АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2002, том 48, № 1, с. 5–11

УДК 534.26

АКУСТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ МОРЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ

© 2002 г. В. А. Акуличев, В. В. Безответных, С. И. Каменев, Е. В. Кузьмин, Ю. Н. Моргунов, А. В. Нужденко

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

Поступила в редакцию 04.04.2001 г.

Обсуждаются результаты экспериментальных исследований, касающиеся применения одиночных приемных и излучающих систем для решения задач акустической томографии динамических процессов в мелком море. В экспериментах использовались сложные фазоманипулированные сигналы в вариантах трансмиссионной томографии и встречного зондирования. Приведены оригинальные результаты, полученные авторами в 1990–2000 годах в шельфовой зоне Японского моря вблизи полуострова Гамова в районе расположения акустико-гидрофизического полигона Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН. Показана возможность применения акустических совмещенных приемоизлучающих систем (трансиверов) для мониторинга полей течений и температуры.

Акустическая томография широко признана в качестве перспективного метода мониторинга течений и поля температур в океане. Реализация этого метода в прибрежных районах связана с большими сложностями. В настоящей статье на примере экспериментальных результатов, полученных в шельфе Японского моря, рассматриваются некоторые пути решения проблем акустической томографии морской среды в мелководных акваториях.

Японское море является важным объектом исследований закономерностей формирования климата, вентилирования придонных слоев, миграции гидробионтов, распространения и накопления в донных осадках загрязняющих веществ и многих других процессов антропогенного и естественного воздействия на окружающую среду в азиатско-тихоокеанском регионе. Особый интерес при решении этих задач представляет изучение глобального изменения температурных режимов и динамики водных масс. Встречное движение холодного Приморского и теплого Цусимского течений приводит к образованию фронтального раздела и множества вихревых систем. Существенно усложняют эту картину динамические процессы в прибрежных акваториях моря из-за влияния топографии дна и приливных явлений. В подобных условиях эффективность исследований контактными методами, традиционно применяющимися в океанологии, зависит от технической возможности разместить измерительные приборы на расстояниях, не превышающих радиус пространственной корреляции изучаемых процессов и проводить длительные наблюдения. Соображения технической и экономической целесообразности для реализации таких измерительных схем потребовали привлечения в практику океанологических исследований новых технологий, базирующихся на методах акустической томографии. Техническая реализация этих методов зачастую также связана с применением очень сложных и дорогостоящих систем. Например, для измерения и мониторинга полей течений и температур в работах [1, 2] предлагается использовать вертикальные антенны из акустических трансиверов (совмещенных приемников и излучателей звука) и гидрофонов. Широкое применение подобных систем практически неосуществимо в мелководных районах с интенсивным судоходством и большими скоростями течений. Применение же донных одиночных систем излучения и приема зондирующих сигналов, по мнению многих авторов [2–4], может привести к ошибкам из-за проблем разрешения во времени лучевых приходов акустической энергии и их идентификации. Но преимущества использования таких систем настолько очевидны и выгодны для практики, что, на наш взгляд, целесообразны дальнейшие углубленные исследования в интересах разработки простых и эффективных приборов для акустического мониторинга морской среды. В настоящей работе приводятся экспериментальные результаты исследований возможности применения донных одиночных систем для решения задач акустической томографии путем использования сложных зондирующих сигналов.

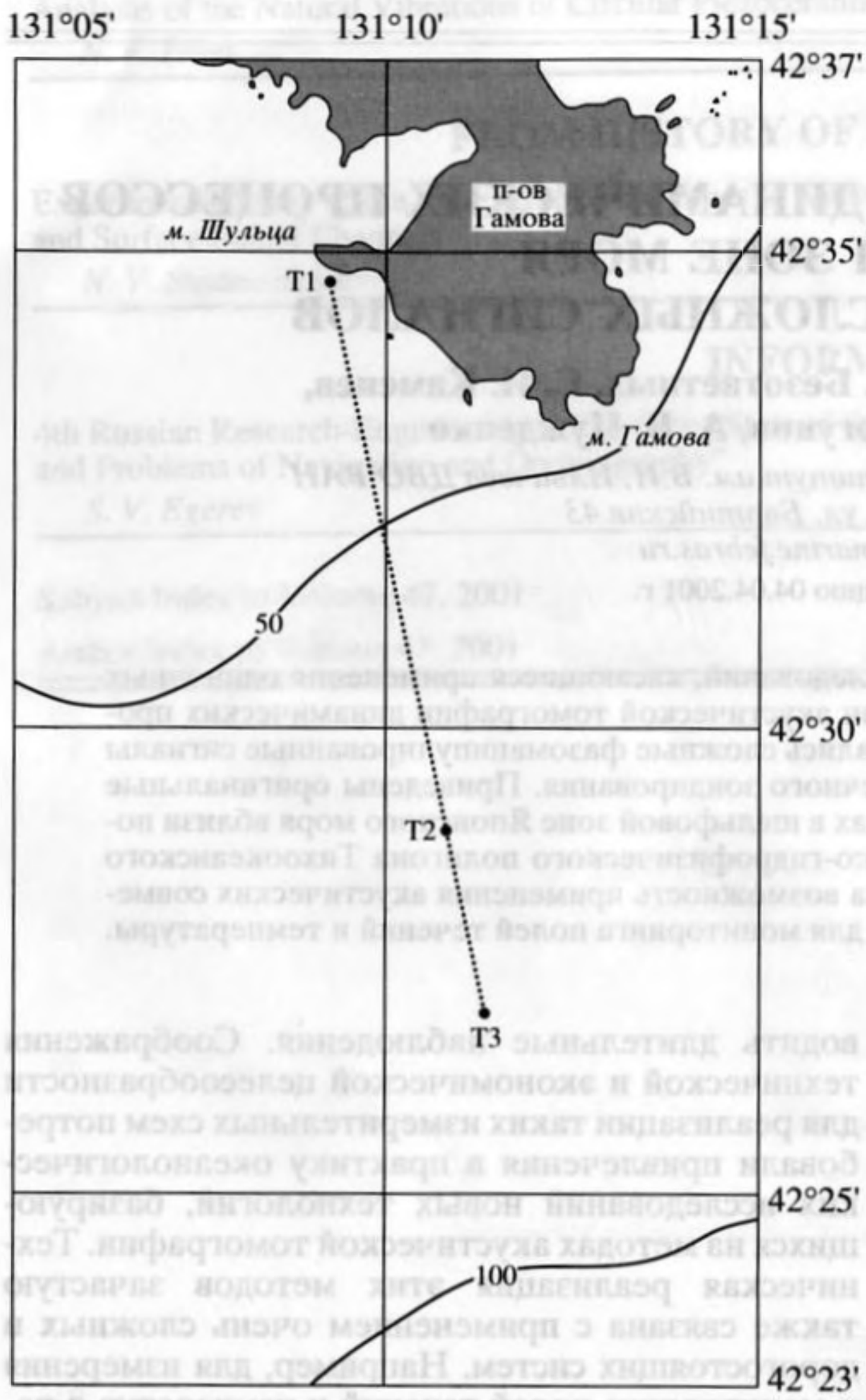

Рис. 1. Район проведения экспериментов, акустические трассы и размещение приемоизлучающих элементов: T1 – трансивер 1, T2 – трансивер 2, T3 – одиночный гидрофон (радиогидроакустический буй).

Для отработки методических и технических аспектов построения томографических систем на морской базе ТОИ ДВО РАН в прибрежной зоне Японского моря у полуострова Гамова был оборудован акустогидрофизический полигон, который состоит из стационарных, устанавливаемых на кабеле, и автономных, размещаемых в любой точке полигона, приемных и излучающих систем, с центром управления, сбора и анализа данных в береговой лаборатории [5].

В качестве зондирующих сигналов использовались фазоманипулированные сигналы типа М-последовательности с числом символов в последовательности, равном 511, с характеристическим полиномом $X^9 + X^4 + 1$ и длиной символа, равной 4-м или 8-ми периодам несущей частоты. Фазовый сдвиг φ устанавливался равным нулю для символа "1" и φ = 174°934 для символа "0", чем обеспечивалось сглаживание огибающей амплитудного спектра сигнала и частичное подавление боковых лепестков корреляционной функции. В качестве приемных систем использовались радиогидроакустические буи с гидрофонами, которые устанавливались в различных точках полигона в 1 метре от дна. Принятый сигнал подвергался взаимнокорреляционной обработке с излученным сигналом. Максимумы корреляционной функции определяют времена приходов групп лучей или мод, распространяющихся по различным траекториям, в точку приема. На данном этапе исследований не ставилось целью решение обратной задачи реконструкции гидрофизических параметров морской среды каким-либо из известных теоретических методов инверсии. Были произведены оценочные расчеты усредненных значений скорости звука и скорости потока для оценки чувствительности применяемых методов.

При встречном зондировании измерялись времена прихода n-й группы лучей (n-й моды) t_n^- и t_n^+, соответствующие распространению акустических сигналов против потока и вдоль него. Далее находились сумма времен приходов $S_n = t_n^+ + t_n^-$ и их разность $\Delta t_n = t_n^- - t_n^+$, и окончательно определялись компоненты скорости потока $V_n = \Delta t_n c_n^2/2r$ в направлении трассы длиной r, связанные с n-й группой лучей (модой) и скоростью распространения этой группы $c_n = 2r/S_n$. При этом предполагалось, что имеет место горизонтальная однородность поля скоростей V_n, c_n и то, что $V_n \ll c_n$. В основе использованных соотношений лежит обобщение принципа взаимности [6].

В процессе проведения экспериментов, с октября 1999 года по ноябрь 2000 года, варьировались глубины постановок трансиверов, приемников и излучателей, дистанции между ними. Исследовались характеристики приливных внутренних волн, течений, температурных режимов в шельфе для технической апробации и адаптации к условиям Японского моря различных методов измерений полей температур и течений. В итоге был получен представительный массив экспериментальных данных (около 400 часов непрерывных записей).

Ниже приводятся результаты двух экспериментов, направленных на исследование возможности применения одиночных донных систем для решения задач акустического мониторинга полей течений и температуры в мелком море. На рис. 1 и 2 изображены, соответственно, карта и схема проведения обсуждаемых экспериментов.

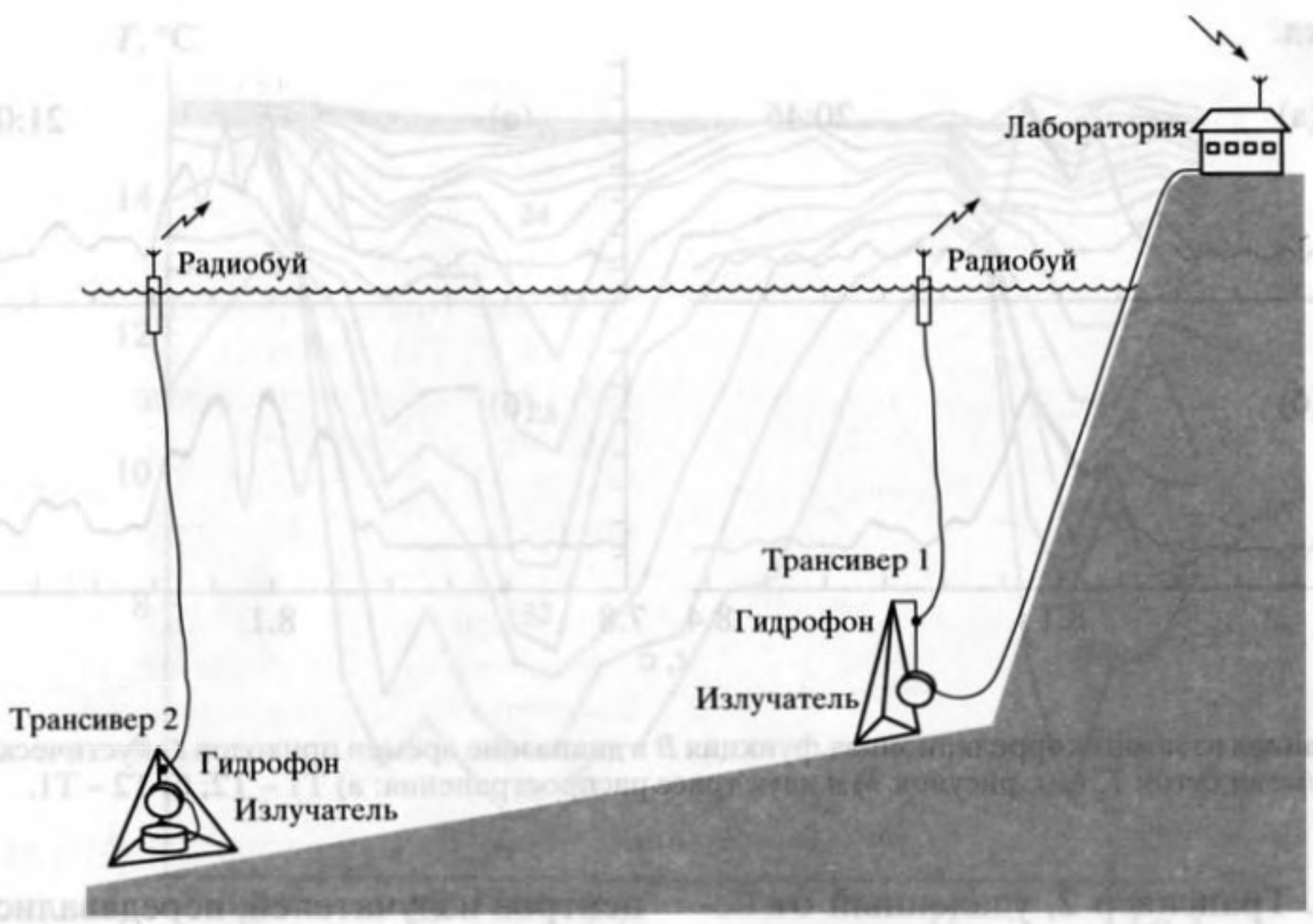

Рис. 2. Схема размещения технических средств во время проведения экспериментов.

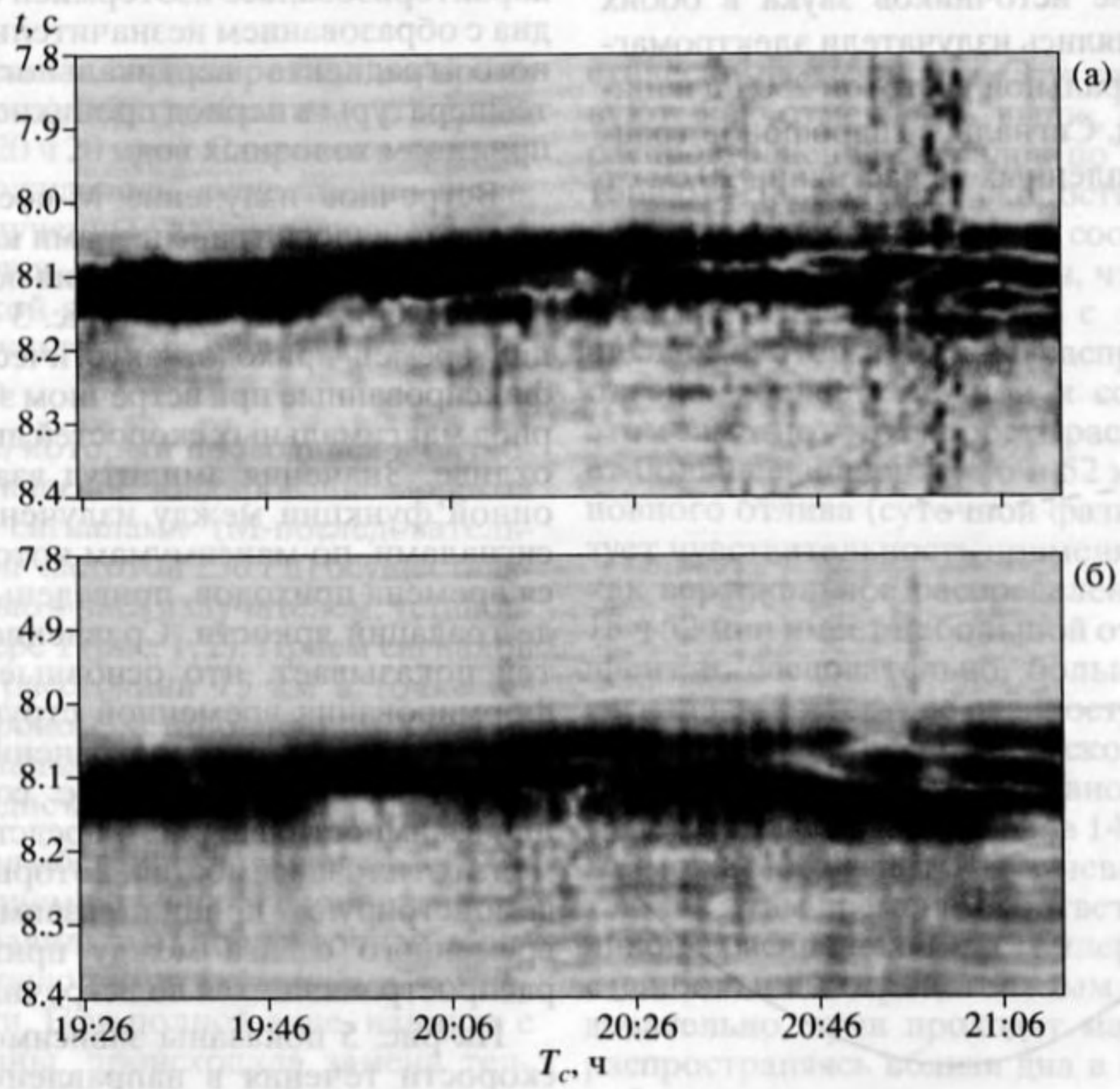

Рис. 3. Вариации времен приходов t акустических сигналов в зависимости от времени суток T_c: а – трасса Т1 – Т2; б – трасса Т2 – Т1.

Вначале приведем описание и результаты эксперимента по измерению скорости потока воды методом встречного зондирования, который был осуществлен в октябре 2000 года.

Излучатель акустического трансивера 1, удаленного от берега на 150 м и размещенного в 1 м от дна при глубине моря 27 м (точка Т1), обеспечивался энергопитанием и управлялся по кабелю с

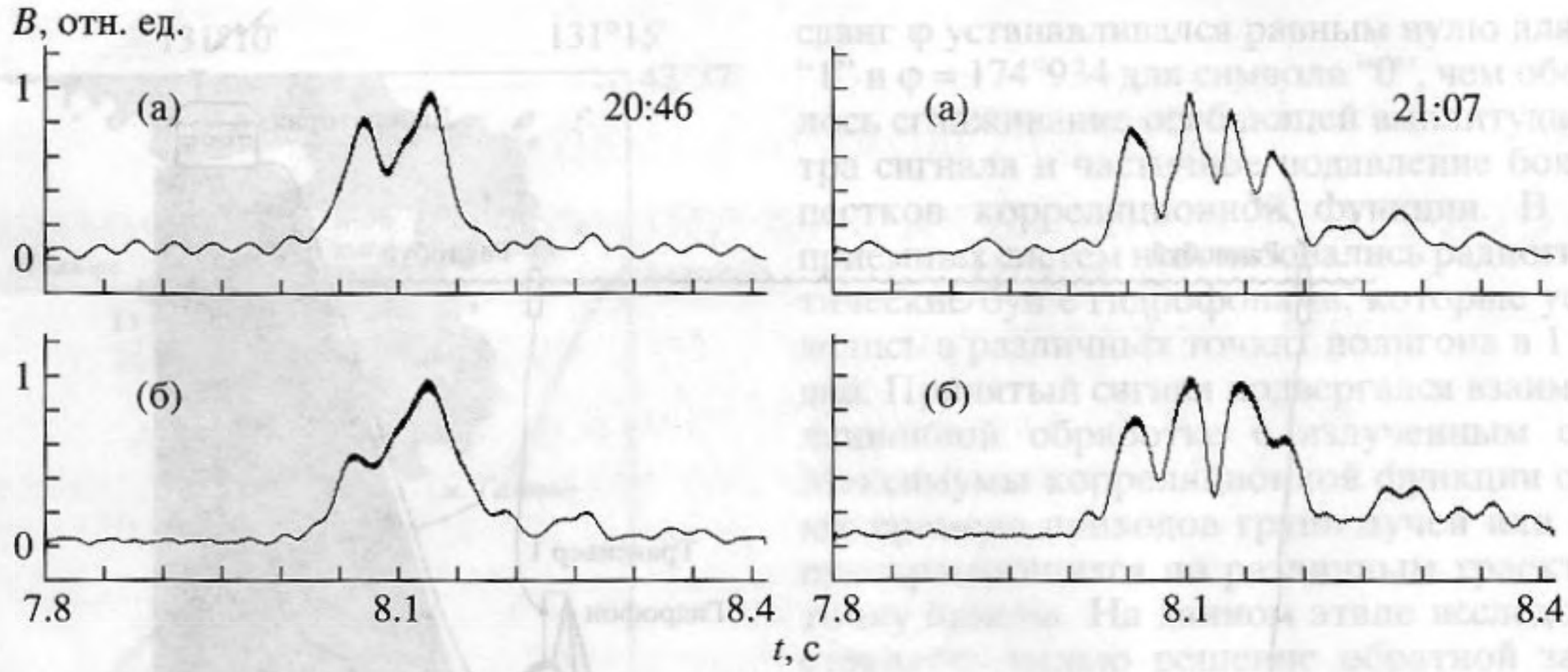

Рис. 4. Нормированная взаимно-корреляционная функция B в диапазоне времен приходов t акустических сигналов для двух значений времени суток T_c (см. рисунок 3) и двух трасс распространения: а) Т1 – Т2; б) Т2 – Т1.

берегового поста. Трансивер 2, удаленный от берега на 12 км и размещенный в 1 м от дна при глубине моря 60 м (точка Т2), работал на автономном питании. В качестве источников звука в обоих трансиверах применялись излучатели электромагнитного типа с центральной частотой 250 Гц и шириной полосы 60 Гц. Сигналы с гидрофонов трансиверов 1 и 2, закрепленных на растоянии 20 см от центров излучателей, передавались по радиоканалу в центр сбора и анализа информации.

Гидрологическая обстановка в районе работ характеризовалась изотермией от поверхности до дна с образованием незначительного отрицательного градиента вертикального распределения температуры в период проникновения на шельф с приливом холодных вод.

Встречное излучение М-последовательностей осуществлялось трансиверами каждую минуту, но со сдвигом 30 с для устранения помехи собственного излучения приему. На рис. 3 приведены вариации времен приходов акустических сигналов, зафиксированные при встречном зондировании в период максимальных скоростей движения воды при отливе. Значения амплитуд взаимно-корреляционной функции между излученным и принятым сигналами, по максимумам которой определяются времена приходов, приведены на рисунке в виде градаций яркости. Сравнение двух зависимостей показывает, что основные закономерности формирования временной структуры акустического поля при распространении по течению и против него идентичны, т.е. соблюдается принцип взаимности. На рис. 4 представлены два фрагмента этих зависимостей, которые более наглядно демонстрируют принцип взаимности и наличие временнóго сдвига между приходами сигналов, распространявшихся во встречных направлениях.

На рис. 5 показаны зависимости компоненты скорости течения в направлении распространения сигналов и высоты прилива от времени. Скорости были рассчитаны по приведенным выше формулам для двух приходов сигналов, первый из которых сформирован лучами, распространяющимися во всем водном слое, а второй – в придонном слое с более холодной водой. Положительные значения скорости соответствуют направлению потока воды к берегу, а отрицательные – от берега.

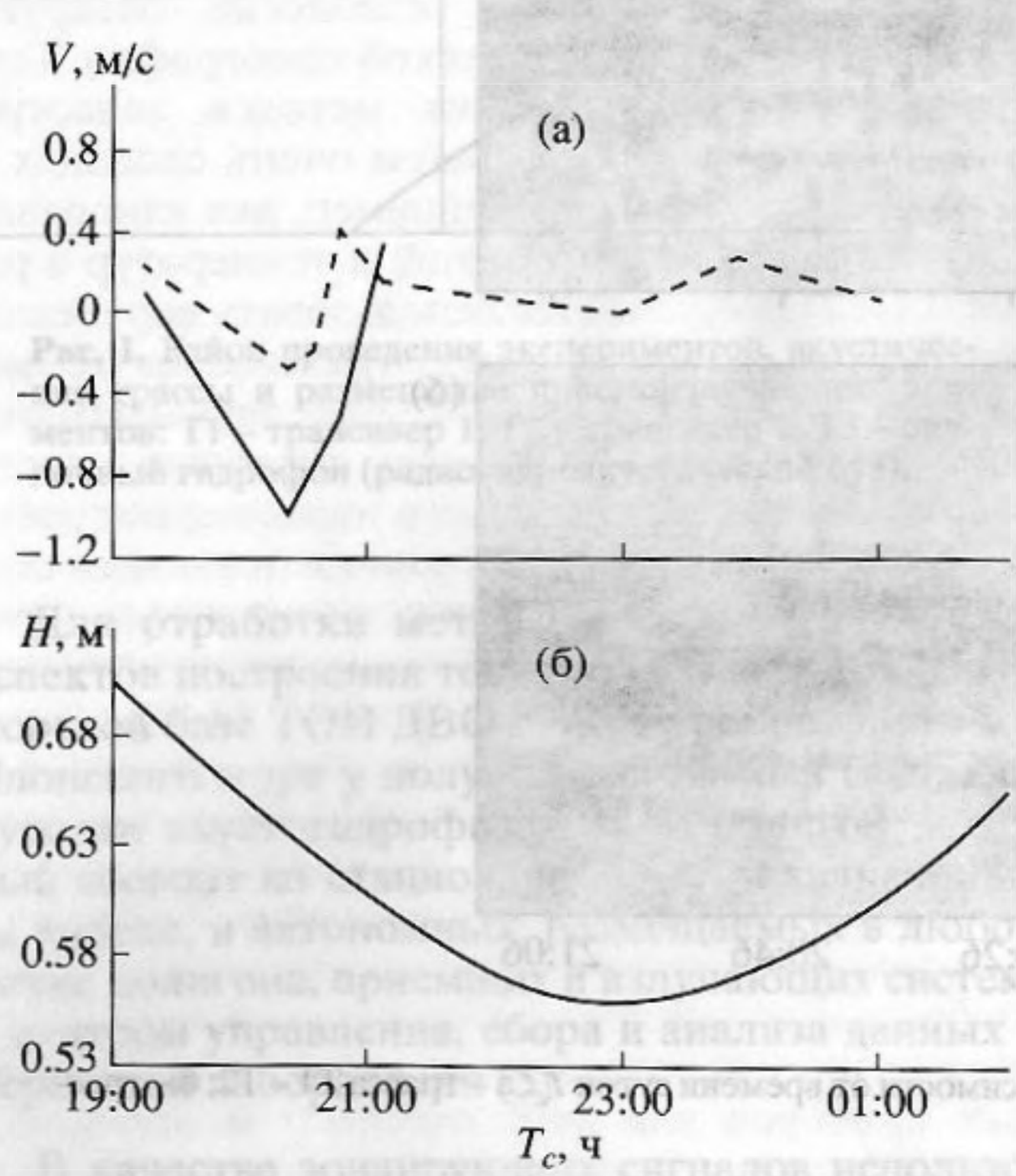

Рис. 5. Зависимость от времени суток T_c: а – компоненты скорости течения V в направлении распространения акустических сигналов (сплошная линия – для всего волновода, пунктир – для придонного слоя); б – высоты прилива H.

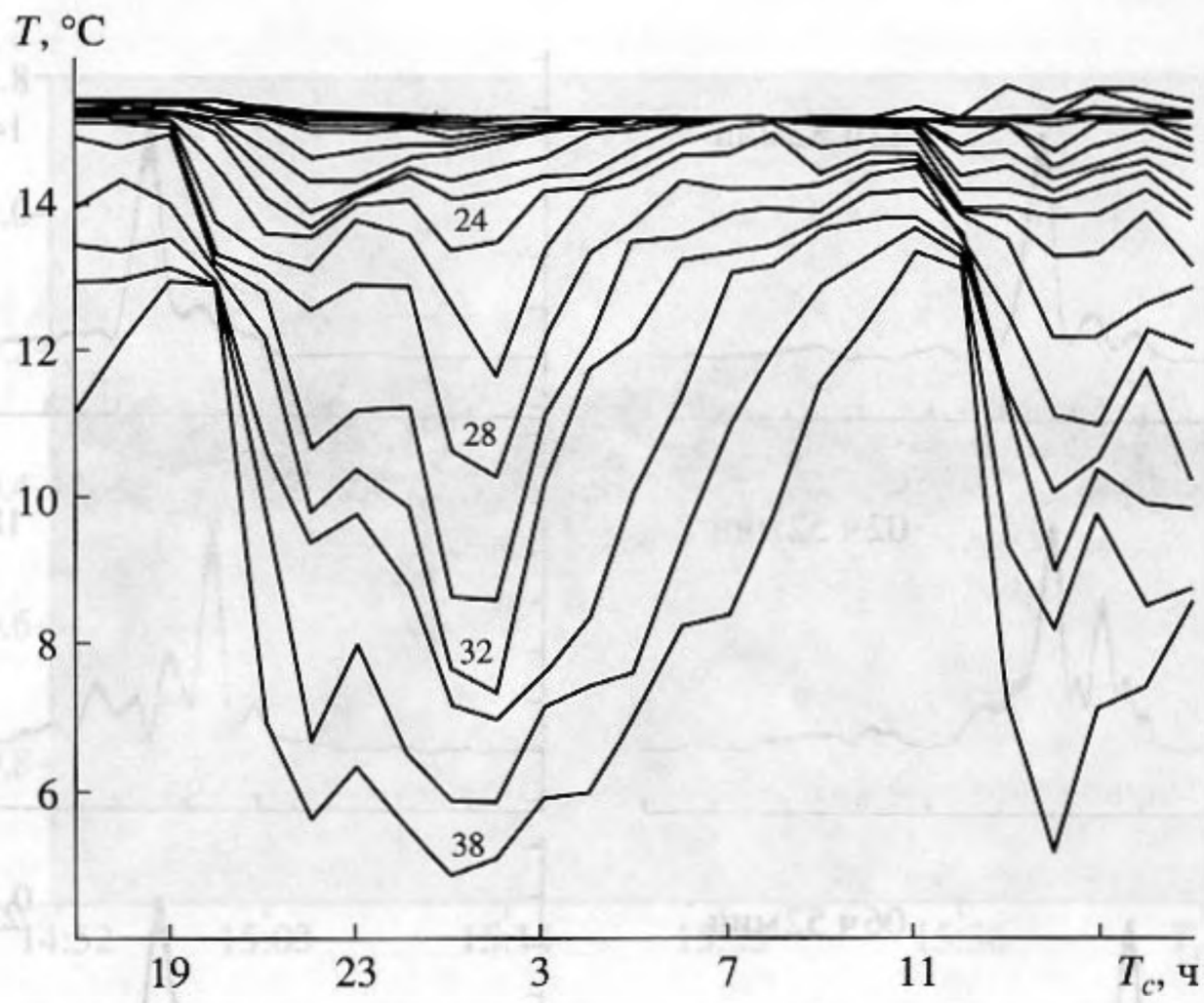

Рис. 6. Вариации температуры воды T°C от времени суток T_c. Параметры кривых – глубины в метрах.

Минимальная скорость зафиксирована во время малой воды (23 часа), максимальная – в период развитого отлива (20 ч 20 мин). Скорость в придонных слоях, как и ожидалось, существенно ниже, чем в верхних. Полученные данные удовлетворительно вписываются в картину динамических процессов в морской среде в этом районе моря, полученную в результате многолетних исследований океанологов.

В эксперименте, который проводился в октябре 1999 года, акустическое зондирование морской среды сложными сигналами (М-последовательность с центральной частотой 250 Гц) осуществлялось с дискретностью 4 часа излучателем, установленном на трансивере 1 (рис. 1, 2). Прием сигналов обеспечивался на расстоянии 15 км в точке R3 одиночным гидрофоном, установленном в 1 м от дна; принятые сигналы ретранслировались на береговой пост по радиоканалу.

Гидрологическая обстановка на шельфе в районе размещения приемных и излучающих систем определялась неправильным полусуточным приливом и соответствующими вариациями температуры и солености. При полной воде, начиная с 16-метровой глубины, происходила замена теплых прибрежных вод холодными и более солеными морскими водами. При этом колебания температуры в нижних слоях достигали 10 градусов. На рис. 6 представлена зависимость температуры воды от времени на различных глубинах.

На рис. 7 приведены суточные вариации нормированной взаимно-корреляционной функции между излученными и принятыми в точке Т3 акустическими сигналами. Эти вариации соответствуют, как отмечалось выше, вариациям времен распространения сигналов по различным траекториям. Наибольшая скорость распространения основной энергии сигнала соответствует временам 6 ч 52 мин и 18 ч 52 мин, что совпадает с временами отливов, то есть с установлением на шельфе изотермического распределения в связи с оттоком более холодной и соленой воды. При этом заметно, что скорость распространения имеет большее значение в 6 ч 52 мин – в момент основного отлива (суточной фазы). Это характеризует чувствительность применяемого метода, так как вертикальное распределение температуры в 18 ч 52 мин имеет небольшой отрицательный градиент и, следовательно, большая часть энергии сигнала в этом случае распространяется в придонном слое воды с меньшей скоростью звука. Самые поздние приходы основной энергии сигнала отмечаются в 22 ч 52 мин и в 14 ч 52 мин. Это также можно объяснить из лучевых представлений, так как этим временам соответствуют фазы приливов с распределением температуры по глубине с наибольшим отрицательным градиентом и, следовательно, лучи проходят максимальный путь, распространяясь вблизи дна в слоях с минимальной скоростью звука.

Для выяснения влияния на распространение звука более тонких эффектов с меньшими временными масштабами, было осуществлено зондирование с периодом повторения 30 с в течение часа. Рассчитанные взаимно-корреляционные функции и времена приходов сигналов приведены на рис. 8. На полученной таким образом временной зависи-

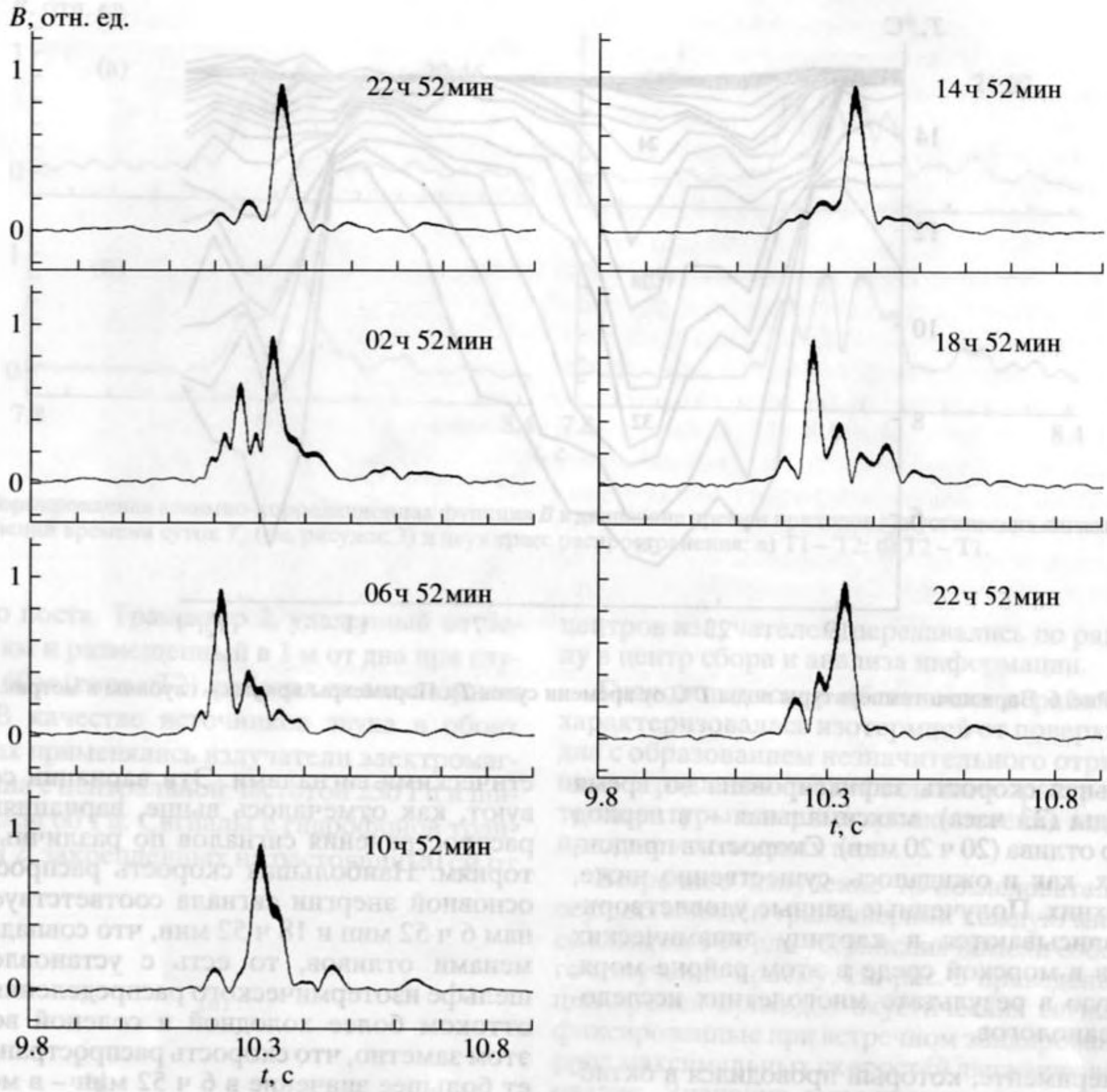

Рис. 7. Вариации нормированной взаимно-корреляционной функции *B* между излученными и принятыми в точке Т3 акустическими сигналами в диапазоне времен приходов *t* в течение суток.

мости отчетливо видны проявления волнового процесса с периодом около 20 мин. Можно предположить, что в данном случае на формирование акустического поля оказывают влияние внутренние волны, так как экспериментальные измерения периодов внутренних волн в этом же районе показали те же значения [7, 8].

Таким образом, выявленные закономерности формирования акустических полей в зависимости от динамики гидрофизических процессов при зондировании морской среды сложными сигналами характеризуют перспективность описанных методов и технических средств применительно к решению обратных задач гидроакустики в прибрежных районах. Времена приходов групп лучей или мод зависят от вертикального и горизонтального распределения скорости звука в водной среде, определяемой распределением температуры и солености, а также от направления и величины скорости течения. Среднеквадратичная погрешность определения временных интервалов при обработке экспериментальных данных не превышает 2 мс, что обеспечивает возможность измерения температуры воды с точностью до 1°С и скорости течения с точностью до 0.1 м/с. Наличие нескольких приходов групп лучей (от 2-х до 4-х в наших экспериментах), прошедших в различных слоях волновода, позволяет оценивать поля температур и течений в вертикальной плоскости.

Простота, мобильность и низкая стоимость разработанной техники позволяют планировать ее применение для решения прикладных задач уже в настоящее время. Предлагаемые томографические системы могут существенно расширить функциональные возможности внедряемой в последние годы в США и Японии системы всплыва-

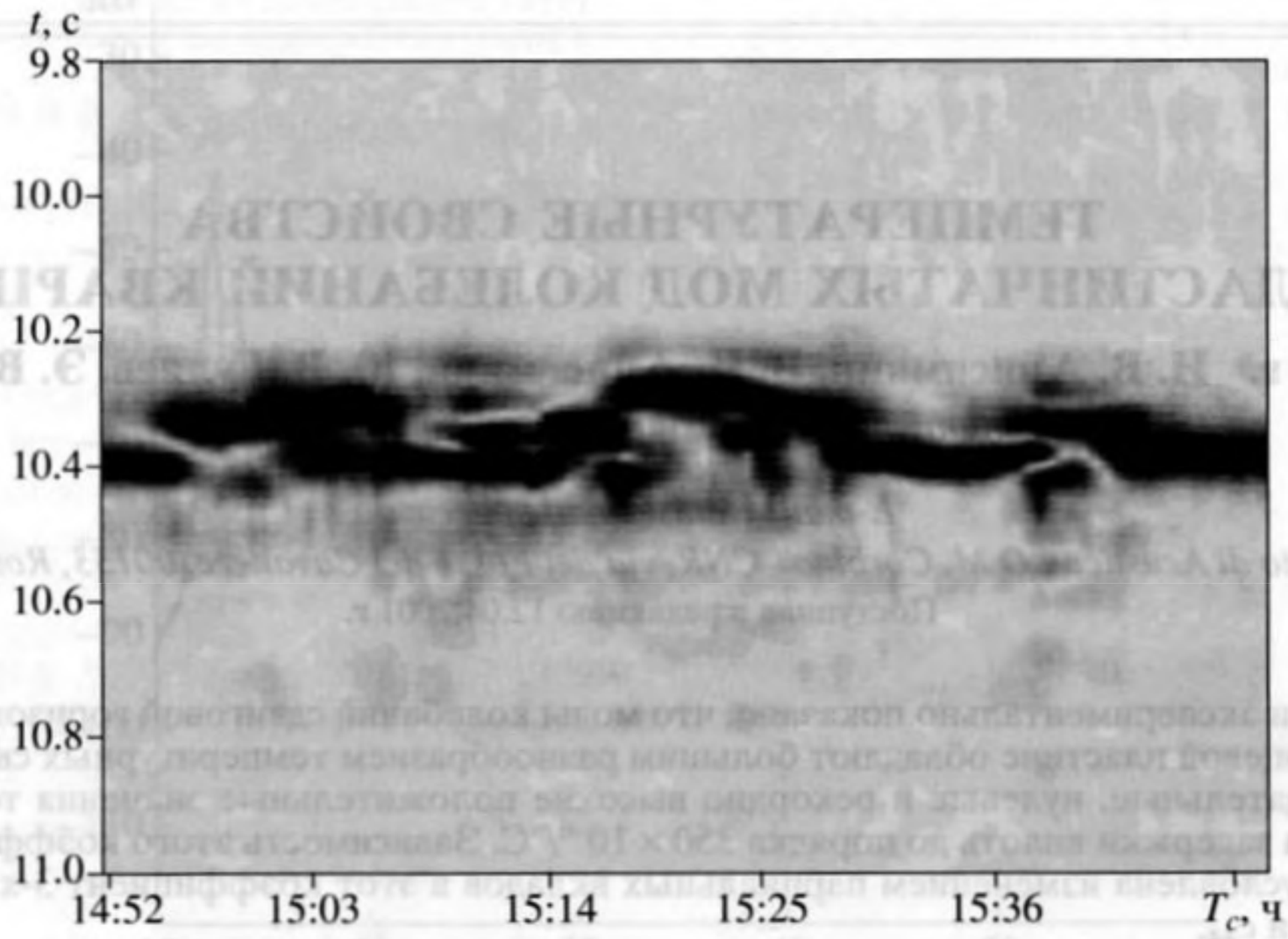

Рис. 8. Вариации времен приходов t акустических сигналов от времени суток T_c.

ющих дрейфующих океанографических буев (программа ARGO – Array Real-Time Geostrophic Oceanography). По-видимому, это особенно целесообразно в проливных зонах, на мелководном шельфе и в районах со сложной ледовой обстановкой.

Работа выполнена при поддержке международного проекта РФФИ-ГФЕН КНР № 99-05-39140 и в рамках американо-российского проекта JESAEX (The Japan/East Sea Acoustics Experiment).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гаврилов А.Н.* Современное состояние и перспективы акустической термометрии океана // Доклады VIII школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. "Акустика океана". ГЕОС. Москва. 1999. С. 7–13.
2. *Годин О.А., Михин Д.Ю., Палмер Д.Р.* Мониторинг океанских течений в прибрежной зоне // Известия АН. Сер. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 1. С. 141–153.
3. *DeFerrari H.A., Nguyen H.B.* Acoustic reciprocal transmission experiments, Florida Straits // J. Acoust. Soc. Amer. 1986. V. 79. P. 299–315.
4. *Chester D.B., Malonotte-Rizzoli P., DeFerrari H.A.* Acoustic tomography in the Straits of Florida // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 7023–7048.
5. *Акуличев В.А., Безответных В.В., Каменев С.И. и др.* Акустогидрофизический комплекс для томографических исследований морской среды // Приборы и техника эксперимента. 2000. № 6. С. 112–115.
6. *Лямшев Л.М.* О некоторых интегральных соотношениях в акустике движущейся среды // Доклады АН СССР. 1961. Т. 138. № 3. С. 575–578.
7. *Серебряный А.Н.* Долгоживущая инверсия температуры и внутренние волны на шельфе // Океанология. 1995. Т. 35. № 4. С. 497–504.
8. *Akulichev V.A., Bezotvetnykh V.V., Kamenev S.I. et al.* Acoustic Tomography for Monitoring of the Japan Sea // Proc. of the Seven Western Pacific Regional Acoustics Conference (WESTPRAC VII). Kumamoto, Japan. 2000. V. 2. P. 1159–1163.

Acoustic Tomography of Dynamic Processes in a Sea Shelf Zone with the Use of Complex Signals

V. A. Akulichev, V. V. Bezotvetnykh, S. I. Kamenev, E. V. Kuz'min, Yu. N. Morgunov, and A.V. Nuzhdenko

Abstract—Experimental data are presented on the use of single receiving and transmitting systems in acoustic tomography of dynamic processes in a shallow sea. The experiments are based on the use of the transmission tomography and opposite-direction sounding with complex phase-manipulated signals. The original data are those obtained by the authors in 1990–2000 on the shelf of the Sea of Japan near the Gamov Peninsular, in the vicinity of the acoustical-hydrophysical experimental site of the Pacific Institute of Oceanology. A possibility of using combined transmitting–receiving systems (transceivers) for monitoring the temperature and the fields of currents in the ocean is demonstrated.