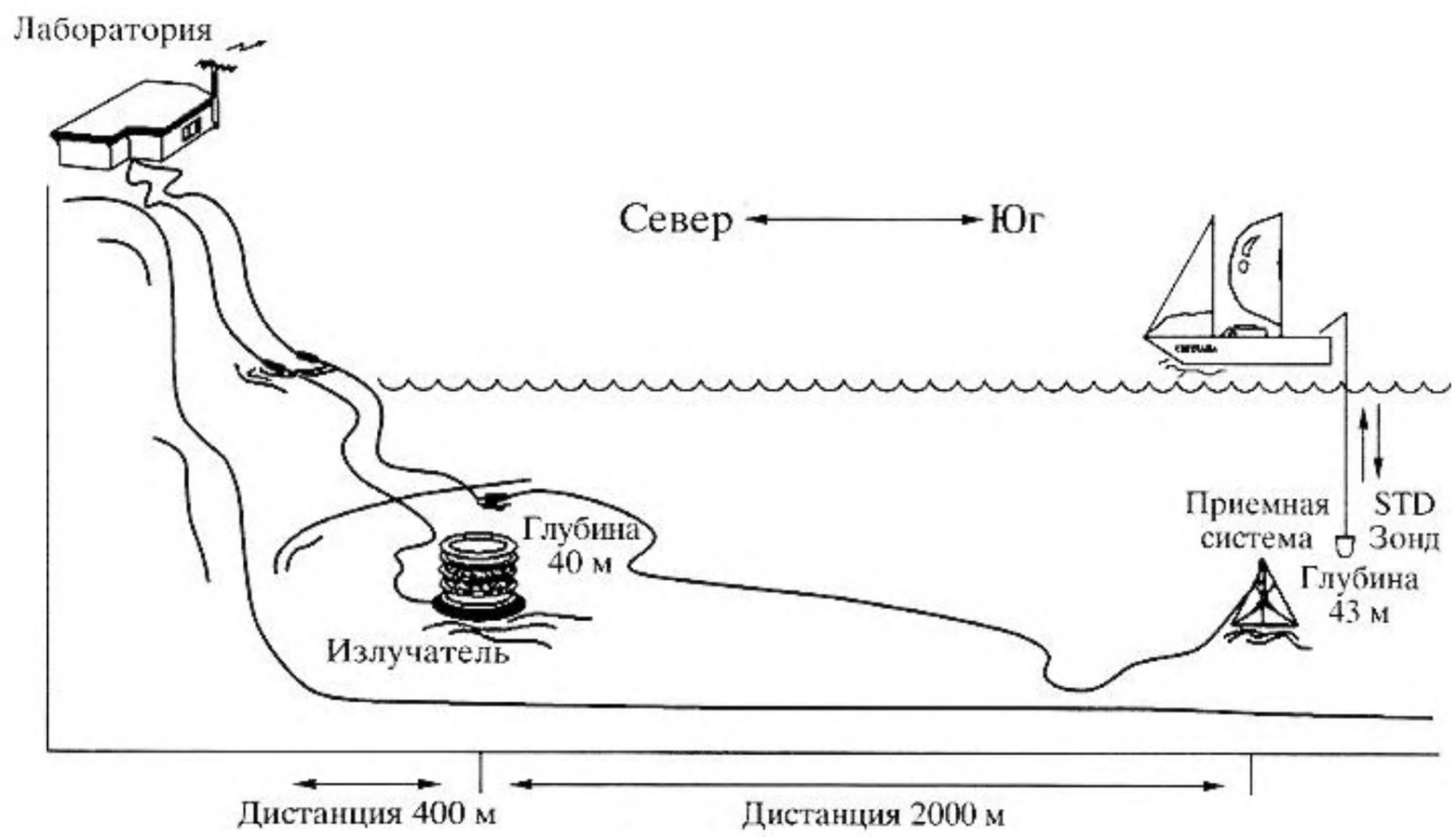

Рис. 1. Схема эксперимента.

ров (рис. 1). Трехкомпонентный векторный приемник и гидрофон были размещены вблизи дна на глубине 43 метра и на удалении от излучателя около 2 километров.

Методика обработки принятых сигналов заключалась в следующем. На выходе гидрофона и каждого канала векторного приемника вычислялась взаимная корреляционная функция излученного $S_0(t)$ и принятого $S(t)$ сигналов:

$$K_{ss0}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{(2\pi)^2}\int_{-\infty}^{\infty} H(\omega)G(\omega, \mathbf{r})e^{i\omega t}d\omega; \qquad (1)$$

где $H(\omega) = S_0(\omega)S^*(\omega)$, $S_0(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s_0(t)e^{-i\omega t}dt$ – спектр Фурье излученного сигнала; $S^*(\omega)$ – соответственно, комплексно сопряженный спектр, принятого сигнала; $G(\omega, \mathbf{r}) = \sum_{j=1}^{N} A_j(\mathbf{r})e^{-i\omega t_j(\mathbf{r})}$ – функция Грина; $t_j(\mathbf{r})$ и $A_j(\mathbf{r})$ – соответственно время распространения и амплитуда сигнала, распространяющегося по j-му лучу от источника до приемника, расположенного в точке $\mathbf{r}$; N – число лучей, приходящих на приемник.

Для каждого луча, по которому приходит акустическая энергия на полученной таким образом импульсной характеристике волновода по соотношению амплитуд в каналах определялись величины углов скольжения по формуле:

$$a = \operatorname{arctg}\frac{A_z}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}, \qquad (2)$$

где A_z, A_x, A_y – значения максимумов корреляционной функции соответственно в вертикальном и горизонтальных каналах.

В точке приема на время проведения исследований устанавливалась на якорь яхта, с которой осуществлялись ежечасные измерения вертикальных профилей температуры. Гидрологические условия характеризовались наличием приповерхностного изотермического слоя до глубины 15–20 метров, а затем понижением температуры до дна с градиентом $\Delta T/\Delta h \cong 6 \times 10^{-1}$ C°/м. С приходом приливного фронта отмечалось формирование придонного холодного слоя до глубины около 35 метров и увеличение отрицательного градиента. Результаты измерений в течение суток приведены на рис. 2а.

На рис. 2б и 2в приведены вариации времен приходов импульсов в течение суток, полученные на данной акустической трассе с приемного гидрофона и углов позднего, максимального по амплитуде, прихода, рассчитанных по данным с векторного приемника. Как видно, времена и углы направления позднего прихода акустических импульсов четко коррелируют с изменениями температуры в придонном слое. С заходом на акустическую трассу более теплых вод отмечается уменьшение времени и увеличение углов направления приходов. На угловой зависимости в период захода на трассу приливного фронта (с 9:00 до 19:00) фиксируются 2-х часовые колебания, что связано, по-видимому, с влиянием внутренних волн. На рис. 3а и 3б приведены два характерных фрагмента импульсной характеристики, измеренной с использованием векторного приемника в 21 час 30 мин и в 23 час 30 мин (на рис. 2б они отмечены извилистыми линиями).

Для импульсов, выделенных с достаточным превышением, удалось определить углы сколь-

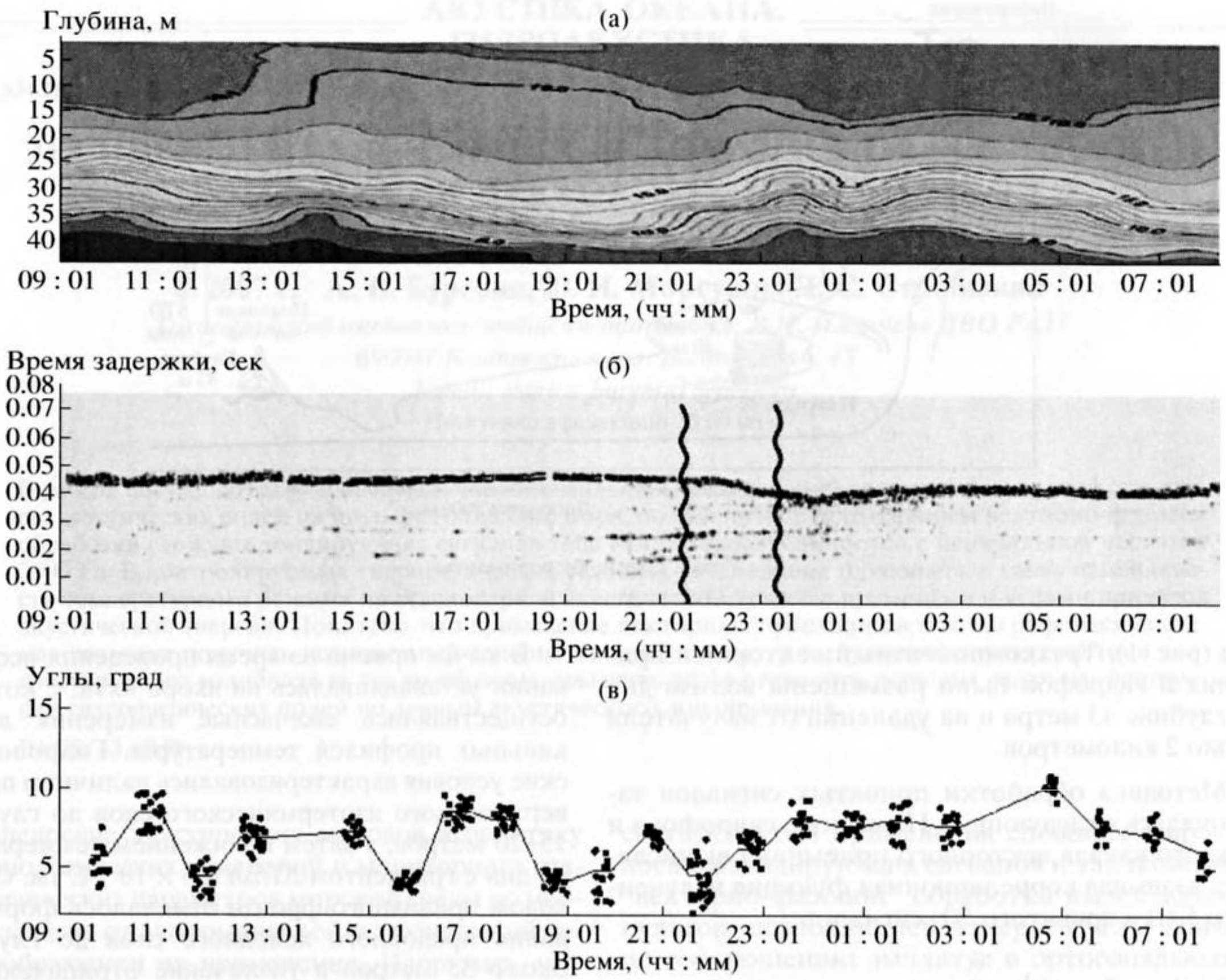

Рис. 2. Суточные изменения температуры (а), суточные вариации времен приходов (б), суточные вариации углов позднего прихода (в).

жения лучей, которые их формируют. Можно выделить три группы:

а) импульсы с максимальной амплитудой, сформированные лучами с углами скольжения 4–10 градусов, распространяющиеся в придонном слое холодной воды от 35 метров до дна с минимальными групповыми скоростями;

б) импульсы, сформированные лучами с углами скольжения 11–16 градусов, распространяющиеся в основном термоклине от 20 метров до дна;

в) импульсы, сформированные лучами с углами скольжения 20–30 градусов, распространяющиеся во всем слое воды. Интересным и важным является тот факт, что времена приходов этих лучей для данной гидрологии находятся между временами направлений приходов с малыми углами скольжения, и без векторного приемника идентифицировать их было бы сложно.

Таким образом, при решении обратных задач для термометрии или галинометрии морских акваторий, кроме вектора задержек времен по различным лучевым траекториям, связанного с вектором возмущений скорости звука (температуры, солености) [7, 8], появляется дополнительный независимый вектор углов направлений приходов акустической энергии. Это позволит оптимизировать процедуру разбивки диагностируемого волновода на слои и предварительно оценить знаки и величины градиентов реконструируемых параметров морской среды в этих слоях.

Суммируя изложенное выше, можно заключить, что с помощью разработанного способа и аппаратуры в условиях натурного эксперимента показана возможность определения углов направлений приходов акустической энергии по различным лучевым траекториям с использованием одиночной приемной системы в виде векторного приемника. Это открывает новые возможности применения акустических методов для мониторинга изменчивости подводного климата в мелководных районах Мирового океана с силь-

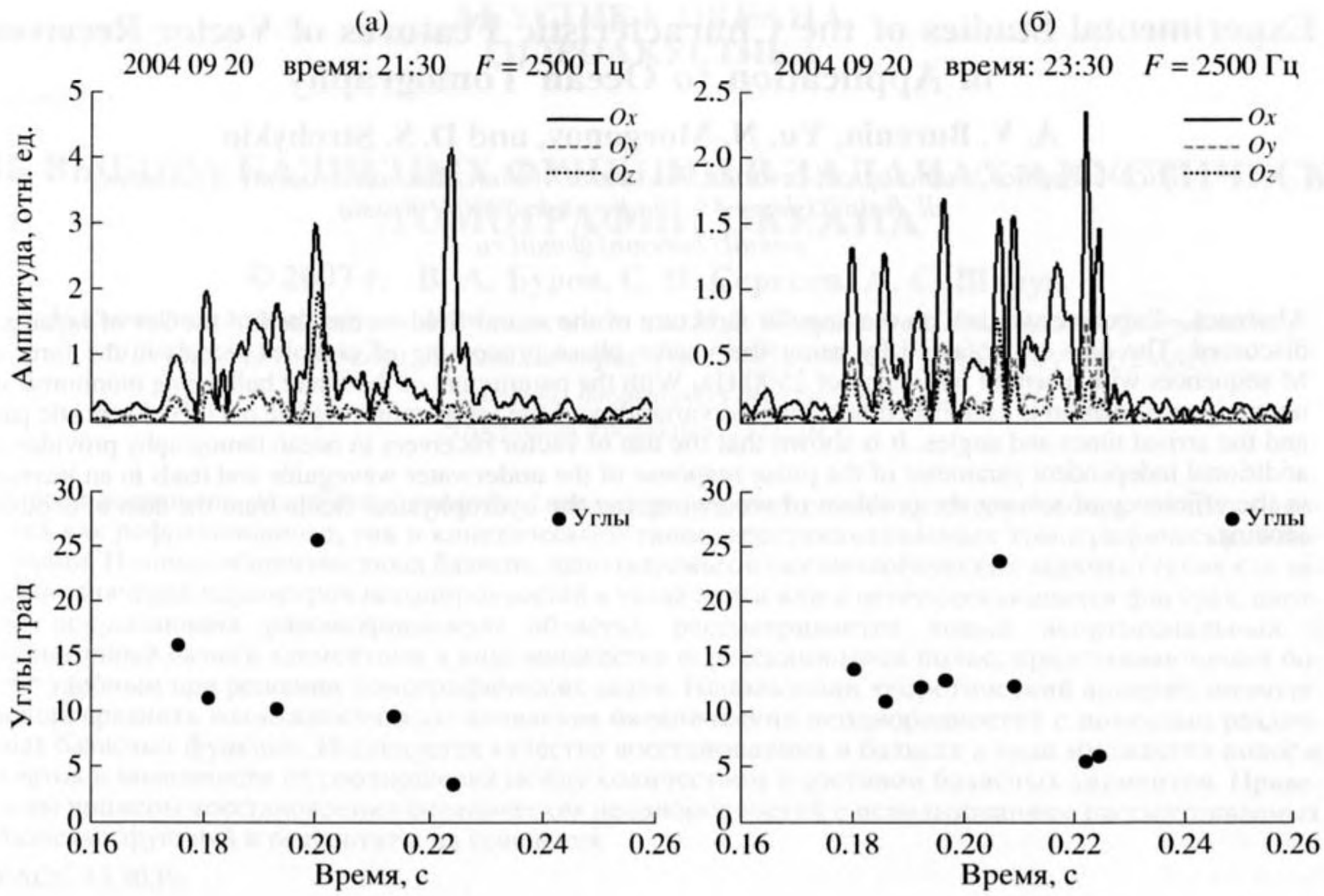

Рис. 3. Импульная характеристика волновода для времени суток: 21:30 (а) и 23:30 (б) и углы приходов разрешенных импульсов.

ными течениями и другими динамическими проявлениями. Применение векторных приемников в томографических схемах позволит получить независимый дополнительный параметр импульсной характеристики диагностируемого волновода и, таким образом, повысить эффективность решения прямых и обратных задач гидроакустики в таких практических приложениях, как томография неоднородностей морской среды, звукоподводная связь и телеметрия.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 03-05-65226 и 04-05-65253).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Годин О.А., Михин Д.Ю., Палмер Д.Р.* Мониторинг океанских течений в прибрежной зоне // Известия АН, Серия Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 1. С. 141–153.
2. *Акуличев В.А., Безответных В.В., Каменев С.И., Леонтьев А.П., Моргунов Ю.Н.* Акустические дистанционные измерения течений на шельфе Японского моря // Акуст. журн. 2004. Т. 50. С. 581–584.
3. *Акуличев В.А., Каменев С.И., Леонтьев А.П., Моргунов Ю.Н.* Акустическая томография на шельфе: методы, средства, перспективы // Доклады X школы-семинара акад. Л. М. Бреховских, совмещенной с XIV сессией Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2004. С. 187–192.
4. *Акуличев В.А., Безответных В.В., Каменев С.И., Кузьмин Е.В., Моргунов Ю.Н., Нужденко А.В.* Акустическая томография динамических процессов водной среды в шельфовой зоне Японского моря // ДАН. 2001. Т. 381. № 2. С. 243–246.
5. Патент РФ 2221261. Способ акустического зондирования океана // Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Моргунов Ю.Н., Каменев С.И., Нужденко А.В., Дзюба В.П. Заявлено 09.07.2002; опубликовано 10.01.2004.
6. *Акуличев В.А., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Каменев С.И., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А., Стробыкин Д.С.* Векторно-фазовые методы в акустической томографии океана // ДАН. 2006. Т. 406. № 1. С. 104–107.
7. *Rodriguez O.C., Jesus S.M.* Physical limitations of travel-time-based shallow water tomography // J. Acoust. Soc. Amer. 2000. V. 6. № 108. P. 2816–2822.
8. *Вировлянский А.Л.* Времена пробега сигналов вдоль хаотических лучей при дальнем распространении звука в океане // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 3. С. 300–341.

Experimental Studies of the Characteristic Features of Vector Receivers in Application to Ocean Tomography

A. V. Burenin, Yu. N. Morgunov, and D. S. Strobykin

Ilyichev Pacific Oceanological Institute, Far East Division, Russian Academy of Sciences, ul. Balti@iskaya 43, Vladivostok, 690041 Russia

e-mail: burenin1@mail.ru

Abstract—Experimental data on the angular structure of the sound field on the shelf of the Sea of Japan are discussed. The data are obtained by using the vector–phase processing of complex signals in the form of M-sequences with a central frequency of 2500 Hz. With the parameters of the water bulk being monitored, an unambiguous relation is established between the variability of the temperature regime on a fixed acoustic path and the arrival times and angles. It is shown that the use of vector receivers in ocean tomography provides an additional independent parameter of the pulse response of the underwater waveguide and leads to an increase in the efficiency of solving the problem of reconstructing the hydrophysical fields from the data of acoustic sensing.