

## ВОЗМОЖНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ И ОЦЕНОК МЕТАНОВЫХ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЙ НА ШЕЛЬФЕ ЧЁРНОГО МОРЯ МЕТОДАМИ АКУСТИЧЕСКОГО ЛУЧЕВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

**В.К. БОГУШЕВИЧ, Л.Н. ЗАМАРЕНОВА, М.И. СКИПА**

*Отделение гидроакустики МГИ НАН Украины, г. Одесса, Украина*

Рассмотрены вопросы аномалии скорости звука и ее частотной зависимости в среде с пузырьками, изменения размера пузырька и состава пузырьков газовой выделения при всплытии, оценивания их характеристик при многочастотном зондировании, выявления и оценок донных газовой выделений на шельфе методом лучевого зондирования, достигаемых характеристик систем.

### ВВЕДЕНИЕ

В Чёрном море регулярно проводятся работы по поиску и исследованиям газовой выделений из дна, направленные на решение экологических и гидрохимических задач, поиск газовых месторождений. Основными вопросами диагностики газовой выделений являются определение их размеров, интенсивности и размерного состава пузырьков. Для этих целей в первую очередь используются эхолоты и гидролокаторы. Однако использование таких средств имеет ряд существенных недостатков и не обеспечивает однозначности эхолокационных оценок [1]. Для улучшения диагностики газовой выделений предлагается метод акустического горизонтального лучевого зондирования (прозвучивания), при котором звук проходит через область газовой выделения. Лучевое зондирование лишено недостатков эхолокации, позволяет использовать более низкие частоты и увеличивать расстояния до наблюдаемых газовой выделений. Однако практическая реализация метода в условиях мелкого моря связана с серьезными трудностями. Рассмотрению вопросов акустического лучевого зондирования и возможностей выявления и оценивания газовой выделений на шельфе и посвящена эта работа.

### 1 ВЫЯВЛЕНИЕ И ОЦЕНИВАНИЕ ДОННЫХ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЙ

Пузырьки газовой выделений меняют характеристики морской среды – скорость распространения звуковых волн  $c$  и их затухание  $\beta$ . Эти изменения будут приводить к изменениям времени распространения сигнала и его уровня. При лучевом зондировании проще измерять аномалию времени распространения  $\Delta T$ , что позволяет определять аномалию скорости звука  $\Delta c$ . В условиях пересечения газовой выделения несколькими лучами на разных глубинах, измеряя характеристики распространения  $\Delta T_m$  и оценивая  $\Delta c$ , можно выявлять газовой выделения и определять их интенсивность, газосодержание  $\tau_N$  (объемная доля газа) и размерный состав пузырьков. Аномалия скорости звука  $\Delta c$  определяется частотой зондирующего сигнала  $f_c$ , резонансной частотой пузырьков  $f_R$  (зависящей от их радиусов  $a$  и глубины нахождения  $z$ ), и газосодержанием  $\tau_N$  [2]:

$$\Delta c(f) = c - c_0 = -7,3 \cdot 10^3 \cdot c_0 \cdot \tau_N \cdot (1 - f_c / f_R) / [(1 - f_c^2 / f_R^2)^2 + \Delta^2 (f_c^2 / f_R^2)], \quad (1)$$

где  $f_R = (3,26 / a) \sqrt{1 + 0,1 \cdot z}$ ,  $\Delta$  - постоянная затухания.

Кривая, описываемая выражением (1), показана на рис. 1(а). Если спектр размеров пузырьков широкий,  $N_i / N$ , рис. 1(б), то каждый из размеров в соответствии со своим

газосодержанием  $\tau_{Ni}$  формирует свою кривую  $\Delta c_i(f) = F(\tau_{Ni})$ . Совокупность пузырьков

разных размеров формирует итоговую кривую  $\Delta c(f) = \sum \Delta c_i(f)$  (рис. 1(в)).

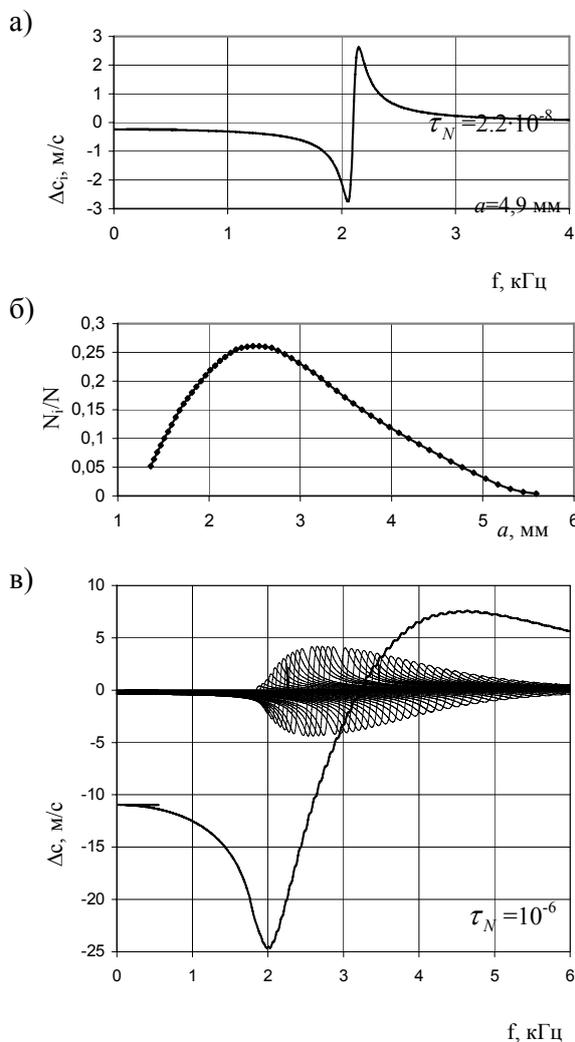


Рис. 1

увеличивается за счёт уменьшения гидростатического давления и уменьшается за счёт диффузии и растворения, определяемых процессами массопереноса при движении. Интенсивность массообмена одиночного пузырька характеризуется выражением [3, 4]:

$$j = 4\pi a^2 \cdot D \cdot (C_n - C_\infty) / \delta,$$

где  $D$  – коэффициент диффузии газа в воде;  $C_n$  и  $C_\infty$  – концентрация диффундирующего вещества на поверхности пузырька и вдали от него. Толщина концентрационного погранслоя  $\delta$  определяет зависимость интенсивности массообмена от скорости всплытия пузырька и режима его обтекания потоком. Для каждого диапазона размеров  $a$  и скоростей  $v$  получены решения, позволяющие находить  $\delta$  и решать задачу массообмена и изменения размера пузырька. Изменение размера всплывающего пузырька зависит от многих начальных условий: начального радиуса,  $a_H$ , начального значения глубины,  $z_H$ , характера газовыделения, скорости вертикального потока воды, распределения по глубине фоновых концентраций выделяющегося из дна газа, кислорода, азота и других

Зная газосодержание  $\tau_N = \sum \tau_{Ni}$  и размерный состав пузырьков  $N_i/N$ , можно рассчитать аномалию скорости звука  $\Delta c(f)$ . Но можно решать и обратную задачу – по измеренной аномалии  $\Delta c(f)$  определять  $\tau_N$  и размерный состав пузырьков. Согласно (1), на низких частотах ( $f_c \ll f_{Ri}$ ),  $\Delta c_0 = -7,3 \cdot 10^3 \cdot c_0 \cdot \tau_N$ , что позволяет определять  $\tau_N$  вне зависимости от размеров пузырьков  $f_{Ri}$ . Для этого нужно измерить  $\Delta c$  при частоте сигнала в 3...5 раз меньшей, чем наименьшая резонансная частота пузырьков. Для определения размерного состава пузырьков нужно определить зависимость  $\Delta c(f)$ , используя зондирование на нескольких (5...7) частотах.

Во многих случаях газосодержание  $\tau_N$  можно измерить на одной глубине. Характеристику аномальности  $\Delta c(f)$  тоже можно определять только на некоторых глубинах. Поэтому для оценки изменений характеристик газовыделения по глубине необходимо знать зависимости изменения с глубиной размеров пузырьков. Размер пузырька  $a$  при его всплытии

газов, забезпечуючих обратную диффузію в бульбашку, профіля температури води, характеру і ступені забруднення поверхні бульбашки і води. Більшість вказаних умов учтено в програмі розрахунків змінення розміра вспливаючого бульбашки, розробленої в ОГА МГІ НАНУ [1]. Можливість розраховувати змінення розміру вспливаючого бульбашки дозволяє оцінювати змінення с глибиною складу бульбашок і газосодержання  $\tau_N$ . Результати розрахунків змінення розмірного складу бульбашок [1] для випадків початкових розмірів 1,5...4,0 мм і 0,3...0,6 мм і змінення глибин з 90 м до 60 м і з 55 м до 45 м приведені на рис. 2а і 2б – криві 1 і 2. При цьому газосодержання  $\tau_N$  збільшується в 1,23 рази в першому випадку і зменшується в  $\sim 10$  раз – во другому.

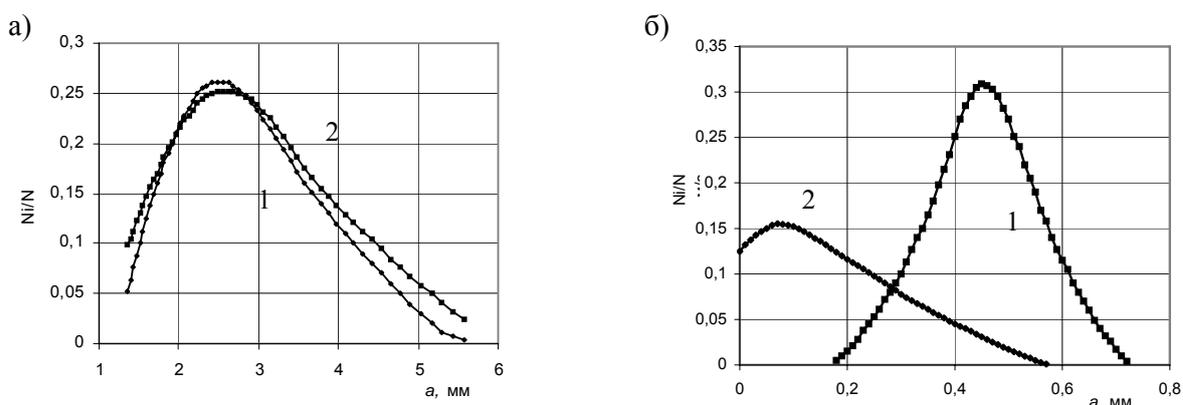


Рис. 2

Все газовиделения с определенным приближением можно отнести к пяти типам [5]:

1. Мощный факел:  $L=30-60$  м,  $\tau_N=(20-60)\cdot 10^{-6}$ ,  $\Delta c_0=220-660$  м/с,  $L\Delta c=(6,8-40,9)\cdot 10^3$  м<sup>2</sup>/с;
2. Средний факел:  $L=10-30$  м,  $\tau_N=(5-20)\cdot 10^{-6}$ ,  $\Delta c_0=55-220$  м/с,  $L\Delta c=568-6810$  м<sup>2</sup>/с;
3. Участок струй:  $L=5-20$  м,  $\tau_N=(0,5-5)\cdot 10^{-6}$ ,  $\Delta c_0=5,5-55$  м/с,  $L\Delta c=28,4-1135$  м<sup>2</sup>/с;
4. Участок факелов:  $L=100-200$  м,  $\tau_N=0,5\cdot 10^{-6}$ ,  $\Delta c_0=5,5$  м/с,  $L\Delta c=568-1135$  м<sup>2</sup>/с;
5. Район факелов:  $L=300-1000$  м,  $\tau_N=0,22\cdot 10^{-6}$ ,  $\Delta c_0=2,4$  м/с,  $L\Delta c=749-2497$  м<sup>2</sup>/с.

Возможности выявления и анализа этих газовыделений и рассматриваются ниже.

## 2 ИМПУЛЬСНО-ЛУЧЕВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ В МЕЛКОВОДНЫХ РАЙОНАХ

Идея акустического мониторинга состоит в использовании информации о распространении звука для получения информации о характеристиках среды. Изменение характеристик среды меняет поле скорости звука, что изменяет и акустическое поле, его фазовые, амплитудные и временные соотношения. Наиболее полно задача акустического мониторинга решается в случае акустической томографии, когда восстанавливается поле скорости звука  $c(x, y, z, t)$ . При лучевом подходе к решению задачи восстановления поля в качестве измеряемых величин берутся времена распространения сигналов по лучам. Аномалия времени прихода, обусловленная флуктуацией поля скорости звука,  $\Delta c$ , равна

$$\Delta T_m = \int_{\Gamma_m} (c_0 + \Delta c)^{-1} ds - \int_{\Gamma_m^0} c_0^{-1} ds, \quad m = 1, \dots, M, \quad (2)$$

где  $c_0(x, y, z)$  – известное «опорное» состояние поля,  $\Delta c(x, y, z, t) = c(x, y, z, t) - c_0(x, y, z)$ ,  $s$  – расстояние по лучу. Здесь  $\Gamma_m^0$  – опорный луч, соединяющий излучатель и приёмник в среде с  $c = c_0$ , а  $\Gamma_m$  – луч в реальной среде с  $c = c_0 + \Delta c$ . Соотношения (2) образуют систему из  $M$  интегральных уравнений относительно неизвестной функции  $\Delta c(x, y, z)$ , которую и требуется найти по измеренным  $\Delta T_m$ .

Задача инверсии (2) сложна. Ее можно упростить путём дискретизации и линеаризации [6]. При линеаризации, полагая  $\Delta c/c_0 \ll 1$  и полагая малым отличие траекторий  $\Gamma_m$  и  $\Gamma_m^0$ , выражение для  $\Delta T_m$ , в линеаризованном по  $\Delta c$  виде, записывают

$$\Delta T_m \approx - \int_{\Gamma_m^0} c_0^{-2} \Delta c ds, \quad m = 1, \dots, M. \quad (3)$$

При дискретизации флуктуационного поля  $\Delta c$  среда разбивается на ячейки,  $n = 1, \dots, N$ . В пределах ячейки флуктуация  $\Delta c$  в простейшем случае принимается постоянной,  $\delta c_n$ . Дальнейшее упрощение задачи получается в случае неоднородностей ограниченного размера. При этом аномалия поля  $\Delta c$  вне области неоднородности принимается равной нулю. Задача восстановления  $\Delta c$  упрощается еще, если размеры неоднородности малы по сравнению с длиной цикла луча или разницей глубин точек его заворота. В этом случае фрагмент траектории  $m$ -го луча через область аномалии можно аппроксимировать прямой линией. В простейшем случае неоднородностей, у которых в пределах меньшего размера  $\delta c_{ni} \approx const$ , задача восстановления становится элементарной

$$\Delta T_m \approx -S_{am} \cdot \delta c_{ni} / \langle c_{0am}^2 \rangle, \quad (4)$$

где  $S_{am}$  – длина аномального участка  $m$ -й траектории.

Последние упрощения определяют переход от общей задачи томографии к частной, но актуальной задаче лучевого зондирования локальных неоднородностей. Идея метода акустического лучевого зондирования локальных неоднородностей состоит в использовании коротких зондирующих сигналов и анализе временных соотношений сигналов, приходящих по разным лучам [5, 7]. Зная исходную временную структуру принимаемого сигнала, по изменению положения на временной оси сигналов лучей, можно определить те траектории, которые пересекают область с аномальными значениями скорости звука. А, зная эти «аномальные» траектории и их положение в пространстве, можно определить положение и размер неоднородности. Величину аномальности неоднородности можно установить по аномальности времени распространения сигналов и длине аномальных участков их траекторий.

Возможности выявления и оценивания газовыделений в мелком море методами лучевого зондирования, в первую очередь, определяются такими вопросами, как устойчивость лучевой и временной структур и идентификация лучей, отдельный прием сигналов лучей, пространственное и временное разрешение и дальность, рассеяние на неоднородностях и «толщина» луча, величина аномальности неоднородности и ее размер.

Идентификация лучей, устойчивость лучевой и временной структур. Большие изменения в профиле СЗ и его градиенте в случае мелководных, 30...50 м, районов обуславливают неоднозначность структуры звукового поля (несколько траекторий с одинаковым числом циклов  $N$ , но разными глубинами заворота  $z_m$  и временами прихода

$T_m$ ) и ее неустойчивость, т.е. исчезновение существовавших лучей и появление новых при незначительных изменениях поля  $c_0$  или его аномалии  $\Delta c$ . Это усложняет задачу идентификации лучей и ставит под вопрос саму возможность лучевого зондирования. Реализация лучевого зондирования возможна при глубинах более 50...70 м, когда нижняя ветвь профиля СЗ обретает монотонность с постепенным уменьшением градиента. В этом случае траектории, заворачивающие в этой области глубин, становятся однозначными и устойчивыми к малым вариациям  $c_0$  и  $\Delta c$ .

Пространственное и временное разрешение, отдельный прием сигналов и дальность. Пространственное разрешение определяется плотностью лучевых траекторий и их числом. Увеличение пространственного разрешения приводит к уменьшению временных интервалов  $\Delta T_p$  между сигналами лучей, что по условиям их отдельного приема требует увеличения полосы частот  $F_c > 1/\Delta T_p$  (и будет приводить к увеличению временного разрешения  $\sigma_\tau \sim 1/F_c$ ) и частоты сигнала  $f_c$ ,  $F_c \approx (0,2 \dots 0,3)f_c$  и приводит к уменьшению дальности  $r$  [7]. Отдельный прием сигналов легче обеспечить в случае равномерности интервалов  $\Delta T_p$  между ними. Задача равномерности интервала решается за счет оптимального выбора глубин размещения излучателя и приёмника [7]. Расчеты показывают, что в условиях ПЗК,  $H_m = 100$  м, для лучевых траекторий придонной области разделение сигналов достигается при  $1/F_c = 0,6 \dots 0,7 \text{ мс} \leq 0,9 \text{ мс} \leq \Delta T_p$ , что обеспечивает дальность зондирования (при  $f_c \sim 5 \dots 7$  кГц) до 25 км. При этом временное разрешение составит  $\sigma_\tau = 0,05$  мс, что обеспечивает чувствительность анализа газовыделений (4)  $L\Delta c = \Delta T_m c^2 \geq \sigma_\tau c^2 = 113 \text{ м}^2/\text{с}$  [5]. Указанная чувствительность анализа  $L\Delta c$  позволяет выявлять и анализировать на этих расстояниях все указанные выше типы газовыделений.

Рассеяние звука на случайных неоднородностях среды. Рассеяние на неоднородностях приводит к флуктуациям времени прихода сигналов  $\tau$ , к увеличению их длительностей  $\Delta T$  и к «рассеиванию» в пространстве лучевых траекторий, определяемому термином «толщина» луча  $d_v$ . В условиях зимнего ПЗК [8] показатели рассеяния  $\tau$  и  $\Delta T$  практически не ухудшают условий зондирования, в то время как «толщина» луча  $d_v$  оказывается основной причиной ограничений лучевого зондирования в мелком море. Реализуемые дальности зондирования в этих условиях могут достигать 15...20 км при глубинах более 70...100 м. В более благоприятных условиях ПЗК, когда улучшаются условия распространения и уменьшается рассеяние, при той же глубине  $H_m = 100$  м дальность зондирования может достигать 20...25 км.

Величина аномальности неоднородности и ее размеры. Приближение лучевой акустики требует малости изменения скорости звука ( $\Delta c/c_0 \ll 1$ ) на длине волны. Это требование выполняется практически всегда. Упрощение задачи инверсии за счёт линеаризации требует малости изменения скорости звука ( $\Delta c/c_0 \ll 1$ ) в области газовыделения и малости отличия исходной  $\Gamma_m^0$  и возмущённой  $\Gamma_m$  траекторий. Эти требования выполняются для большинства газовыделений. Точность оценок газовыделений зависит от соотношения их размера  $L$  и длины цикла лучевой траектории  $D_u$ . При длине цикла придонной траектории  $D_u \sim 3,0$  км эти условия выполняются для большинства газовыделений (размером до  $L = 0,5$  км).

Определение газосодержания и размерного состава пузырьков. Для оценивания размерного состава пузырьков необходимо определять зависимость  $\Delta c(f)$ , что требует зондирования на нескольких частотах. В реальных задачах зондирования диапазон используемых частот сигналов ограничен и в рассматриваемых условиях ПЗК,  $H_m = 100$  м,  $r \sim 20$  км, составляет от 5 до 10 кГц. При указанных частотах оценке поддаются газовыделения с размерами пузырьков 1,0...2,0 мм. Этим размерам соответствуют часто встречающиеся «средние» газовыделения [1]. В случае газовыделений, с большими размерами пузырьков, оценка может быть только частичной. Определение газосодержания  $\tau_N$ , в случаях больших размеров пузырьков, требует использования низких частот (от 1,0 до 4,0 кГц, в случае характерных газовыделений [1]). При этом не удаётся разделить сигналы отдельных лучей. В этом случае можно использовать приход и время распространения первого сигнала и определение  $\tau_N$  по его лучу.

Расчёты и оценки характеристик систем зондирования и достигаемых показателей при глубине моря  $H_m = 200$  м, приведенные в [1], показывают, что все характерные типы донных газовыделений поддаются обнаружению и количественному анализу на расстояниях  $\sim 50$  км. В рассматриваемых условиях ПЗК и глубин  $H_m = 100$  м обнаружение и анализ этих газовыделений можно ожидать на расстояниях 20...25 км. В качестве иллюстрации выявления газовыделения на рис. 3 показан участок факелов поперечным размером 200 м и высотой над дном 50 м и лучевые траектории при глубине моря  $H_m = 100$  м на трассе длиной 25 км. Построение траекторий пересекавших и не пересекавших газовыделение (метод лучевой реконструкции, [7]) позволяет определить его положение на трассе зондирования и его высоту (рис. 3 б, в). Временные интервалы между сигналами лучей,  $\Delta T_p \geq 0,9$  мс (рис. 3а) требуют для реализации системы полосы частот  $F_c = 1,4 \dots 1,6$  кГц ( $1/F_c \approx 0,6 \dots 0,7 < \Delta T_p$ ), что обеспечивается при частоте сигнала  $f_c = 6 \dots 7$  кГц (удовлетворяющей условиям  $r = 25$  км).

## ВЫВОДЫ

Донные газовыделения поддаются обнаружению и оцениванию при глубинах моря более 70...100 м. Лучшие результаты можно получить в условиях ПЗК с малой глубиной оси. В таком канале ( $H_m = 100$  м) достигаемые дальности  $r = 15 \dots 25$  км, временное разрешение  $\sigma_\tau = 0,02 \dots 0,05$  мс, различаемая аномальность неоднородности  $L\Delta c = 45 \dots 113$  м<sup>2</sup>/с, что позволяет выявлять и оценивать большинство характерных газовыделений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Богушевич, Замаренова Л.Н., Скипа М.И. Выявление и оценка газовыделений из дна системами акустического горизонтального лучевого зондирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь, 2006. – вып.14. – С. 546-553.
2. Скучик Е. Основы акустики. Т. 2. – М.: Издат. Иностранная литература, 1959.
3. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. – М.: Мир, 1971. 536 с.

4. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. 464 с.
5. Богушевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И. Повышение эффективности экологического и ресурсного мониторинга морской среды за счёт применения метода акустического горизонтального лучевого зондирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь, 2006. – вып.14. – С. 349-357.
6. Гончаров В.В., Куртепов В.М. Успехи и проблемы акустической томографии океана / Акустические волны в океане. – М.: Наука, 1987. С. 15-24.
7. Богушевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И. О возможностях акустического лучевого зондирования неоднородностей морской среды // Консонанс-2005. Акустичний симпозіум 27-29 вересня 2005 р. – Київ: Інститут гідромеханіки, 2005. – С. 90-96.
8. Богушевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И. О «толщине» лучей и возможностях акустического лучевого зондирования в условиях мелкого моря. // Консонанс-2007. Акустичний симпозіум 25-27 вересня 2007 р. – Київ: ІГМ, 2007. – настоящий сб.

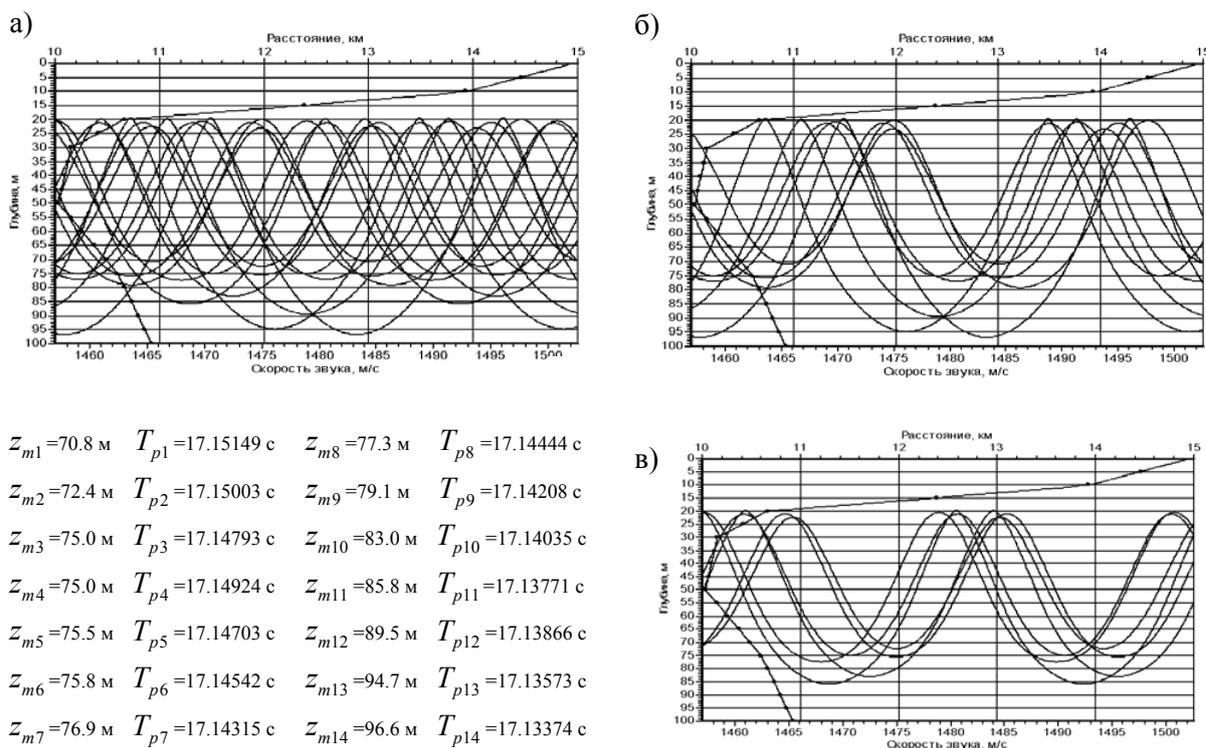


Рис. 3