

“В статье рассматривается синхронный прием колебаний вертикальным геофоном (Z) и гидрофоном (P), помещенными на дно транзитной зоны. Показано, что благодаря различию характеристик направленности датчиков, образующиеся в водном слое волны-спутники регистрируются ими строго в обратной полярности. На основе модельных исследований разработан алгоритм суммирования синхронных PZ наблюдений, позволяющий подавить интерференцию волн в ближней зоне приемника.

Приводятся результаты экспериментального опробования разработанного алгоритма на полевых материалах, полученных в транзитных зонах р. Вятка и Северного Каспия.”

Использование комбинированного PZ датчика (гидрофон, геофон) при проведении сейсморазведки на мелководье и в транзитных зонах

Жгенти С.А., ЗАО "Си Технолоджи Инструментс", г. Геленджик

При проведении исследований на мелководье и в транзитных зонах на поверхности и подошве водного слоя, имеющих, как правило, высокие значения коэффициентов отражения, всегда образуются частично-кратные волны-спутники [1]. При возбуждении колебаний, интерферируя (в ближней зоне) с волной, возбуждаемой источником, они формируют суммарную зондирующую волну или суммарный зондирующий сигнал. При приеме колебаний, интерферируя с восходящей отраженной волной, они образуют интерференционную отраженную волну, дополнительно осложненную

интерференцией в ближней зоне приемника. В случае «звонкого дна» [2], когда коэффициент отражения от подошвы водного слоя составляет величину 0,6 – 0,7, образуется реверберация волн, осложняющая регистрацию глубинных отраженных волн и препятствующая их прослеживанию.

Как правило, управлять условиями интерференции волн при проведении работ в транзитных зонах изменением глубины погружения источника под поверхность воды, как это делается на глубокой воде, невозможно, что связано с относительно малой мощностью водного слоя. Поэтому такие волны-помехи пытаются подавить применением линейного группирования источников. Применение же для приема колебаний при донных наблюдениях в транзитных зонах гидрофона (P) и геофона (Z) в каждом пункте приема обеспечивает дополнительные возможности подавления интерференции волн в ближней зоне приемника.

Принимаемая на дне водного слоя волна может быть записана следующим выражением (рис. 1):

$$S_n(\omega t) = a_1 e^{-j\omega t} (1 \pm k_1 k_2 e^{-j\omega \Delta t_1})$$

где: $a_1 e^{-j\omega t}$ - комплексная характеристика отраженной волны;

ω - круговая частота рассматриваемой частотной составляющей f , равная $2\pi f$;

t - время;

k_1 и k_2 - коэффициент отражения, соответственно, от кровли подошвы водного слоя;

Δt_1 - задержка в наложении волны-спутника от поверхности воды, равная

$$\frac{2H \cos \alpha}{V};$$

H - мощность водного слоя;

V - скорость распространения звука в воде;

α - рассматриваемое направление подхода отражений волны.

Знак перед вторым членом выражения, помещенного в скобки, зависит от типа применяемого приемного устройства. При применении обычного электродинамического сейсмоприемника (рис. 2 а), характеристика направленности 1-ого рода которого зависит от направления прихода волны, в выражении используется знак «+». Это обусловлено оди-

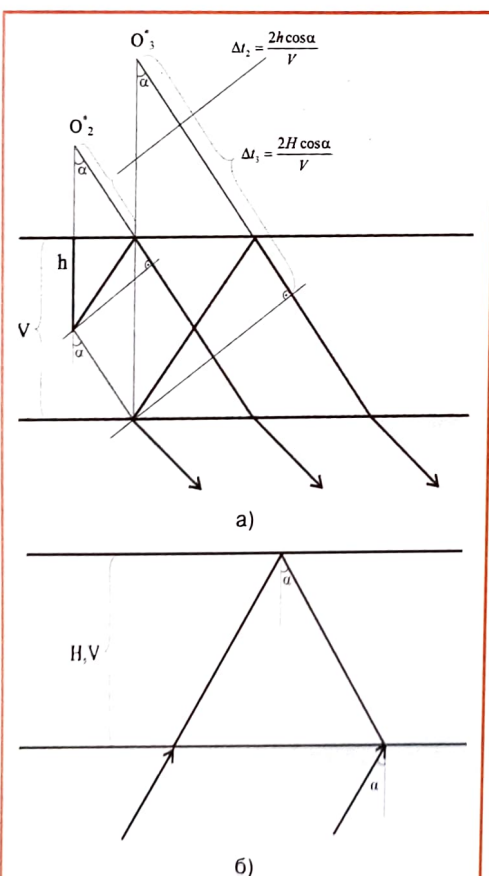


Рис. 1 Лучевые схемы распространения волн в ближней зоне источника (а) и приемника (б).

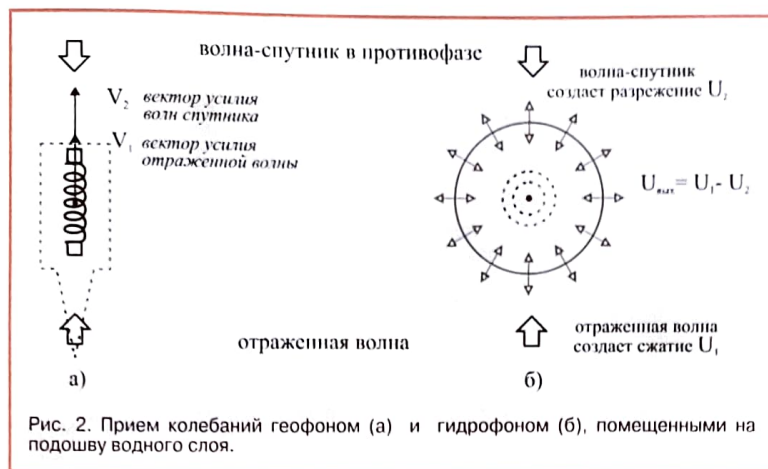


Рис. 2. Прием колебаний геофоном (а) и гидрофоном (б), помещенными на подошву водного слоя.

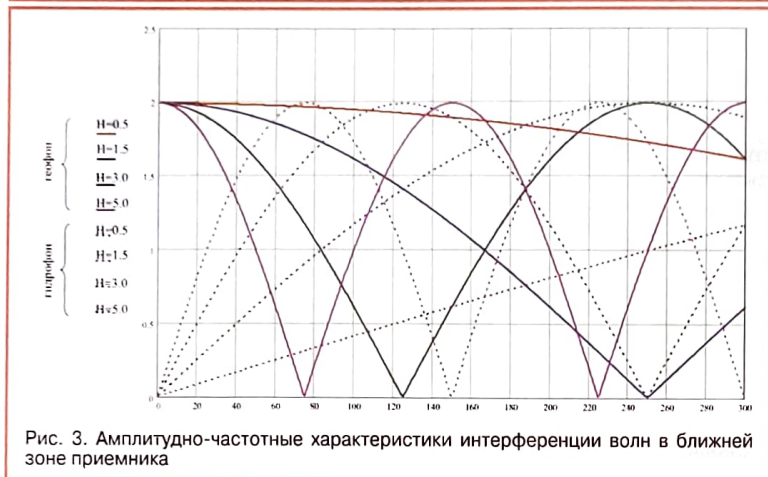
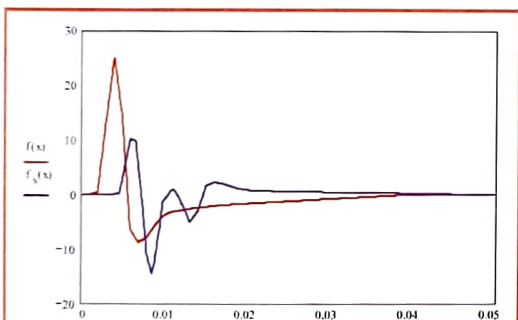
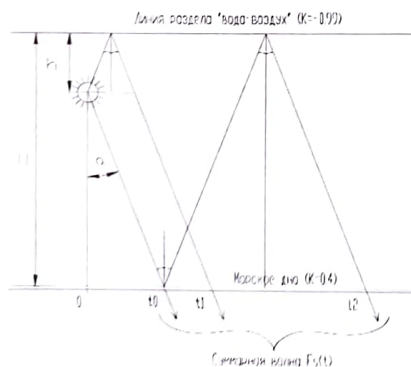


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики интерференции волн в ближней зоне приемника



а – форма суммарного зондирующего сигнала $f_s(x)$ и форма исходного сигнала $f(x)$.



Параметры модели: $v=1500$ м/с; $H=5$ м; $h=1$ м; $K_1=-0.99$; $K_2=0.4$; $a=0$

Рисунок 4. К расчету формы зондирующего сигнала. а – форма суммарного зондирующего сигнала $f_s(x)$ и форма исходного сигнала $f(x)$. б – лучевая схема распространения волн при учете интерференции в ближней зоне источника

наковым направлением векторов приложения усилий к сердечнику индукционной катушки сейсмоприемника для волны, пришедшей из нижнего полупространства, и волны, пришедшей из верхнего полупространства, но претерпевшей при отражении от поверхности воды обращение фазы.

В случае применения гидрофона (датчик объемного давления) (рис. 2 б), напряжение на выходе которого не зависит от направления прихода волны, в выражении используется знак «-». Это обусловлено тем, что волна-спутник, отразившаяся на поверхности воды с обращением фазы, уменьшает объемное давление, создаваемое волной, приходящей из нижнего полупространства.

Амплитудная характеристика суммарной волны, регистрируемой в ближней зоне приемника, соответственно, описывается выражением:

$$P_n(\omega t) = \left| 1 \pm k_2 e^{-\frac{2\pi f 2H \cos \alpha}{v}} \right|$$

На рисунке 3 приведены результаты расчета амплитудно-частотных характеристик направленности интерференции волн в ближней зоне приемника при использовании для приема колебаний геофона (электродинамического сейсмоприемника) и гидрофона (датчика объемного давления). Из рассмотрения приведенных кривых следует, что применение гидрофона обеспечивает большую чувствительность приема высокочастотных составляющих, а применение геофона – низкочастотных. При этом противоположные экстремумы имеют одинаковые отметки на оси частот, а изрезанность характеристик направленности тем больше, чем больше мощность водного слоя и выше частота рассматриваемой составляющей в спектре принимаемой волны.

Напрашивается вывод о том, что для компенсации искажающего действия на динамические характеристики волн явлений интерференции в ближней зоне приемника, колебания, регистрируемые геофоном и гидрофоном, целесообразно суммировать.

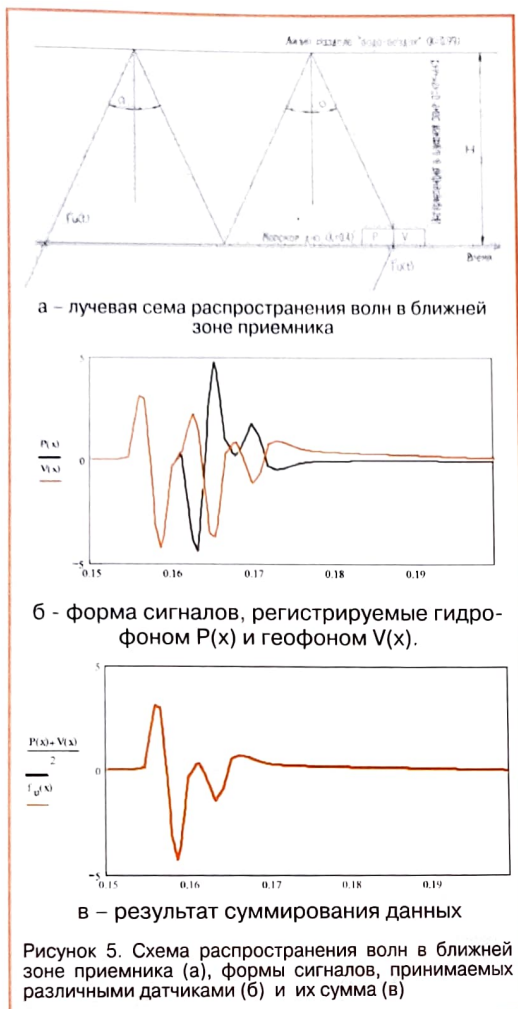
Оценка эффективности процедуры суммирования данных, регистрируемых геофоном и гидрофоном, для подавления интерференции волн в ближней зоне приемника, без учета различий в их АЧХ, была проведена на модельных исследованиях.

В качестве исходной использовалась форма сигнала, наблюдаемая на глубокой воде от срабатывания группы излучателей, выбранной в качестве оптимальной для проведения профильных наблюдений (рис. 4 а). На том же рисунке

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

КАДРЫ РЕШАЮТ ВСЕ?





приведена форма суммарного зондирующего сигнала, рассчитанная для модели строения ближней зоны источника, приведенной на рисунке 4 б. Далее, пренебрегая любыми изменениями в форме сигнала, происходящими в процессе его распространения в среде и используя модель строения ближней зоны приемника, приведенную на рисунке 5 а, были рассчитаны формы сигналов, регистрируемых гидрофоном и геофоном (рис. 5 б).

Из рассмотрения приведенных форм сигналов следует, что различия в сопоставляемых формах начинаются во втором периоде сигнала, когда геофон и гидрофон по-разному принимают волны-спутники, образующиеся в ближней зоне приемника. При этом времена противоположных экстремумов совпадают. Форма сигнала, полученная в результате суммирования данных, регистрируемых гидрофоном и геофоном, приведенная на рисунке 5 в, полностью идентична форме суммарного зондирующего сигнала (рис. 4 а), использованной в расчетах в качестве исходной.

Таким образом, суммирование данных, синхронно зарегистрированных геофоном (Z) и гидрофоном (P), помещенными в одну и ту же точку приема, в идеальном случае, позволяет подавить интерференцию волн в ближней зоне приемника.

Однако на практике все обстоит гораздо сложнее. Дело в том, что гидрофон измеряет изменение объемного давления в среде, создаваемого перемещением частиц, а геофон - скорость их перемещения. Кроме того, датчики

имеют различные АЧХ, обладают различной чувствительностью и могут иметь недостаточно контактный контакт со средой (в случае геофона - недостаточный контакт с грунтом, а в случае гидрофона - недостаточную мощность водного слоя), который назовем коэффициентом качества измерения Q . Возможно, что коэффициент качества измерения является частотно-зависимой величиной и имеет различные значения при приеме различных частотных составляющих, но в данном случае такое уточнение не существенно, его просто необходимо иметь в виду при интерпретации результатов.

Сигнал $S_{\Sigma}(\omega, t)$, получаемый в результате суммирования сигналов, зарегистрированных геофоном и гидрофоном, помещенными в одну и ту же точку на подошве водного слоя, может быть записан так:

$$S_{\Sigma}(\omega, t) = S_1(\omega, t) + S_2(\omega, t),$$

где:
 $S_1(\omega, t)$ - сигнал, зарегистрированный гидрофоном;
 $S_2(\omega, t)$ - сигнал, зарегистрированный геофоном;

$S_{\Sigma}(\omega, t)$ - результат суммирования сигналов. При этом, учитывая интерференцию волн в ближней зоне приемника, интерференционный сигнал, регистрируемый гидрофоном, может быть записан в следующем виде:

$$S_1(\omega, t) = Q_1 F_1 a e^{-j\omega t} - Q_1 F_1 \sum_1^n n k_1 k_2 a e^{-j\omega \Delta t_n},$$

а геофоном - так:

$$S_2(\omega, t) = Q_2 F_2 a e^{-j\omega t} + Q_2 F_2 \sum_1^n n k_1 k_2 a e^{-j\omega \Delta t_n},$$

где:
 F_1 - АЧХ гидрофона, а F_2 - АЧХ геофона;

Q_1 и Q_2 - характеристики качества измерения датчиками в реальных условиях, изменяющегося в диапазоне значений 0 - 1;

$a e^{-j\omega \Delta t}$ - волна, приходящая снизу в ближнюю зону приемника;

k_1 и k_2 - коэффициенты отражения от кровли и подошвы водного слоя;

Δt_n - задержка n-ой волны-спутника, образующейся на кровле и подошве водного слоя.

Подставив эти выражения в исходную формулу, имеем:

$$S_{\Sigma}(\omega, t) = a e^{-j\omega t} [F_1 Q_1 + F_2 Q_2 + \sum_1^n a e^{-j\omega \Delta t_n} (n F_1 Q_1 k_1 k_2 - n F_2 Q_2 k_1 k_2)]$$

В идеальном случае, когда $F_1 = F_2 = F$ (т.е. АЧХ датчиков идентичны), а $Q_1 = Q_2 = 1$ (100% контакт датчиков со средой), в результате суммирования получим:

$$S_{\Sigma}(\omega, t) = 2 a e^{-j\omega t} \cdot F$$

Таким образом, в этом идеальном случае результат суммирования представляет собой не что иное, как сигнал волны, приходящей снизу в ближнюю зону приемника, удвоенный по амплитуде (сложение данных 2-х идентичных датчиков), а волны-спутники взаимно уничтожаются, благодаря их регистрации разными датчиками в обратной полярности. Причем уничтожаются только частично кратные волны в ближней зоне приемника. На другие кратные и частично кратные волны этот эффект не распространяется. Возможность подавления интерференции волн в ближней зоне приемника особенно важна в случае реверберации колебаний, когда прослежива-



КАДРЫ РЕШАЮТ ВСЕ? ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

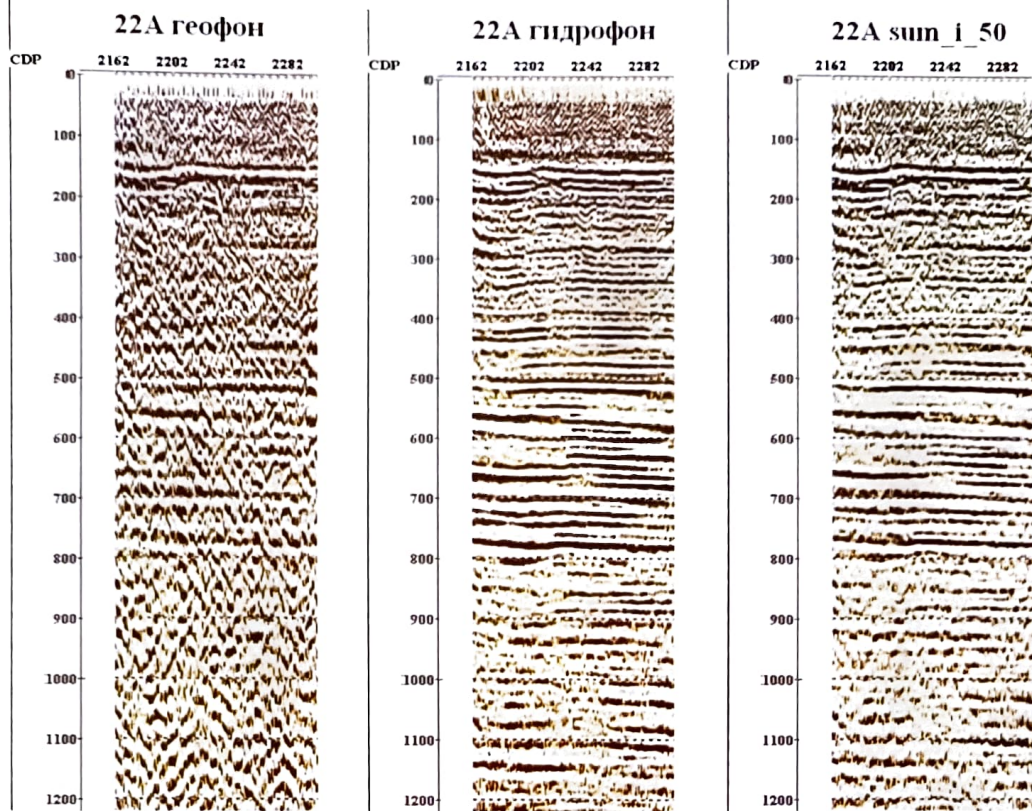


Рис 6. Фрагменты временных разрезов в транзитной зоне реки Вятка

нию отраженных волн мешает интерференционный цуг интенсивных многократных отражений в водном слое.

В реальной жизни есть существенное различие в характеристиках F_1 и Q_1 (различные резонансные частоты датчиков), чувствительность датчиков существенно отличается и датчики измеряют различные, хоть и связанные друг с другом, параметры колебательного процесса. Существенное влияние на эффективность подавления волн-спутников может также оказывать и коэффициент качества измерений. Разумеется, должно выполняться стандартное требование к измерениям в сейсморазведке - обеспечение надежного контакта приемника со средой. В случае недостаточно кондиционного измерения параметров эффект подавления кратных волн снижается.

Задача приближения эффективности суммирования данных к идеальной может быть решена двумя путями.

Конструкторский путь - создание датчиков, имеющих идентичные АХЧ (насколько это возможно, учитывая желаемые габариты изделий) и одинаковую чувствительность. Ряд исследователей указывают [4], что гидрофон, помещенный под акустически резкую границу, такую как поверхность воды, из датчика скорости смещения (велосиметра) превращается в акселерометр (датчик ускорения смещения), имеющий амплитудно-частотную характеристику, отличную от велосиметра. Различие в амплитудно-частотных характеристиках обусловлено, главным образом, разными значениями резонансных частот акселерометра и велосиметра, которые для корректного проведения суммирования данных должны быть согласованы [3]. Кроме того, необходимо учитывать различие в измеряемых параметрах (область измерений), связанных с природой датчиков.

На основании проведенных исследований

была инициирована разработка электродинамических акселерометров для применения в приемной косе системы XZone® Marsh Line, которая в настоящее время проводится в компании «СИ Технолоджи» совместно с лабораторией приемных устройств ФГУП «ВНИИГеофизика».

Программный путь - суммирование сигналов, регистрируемых геофоном и гидрофоном, приведенных в единую область измерения параметров колебательного процесса, и последующая коррекция их амплитудно-частотных характеристик. Остановимся подробнее на описании программного пути.

Выходные сигналы геофона и гидрофона - это значения напряжений, величины которых зависят от измеряемых датчиками параметров колебательного процесса. Геофон измеряет колебательную скорость частиц среды, а гидрофон - изменение давления в воде, порожденное этими колебаниями частиц среды. При этом известно [5], что изменение давления, создаваемого в среде, отстает от колебательной скорости частиц среды на $\pi/2$. Оба параметра регистрируются синфазно (в одинаковой полярности), а изменение давления пропорционально колебательной скорости частиц среды, вызывающей это изменение.

Способы суммирования данных, регистрируемых геофоном и гидрофоном, известны и описаны, например, в работе [6]. Авторы осуществили их адаптацию к особенностям системы XZone® Marsh Line, никогда ранее не предусматривавшей (даже опционально) проведение этой процедуры при регистрации данных в ЦСР.

Алгоритм получения суммарных трасс для системы XZone® Marsh Line, состоит в следующем.

Для корректного осуществления процедуры суммирования сигналов, регистрируемых геофоном и гидрофоном, необходимо обеспечить регистрацию колебаний геофоном и гидрофо-

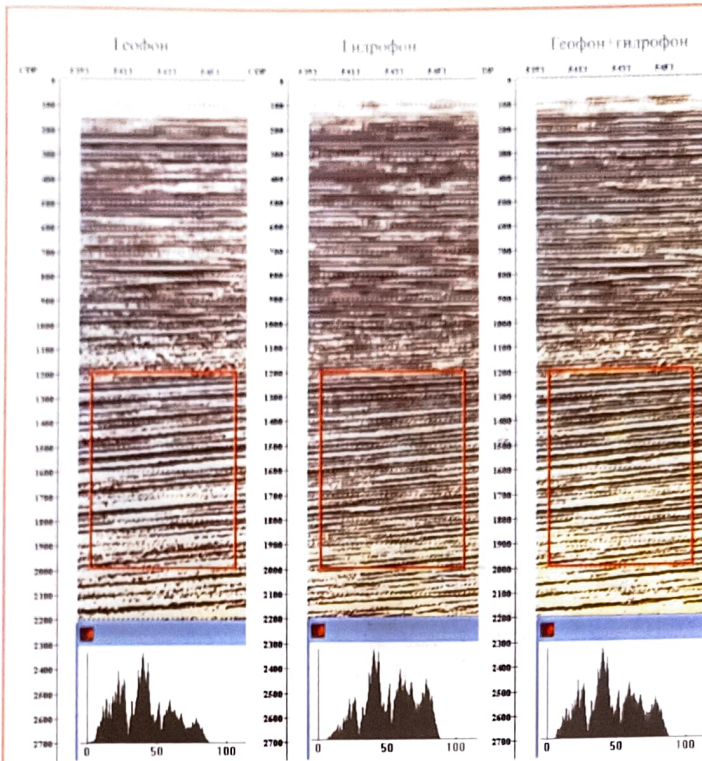
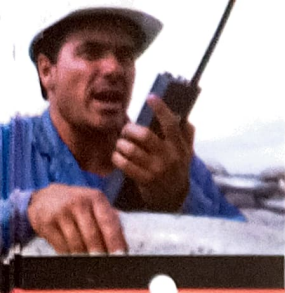


Рис. 7. Фрагменты временных разрезов, иллюстрирующие эффективность работы алгоритма сложения данных, зарегистрированных геофоном (Z) и гидрофоном (P).

ном в одной полярности. Отраслевые стандарты по регистрации колебаний гидрофоном не известны. Существующий же стандарт SEG предусматривает, что вступление волны при ее регистрации геофоном должно отмечаться срывом амплитуды сигнала в область отрицательных значений («срыв сигнала вниз»). Полярность гидрофона в системе XZone® Marsh Line должна быть идентичной. Кроме того, необходимо обеспечить фазовый сдвиг сигналов, регистрируемых гидрофоном, на $\pi/2$. Эта операция может быть выполнена путем применения фазового преобразования сигнала Гилберта [7].

Сигналы, регистрируемые геофоном и гидрофоном, необходимо привести к одинаковому масштабу амплитуд. Опыт применения системы XZone® Marsh Line показал, что амплитуды колебаний, регистрируемые гидрофоном, как правило, на порядок больше амплитуд сигналов, регистрируемых геофоном. Проведение масштабирования амплитуд сигналов, регистрируемых геофоном, осуществляется путем расчета для каждой пары трасс (гидрофон и геофон) каждого одноименного пункта приема некоторой скалярной трассы (масштабирующей трассы). Скалярная трасса представляет собой отношения одновременных выборок абсолютных значений амплитуд гидрофона к выборкам абсолютных значений амплитуд геофона после медианной фильтрации. Медианная фильтрация применяется с целью ослабления влияния на результат суммирования случайных помех с большими амплитудами. После этого, выборки амплитуд сигнала, зарегистрированного геофоном, перемножаются с рассчитанными одновременными выборками полученной скалярной трассы и результат суммируется с одновременными выборками амплитуд гидрофона.

Опробование разработанного алгоритма проведено на полевых данных, зарегистрированных в транзитной зоне реки Вятка. На рисунке 6 приведены фрагменты временных разрезов, полу-

ченных при приеме колебаний геофонами и гидрофонами. Из рассмотрения рисунка следует, что волновая картина на временном разрезе, полученном по суммарным данным, характеризуется существенным уменьшением числа выделяющихся на разрезе осей синфазности, что, по-видимому, и объясняется подавлением интерференции волн в ближней зоне приемника. Как видно из рассмотрения фрагмента временного разреза, приведенного на рис. 6 а, качество регистрации колебаний геофонами было невысоким, поэтому эффект подавления интерференции волн в ближней зоне приемника хоть и очевиден, но далек от идеального.

На рисунке 7 приведены фрагменты временных разрезов, полученных в результате аналогичных преобразований, но по исходным материалам с лучшим качеством регистрации данных геофонами (рис. 7 а) и гидрофонами (рис. 7 б). Район работ – транзитная зона Северного Каспия. Рассмотрение приведенных разрезов иллюстрирует

эффективность подавления интерференции волн в ближней зоне приемника в результате суммирования исходных данных (рис. 7 в) по разработанному алгоритму.

В системе XZone® Marsh Line, серийно выпускаемой компанией «СИ Технологии», наряду с отдельной регистрацией данных геофонами (Z) и гидрофонами (P), будет предусмотрен опциональный вариант регистрации суммарных (PZ) данных. В заключение, необходимо отметить, что, несмотря на кажущуюся простоту вопроса, авторам не удалось найти ни одной российской публикации на рассматриваемую тему.

Список использованной литературы:

1. Жгенти С.А. «Сбор сейсмических данных и телеметрия переходных зон». «Приборы и системы разведочной геофизики». ЕАГО, 03/2005г.
2. «Морская сейсморазведка» под редакцией А.Н.Телегина. – М.: ООО «Геоинформмарк», 2004.
3. Denis Mougenot «Транзитная зона: последний рубеж сейсморазведки». «Приборы и системы разведочной геофизики». ЕАГО, 01/2005г.
4. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка: Учебник для вузов. Тверь: Издательство АИС, 2005г.
5. Соловьянова И.П., Шабунин С.Н. Теория волновых процессов: Акустические волны: Учебное пособие. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 142 с. ISBN 5-321-00398-X.
6. Hofte, B. H., Lines, L. R., and Cary, P. W., 2000, Applications of OBC Recording. - The Leading Edge, April 2000, Vol. 19, No. 4.
7. Mathias Johansson, "The Hilbert transform", Vaxjo University, 1999.