

УДК 551.463.21

## АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦЫ ФРОНТАЛЬНОЙ ЗОНЫ В ОКЕАНЕ

© 1998 г. А. В. Микрюков, О. Е. Попов

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 25.04.97 г.

На основе результатов, полученных при проведении эксперимента во фронтальной зоне Гольфстрима, предложен простой и достаточно надежный метод определения границ мезомасштабных неоднородностей в океане. Метод основан на анализе изменчивости временной структуры импульсных акустических сигналов, отраженных от дна.

Акустические методы контроля за океанской средой по мере своего развития и совершенствования становятся средством, позволяющим существенным образом дополнить, а в ряде случаев и расширить представление о физических процессах в океане, которое еще до недавних пор мы получали лишь с помощью традиционных океанографических методов [1, 2]. Наиболее актуально необходимость в появлении новых акустических методов возникает при решении задач, связанных со сбором информации о динамических характеристиках океана в районах, где последние подвержены значительным пространственно-временным изменениям.

Ниже, на основании результатов проведенного в сентябре 1989 г. акустического эксперимента по распространению звука через фронтальную зону (ФЗ) Гольфстрима, будет обсуждаться простой и достаточно надежный метод определения местоположения границы ФЗ при пересечении ее акустической трассой.

Так называемый северный или левый край Гольфстрима – резкая граница между теплыми, высокосолеными водами Саргассова моря и более холодными и более пресными склоновыми водами – представляет собой один из ярких примеров неустойчивости динамических характеристик, имеющей место в океане. Параметры данной ФЗ (положение, ширина, углы наклона фронтальных разделов, профили горизонтальных градиентов) могут претерпевать здесь значительные изменения даже в течение суток. Тем не менее, даже определение границы ФЗ, осуществляемое, как правило, с помощью буксируемых на различных горизонтах термодатчиков, является настолько времяземкой и дорогостоящей операцией, что не может выполняться достаточно часто. В связи с этим в последнее время граница ФЗ оценивается с помощью спутниковых данных по ИСЗ-ИК-радиометрии, фиксирующих резкое из-

менение поверхностной температуры слева от “теплого ядра” Гольфстрима. Однако сопоставление результатов, полученных с помощью двух методов оценки положения границы ФЗ, указывает на то, что резкое изменение температуры на поверхности (приповерхностный фронт) может иногда совпадать, а иногда и не совпадать с границей подповерхностного фронта Гольфстрима [3]. В этой связи было бы полезно иметь в распоряжении простой и оперативный метод надежного контроля за положением границы ФЗ именно в подводной ее части.

Карта района работ с нанесенной на нее трассой проведения акустического эксперимента представлена на рис. 1. Приемное судно с тремя одиночными гидрофонами, опущенными на глубины 330, 600 и 1200 м, лежало в дрейфе в начальной точке трассы (значок \* на рисунке) северо-западнее ФЗ. Излучающее судно, двигаясь со скоростью ~30 км/ч, производило через каждые 2.5 км подрывы зарядов весом 2.8 кг на глубине 290 м. Всего на трассе протяженностью 120 км было подорвано 48 зарядов. Глубина океана плавно менялась вдоль трассы от 4800 м в точке приема до 5050 м в конечной точке трассы. На основе многолетних данных и анализа принимаемых на борту судна карт поверхностной температуры предполагалось, что конечная точка трассы будет располагаться непосредственно над областью “теплого ядра” Гольфстрима. Выполненные перед началом, в ходе его и по окончании опыта измерения профилей скорости звука  $c(z)$  на ряде станций вдоль трассы (положения станций и их номера отмечены на рисунке кружками и цифрами, а полученные профили  $c(z)$  приведены на врезке в рисунок) подтвердили в общих чертах верность сделанного предположения. Профили  $c(z)$  станций 1 и 2 характерны для склоновых вод, профиль  $c(z)$  станции 6 – для теплых вод Гольф-

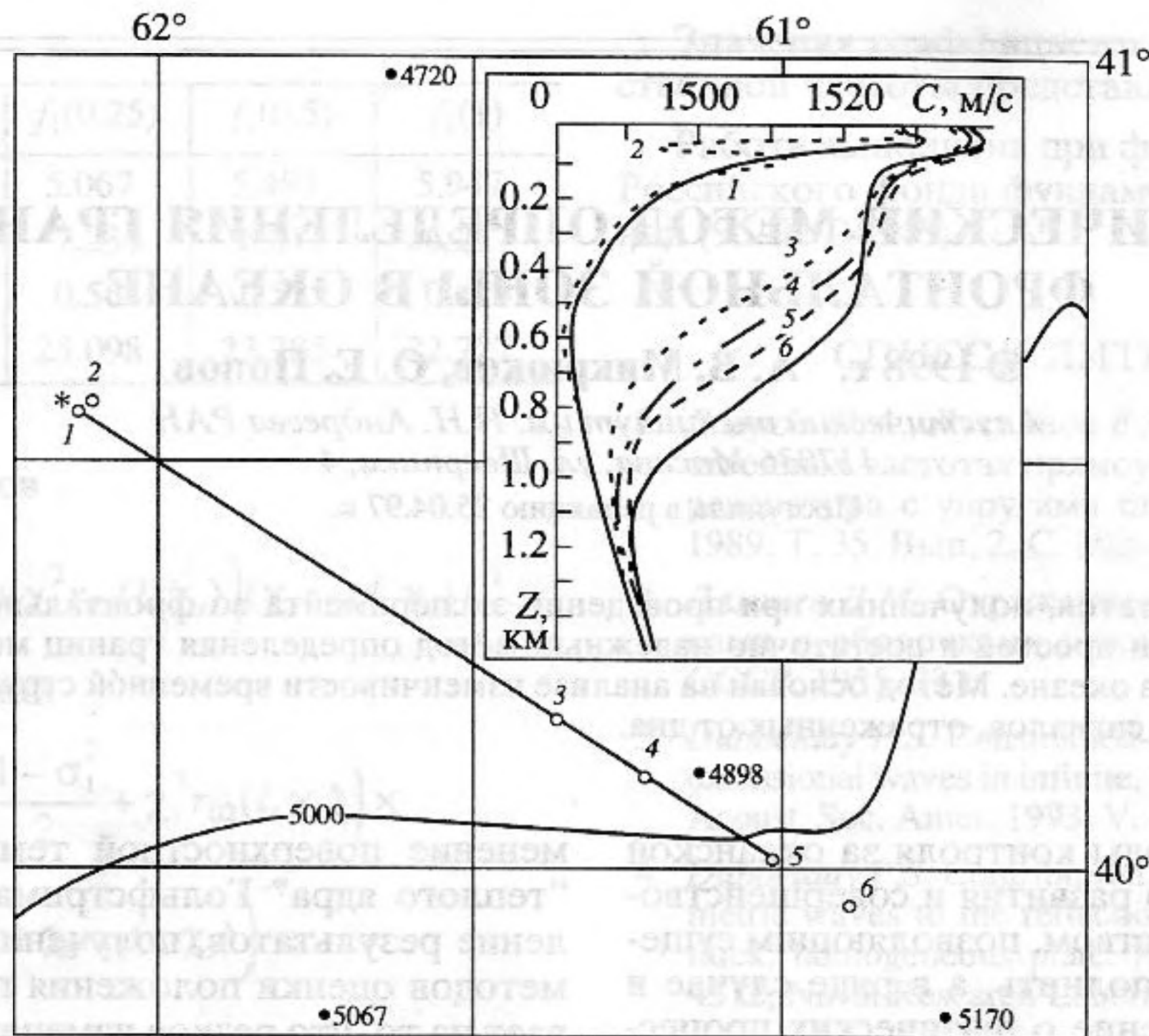


Рис. 1. Карта района работ. Кружками и цифрами отмечены положения и номера гидрологических станций. Полученные на указанных станциях профили  $c(z)$  приведены на врезке в рисунок.

стрима, а профили  $c(z)$  станций 3–5 можно отнести к переходным формам.

Местонахождение границы ФЗ (левого края Гольфстрима) в ходе эксперимента предполагалось определить по “всплеску” величины поверхностной температуры, фиксируемой термодатчиком, буксируемым излучающим судном на глубине ~2 м. В соответствии с полученными данными (рис. 2а) северная граница ФЗ должна была находиться на расстоянии 71 км от приемного судна. Используя имеющиеся в нашем распоряжении профили  $c(z)$  и запись изменения поверхностной температуры с расстоянием, была воссоздана модель среды вдоль исследуемой трассы распространения звука (рис. 2б). На участке трассы 0–71 км волновод предполагался плоскостойким с профилем  $c(z)$ , зафиксированным на станции 1,  $c(z)$  1. После этого трасса пролегла над ФЗ, смоделированной путем линейной интерполяции скорости звука между профилями  $c(z)$ , полученными на станциях 3–6.

Созданная модель использовалась в дальнейшем для оценки степени влияния ФЗ на временную структуру распространяющихся через нее сигналов. Рассчитывалась разница времен прихода лучей, соответствующих тем вступлениям в суммарном сигнале, чья природа могла быть достаточно надежно идентифицирована на экспериментальных записях при излучении сигналов как до пересечения трассой ФЗ, так и после ее пересечения. На участке записей сигналов, обусловленном

чисто водными вступлениями, проследить и идентифицировать всю предысторию каких-либо индивидуальных вступлений оказалось чрезвычайно сложной задачей в виду их слабого временного разрешения. В то же самое время на экспериментальных записях сигналов, зарегистрированных при излучении на участке трассы от 36 до 104 км, отчетливо прослеживается четверка приходов, соответствующая индивидуальным вступлениям, распространяющимся вдоль пути лучей, совершивших двукратное отражение от дна. Разность времен распространения между отдельными приходами в данной четверке,  $\Delta T$ , надежно определяется на записях сигналов и, что особенно важно, оказывается весьма чувствительной (что подтверждается и результатами расчетов) к изменениям, происходящим в поле скорости звука вдоль трассы. Таким образом, прослеживая характер поведения  $\Delta T(r)$  и фиксируя участок трассы, где происходит смена скорости изменения  $\Delta T$ , можно достаточно точно установить где именно трасса распространения звука пересекает ФЗ.

Последовательность времен прихода в рассматриваемом семействе лучей распределена следующим образом. Первым в точку приема приходит луч, вышедший из источника вниз и пришедший в точку приема снизу (луч 1). В дальнейшем при расчетах мы, используя принцип взаимности, будем предполагать, что имеем дело не с движущимся источником, как это было в опыте, а с буксируемым на глубине 290 м приемником, удаляю-

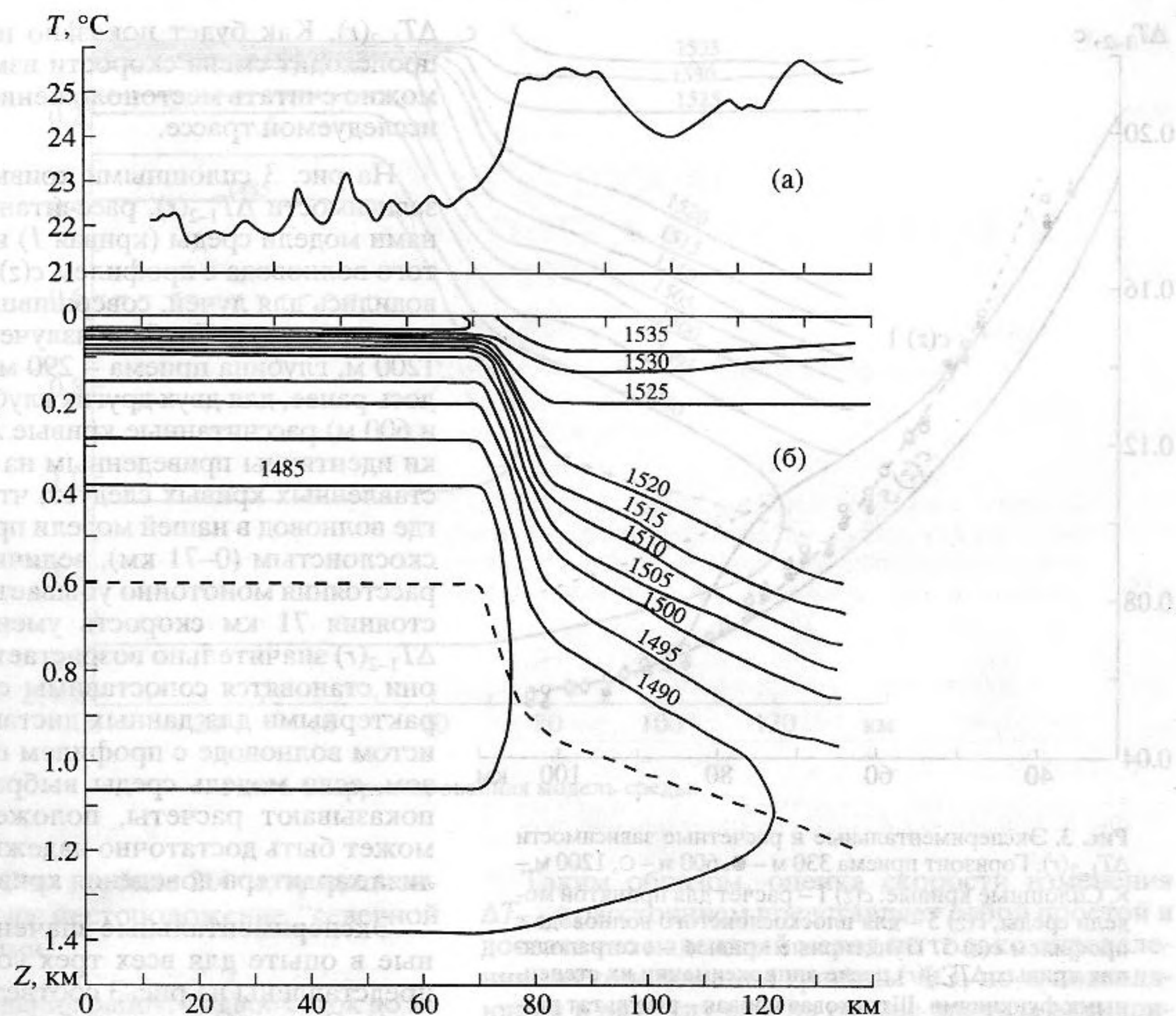


Рис. 2. Запись изменения поверхностной температуры с расстоянием (а) и модель среды вдоль исследуемой трассы (б).

щимся от зафиксированных на глубинах 330, 600 и 1200 м в начальной точке трассы излучателей. В результате горизонт приема будет во всех случаях выше горизонта излучения. При таком размещении корреспондирующих точек вторым в точку приема будет приходить луч, вышедший также как и луч 1 вниз, но пришедший в точку приема сверху, испытав при этом дополнительное отражение от поверхности в окрестности точки приема (луч 2). Третьим и четвертым придут лучи, вышедшие из источника вверх и испытавшие по сравнению с лучом 1: первый – дополнительное отражение от поверхности в окрестности источника (луч 3), а второй – в окрестности и источника и приемника (луч 4).

Поскольку в дальнейшем нас будет интересовать разница во временах прихода лучей в конкретной четверке, сразу заметим, что  $\Delta T_{1-2} \approx \Delta T_{3-4}$  и  $\Delta T_{1-3} \approx \Delta T_{2-4}$ . Каждая из этих величин монотонно уменьшается с ростом расстояния. В простейшем случае изоскоростного волновода при размещении источника и приемника в центре водного слоя разница прихода лучей 1 и 2 (или 1 и 3) определя-

ется выражением  $\Delta T(r) = (r/c)(1/\cos\alpha_2 - 1/\cos\alpha_1)$ , где  $r$  – горизонтальное расстояние между источником и приемником,  $c$  – скорость звука в водном слое, а  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы выхода лучей 1 и 2 из источника. Можно показать, что начиная с расстояний  $r \gg H$  (где  $H$  – толщина водного слоя) кривая  $\Delta T(r)$  с успехом аппроксимируется степенной функцией с отрицательным показателем степени. При наличии в водном слое профиля  $c(z)$  выражение для  $\Delta T(r)$  существенно усложняется. Однако на больших расстояниях данная зависимость по-прежнему надежно аппроксимируется степенной функцией. Это обстоятельство оказывается весьма полезным в ряде случаев для экстраполяции полученных результатов как на большие, так и на меньшие расстояния.

Величина  $\Delta T_{1-3}$  практически не зависит от глубины приема. В нашем случае изменение глубины приема с 50 до 1000 м соответствует изменению  $\Delta T_{1-3}$  всего лишь на 2 мс. Это объясняется тем, что разница времен прихода лучей 1 и 3 обусловлена главным образом за счет дополнительного хода луча 3 выше источника в начальной

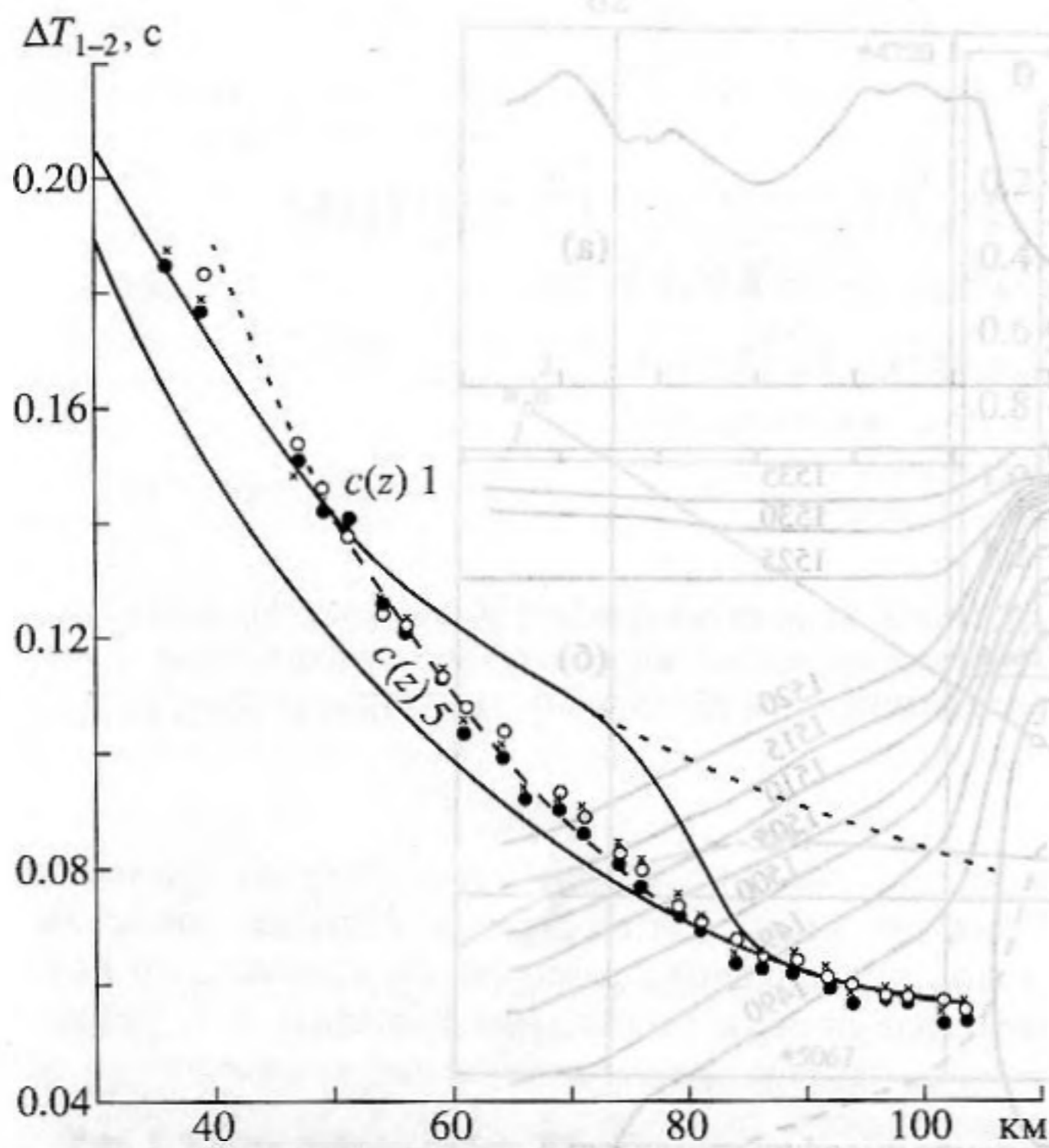


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные зависимости  $\Delta T_{1-2}(r)$ . Горизонт приема 330 м — ●, 600 м — ○, 1200 м — ×. Сплошные кривые:  $c(z)$  1 — расчет для принятой модели среды,  $c(z)$  5 — для плоскослоистого волновода с профилем  $c(z)$  5. Пунктирные кривые — экстраполяция кривых  $\Delta T_{1-2}(r)$  после аппроксимации их степенными функциями. Штриховая кривая — результат расчета для скорректированной модели среды, приведенной на рис. 4.

точке трассы. По этой же причине, если источник при проведении работ в неоднородном океане находится в плоскослоистом участке волновода, а приемник, удаляясь от него, начнет пересекать ФЗ, то скорость изменения  $\Delta T_{1-2}$  будет весьма слабо реагировать на это резкое возмущение в поле скорости звука.

Совершенно по иному будет вести себя разница времен прихода лучей 1 и 2,  $\Delta T_{1-2}$ . Во-первых, в противоположность  $\Delta T_{1-3}$ ,  $\Delta T_{1-2}$  оказывается весьма чувствительной к глубине приема и практически не зависит от горизонта излучения. Однако самое главное для нас сейчас то, что при попадании приемника в область со значительными горизонтальными градиентами скорости звука луч 2, совершая дополнительный "полуцикл" непосредственно выше приемника, начнет изменять траекторию своего пути, что в свою очередь повлечет и изменение времени его прихода в точку приема. Таким образом, если на участке трассы, где волновод предполагался плоскослоистым, величина  $\Delta T_{1-2}$  монотонно убывает с расстоянием, то с момента попадания приемника во ФЗ заметно изменяется и характер поведения

$\Delta T_{1-2}(r)$ . Как будет показано ниже, область, где происходит смена скорости изменения  $\Delta T_{1-2}(r)$ , и можно считать местоположением границы ФЗ на исследуемой трассе.

На рис. 3 сплошными кривыми представлены зависимости  $\Delta T_{1-2}(r)$ , рассчитанные для принятой нами модели среды (кривая 1) и для плоскослоистого волновода с профилем  $c(z)$  5. Расчеты производились для лучей, совершивших двукратное отражение от дна. Глубина излучения при расчетах — 1200 м, глубина приема — 290 м. Как уже отмечалось ранее, для двух других глубин излучения (330 и 600 м) рассчитанные кривые  $\Delta T_{1-2}(r)$  практически идентичны приведенным на рисунке. Из представленных кривых следует, что если на участке, где волновод в нашей модели предполагается плоскослоистым (0–71 км), величина  $\Delta T_{1-2}$  с ростом расстояния монотонно убывает, то начиная с расстояния 71 км скорость уменьшения значений  $\Delta T_{1-2}(r)$  значительно возрастает, и в конце трассы они становятся сопоставимы со значениями, характерными для данных дистанций в плоскослоистом волноводе с профилем  $c(z)$  5. Таким образом, если модель среды выбрана верно, то, как показывают расчеты, положение границы ФЗ может быть достаточно надежно оценено из анализа характера поведения кривой  $\Delta T_{1-2}(r)$ .

Экспериментальные значения  $\Delta T_{1-2}$ , полученные в опыте для всех трех горизонтов приема, представлены на рис. 3 соответствующими значками. Совпадая между собой, эти значения соответствуют расчетной кривой  $c(z)$  1 лишь на первых 50 км. После этого скорость их уменьшения заметно возрастает до тех пор пока на расстоянии ~80 км они не оказываются сопоставимыми со значениями  $\Delta T_{1-2}$  для профиля  $c(z)$  5 в плоскослоистом волноводе. На основании этого факта (расхождение расчетных и экспериментальных зависимостей) можно сделать предположение, что заметное изменение поля скорости звука в подводной части исследуемой трассы имеет место не на 71 км от начала трассы, как это предполагалось в нашей модели, а значительно ближе.

Степени возможного разобщения поверхностного и подповерхностного фронтов Гольфстрима посвящен цикл статей К.В. Хортон, результаты которых обобщены в обзорной работе [4]. В частности, отмечается, что при прохождении тропического вихря расстояние между двумя этими фронтами может возрастать до 25–30 км как в направлении движения вихря, так и в противоположном направлении в зависимости от траектории движения ядра вихря относительно точки наблюдения. При этом смещение поверхностного фронта не ограничивается верхним перемешанным 30-ти метровым слоем. Для горизонта 100 м это смещение достигало в ряде случаев 12 км. Все смещения определялись относительно положе-

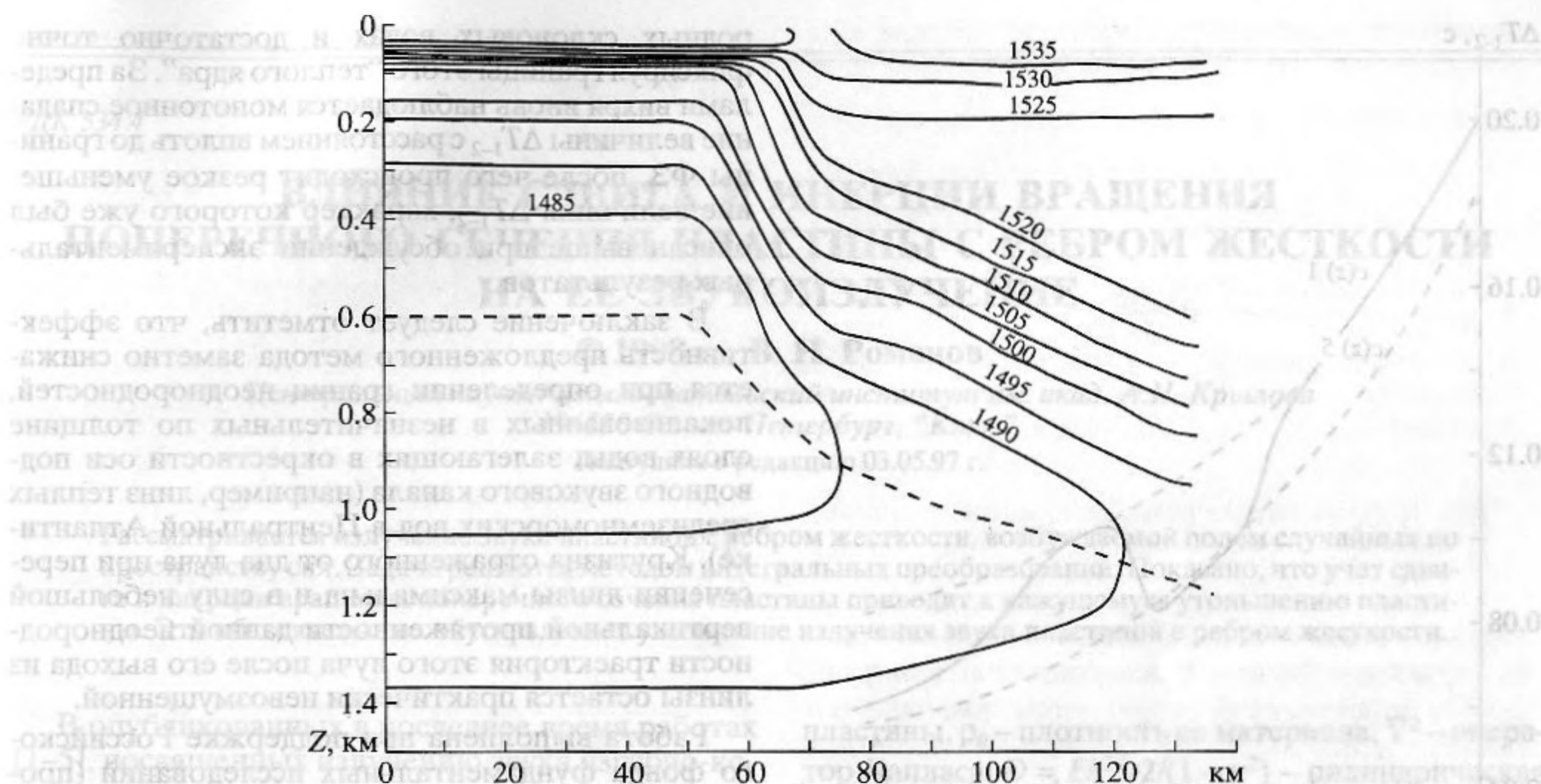


Рис. 4. Скорректированная модель среды.

ния изотермы 15°C на глубине 200 м, традиционно принимаемого за местоположение “северной стены” Гольфстрима.

В районе проведения работ, за двое суток до их начала, прошел в северо-западном направлении мощный ураган Габриэлле (со скоростью ветра в его центре до 32.5 м/с), который и мог способствовать столь разительному искажению вертикального распределения поля скорости звука относительно его среднего распределения. Учитывая данное обстоятельство, литературные данные и полученные в опыте экспериментальные значения, была предпринята попытка создания более совершенной модели поля скорости звука вдоль исследуемой трассы. В результате машинного моделирования вновь созданная модель среды выглядела следующим образом. Северная граница ФЗ на горизонте 200 м была удалена от начала трассы на 50 км, на горизонте 100 м – на 62 км и, наконец, на поверхности – на 71 км (рис. 4). Таким образом, участок плоскостойкого волновода с профилем  $c(z)$  1 ограничивался первыми пятьдесятю километрами трассы, после чего следовала ФЗ с заметно наклоненной выше 200 м границей. Рассчитанная для новой модели среды кривая  $\Delta T_{1-2}(r)$  приведена штриховой кривой на рис. 3. Совпадение расчета с экспериментальной зависимостью получено на этот раз гораздо более удовлетворительным, что позволяет считать приведенную на рис. 4 модель среды в общих чертах близкой к действительной.

Таким образом, оценка скорости изменения  $\Delta T_{1-2}$  с расстоянием представляет собой простой и достаточно надежный метод не только определения местоположения границы ФЗ, но и позволяющий в ряде случаев на основе анализа экспериментальных данных и некоторой априорной информации о поле скорости звука достаточно надежно воссоздавать модель среды.

Предложенный метод обладает достаточно высоким пространственным разрешением, что может позволить, например, обнаруживать в холодных склоновых водах небольшие в диаметре теплые вихри, оторвавшиеся от Гольфстрима. Для иллюстрации этого возьмем волновод, состоящий из трех плоскостойких участков и заканчивающийся ФЗ. Два из этих участков (0–50 км и 70–80 км) имеют профиль скорости звука, характерный для склоновых вод (профиль  $c(z)$  1). Между ними находится участок (55–65 км) с профилем  $c(z)$ , характерным для “теплого ядра” Гольфстрима (профиль  $c(z)$  6). При моделировании переходных областей между участками (50–55 км и 65–70 км) использовалась линейная интерполяция скорости звука между профилями  $c(z)$  1 и  $c(z)$  6. И, наконец, на расстоянии 80 км от начала трассы находится граница ФЗ, модель которой приведена на рис. 4. Толщина водного слоя – 5000 м, горизонт излучения – 1200 м, приема – 290 м.

Характер изменения  $\Delta T_{1-2}(r)$  для данной модели волновода приведен на рис. 5 сплошной кривой. Из приведенного графика следует, что величины  $\Delta T_{1-2}$  начинают резко уменьшаться как толь-

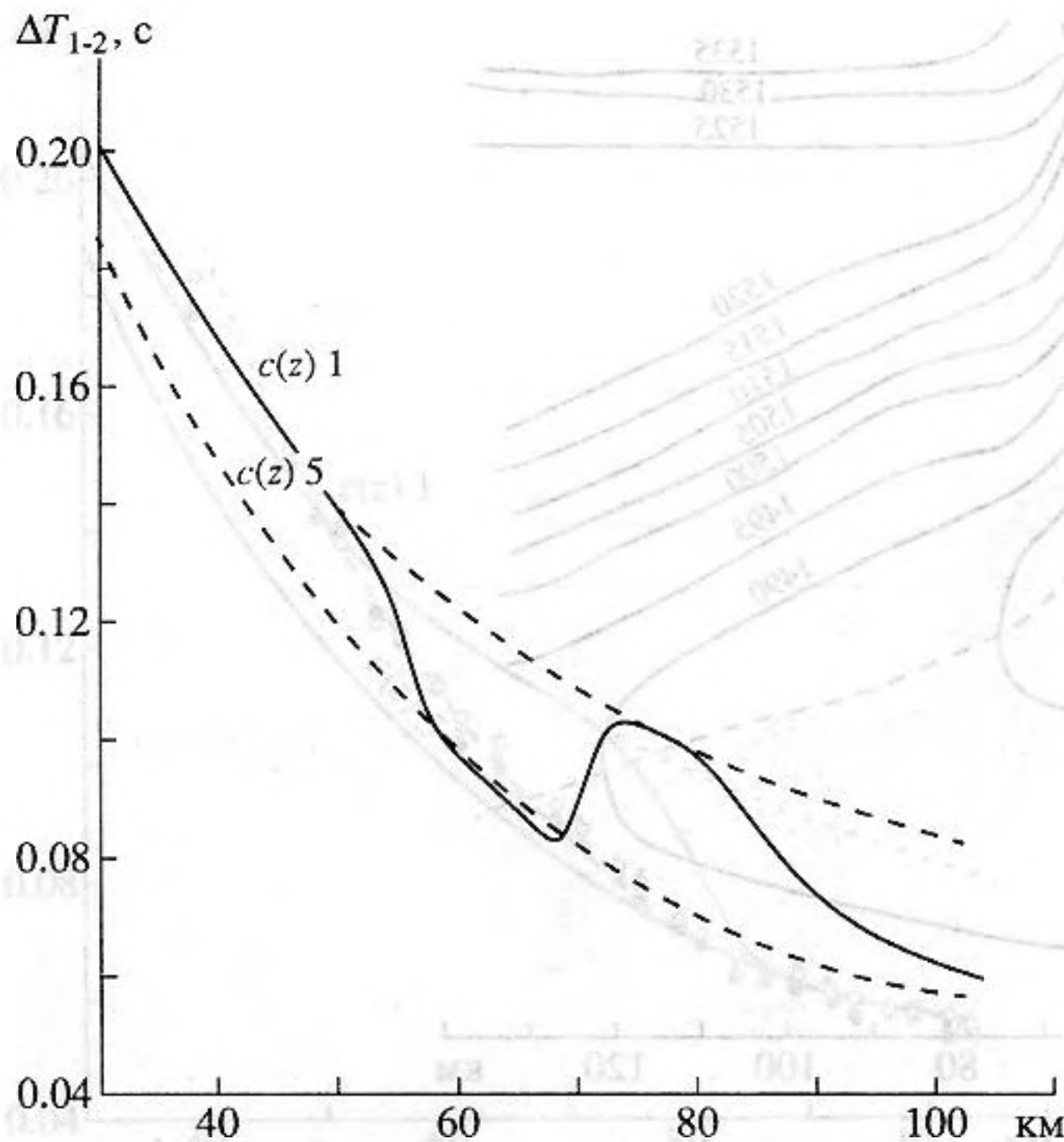


Рис. 5. Зависимости  $\Delta T_{1-2}(r)$  при моделировании теплового вихря в склоновых водах. Сплошная кривая – расчет для принятой модели среды; штриховые кривые – расчет для плоскостратифицированных волноводов с профилями  $c(z)$  1 и  $c(z)$  5.

ко приемник оказывается в области перехода от холодных склоновых вод к теплым водам вихря и, наоборот, столь же резко возрастает по мере выхода приемника за пределы вихря вновь в холодные склоновые воды, тем самым наглядно иллюстрируя наличие инородного “теплого ядра” в одно-

родных склоновых водах и достаточно точно фиксируя границы этого “теплого ядра”. За пределами вихря вновь наблюдается монотонное падение величины  $\Delta T_{1-2}$  с расстоянием вплоть до границы ФЗ, после чего происходит резкое уменьшение величины  $\Delta T_{1-2}$ , характер которого уже был описан выше при обсуждении экспериментальных результатов.

В заключение следует отметить, что эффективность предложенного метода заметно снижается при определении границ неоднородностей, локализованных в незначительных по толщине слоях воды, залегающих в окрестности оси подводного звукового канала (например, линз теплых средиземноморских вод в Центральной Атлантике). Крутизна отраженного от дна луча при пересечении линзы максимальна и в силу небольшой вертикальной протяженности данной неоднородности траектория этого луча после его выхода из линзы остается практически невозмущенной.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 96-02-19021).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Munk W.H., Wunsch C. Ocean acoustic tomography: A scheme for large scale monitoring // Deep-Sea Res. 1979. 26A. P. 123–161.
2. Athanassoulis G.A., Skarsoulis E.K. Arrival-time perturbations of broadband tomographic signals due to sound-speed disturbances. A wave-theoretic approach // J. Acoust. Soc. Amer. 1995. V. 97. № 6. P. 3575–3588.
3. Стоммел Г. Гольфстрим. М.: Изд-во ин. лит., 1963.
4. Белкин И.М. Современное состояние исследований Гольфстрима. М.: Институт Океанологии АН РАН, 1988.

## The Acoustical Method for the Determination of the Frontal Zone Boundary in the Ocean

A. V. Mikryukov and O. E. Popov

On the basis of experimental data obtained in the frontal zone of the Gulf Stream, a simple and fairly reliable method is developed for determining the boundaries of meso-scale inhomogeneities in the ocean. This method is based on analysis of the variability of the temporal structure of bottom reflected impulse signals.