



## ВОЗМОЖНОСТЬ СОЗДАНИЯ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ АНТЕНН МАЛЫХ ВОЛНОВЫХ РАЗМЕРОВ ДЛЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

### Часть 3. Анализ возможности применения в составе донных регистраторов\*

**В.В. Калинин, М.Л. Владов, А.А. Егоров**

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1; e-mail: vladov@geol.msu.ru, anton2legorov@mail.ru*

В статье анализируются возможности использования однонаправленных антенн малых размеров, рассматриваемых в предыдущих статьях данного цикла, для подавления кратных волн в водном слое со стороны приемника (т. е. нисходящего волнового поля). Исследуется целесообразность их применения в виде донных регистраторов для морской сейсморазведки. Приводятся расчеты размера антенны, необходимого для достижения различных отношений сигнал / шум.

*Морская сейсморазведка, однонаправленные антенны, подавление волн-спутников, диаграммы направленности*

## THE POSSIBILITY OF CREATING SMALL UNIDIRECTIONAL ANTENNAE FOR SEISMIC EXPLORATION Part 3. Analysis of application as sea-bottom stations

**V.V. Kalinin, M.L. Vladov, A.A. Egorov**

*Moscow State University  
119991, Moscow, GSP-1, Leninskye Gory, 1; e-mail: vladov@geol.msu.ru, anton2legorov@mail.ru*

We analyze the possibilities of using unidirectional antennae discussed in previous publications of the same series, for suppression of receiver ghosts (i.e., the downgoing wavefield at the receiver). The practical capabilities of these antennae as sea-bottom seismographs are being investigated. Calculations are applied to estimate the antenna size required to achieve different signal / noise ratios.

*Marine seismics, unidirectional antennae, deghosting, directivity plots*

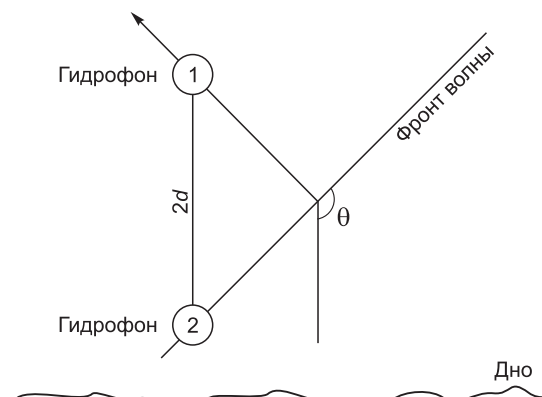
### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в морской сейсморазведке существует большое количество технологий подавления кратных волн от границы вода–воздух со стороны приемника: использование двухкомпонентной регистрации (PZ-суммирование данных гидрофона и геофона), одновременная буксировка двух кос на разных глубинах, наклонная буксировка кос и др.

В предыдущих работах данного цикла [Калинин, Владов, 2009а, б] была предложена технология подавления кратных волн в водном слое со стороны приемника (т. е. нисходящего волнового поля). Настоящее исследование проведено с целью оценки перспектив применения этой технологии в морской сейсморазведке. Нами проанализировано влияние размера описываемой далее антенны на выходной сигнал (в предыдущих статьях подобные расчеты не приводились), построена диаграмма направленности и рассчитано отношение сигнал / шум. В рамках данного исследования рассматривается также применение одного из способов обработки данных, полученных на разных уровнях регистрации и описанного в работе [Монк, 1990].

Исследуемая антенна состоит из нескольких вертикально разнесенных гидрофонов. Мы ограничимся рассмотрением антенны из двух датчиков (рис. 1).

Для корректной работы данной технологии необходимо, чтобы чувствительности гидрофонов были противоположны. Этого можно добиться сменой полярности одного из датчиков. Согласно технологии в запись верхнего гидрофона вводится временная задержка  $\frac{2d}{c}$  ( $d$  – половина расстояния между гидрофо-



**Рис. 1.** Схематическое изображение антенны из двух гидрофонов.

\* Части 1 и 2 см.: [Калинин, Владов, 2009а, б].

нами,  $c$  – скорость акустических волн в воде), после чего записи суммируются. В результате этой операции происходит полное подавление нисходящего волнового поля для нормального падения. Подобная система обладает кардиоидной характеристикой направленности при достаточно малом отношении размеров антенны и длин волн  $\frac{4\pi d}{\lambda}$  ( $\lambda$  – длина волны). Как следует из работы [Калинин, Владов, 2009а], достаточно отношения  $\frac{4\pi d}{\lambda} = 0.4$ . Кардиоида – это кривая в полярных координатах, задающаяся следующим уравнением:

$$\Phi(\theta) = (1 + \sin \theta) / 2, \quad (1)$$

где  $\Phi$  – характеристика направленности,  $\theta$  – угол подхода волны, угол  $\theta = 270^\circ$  соответствуют подходу волны сверху. Видно, что при данном угле подхода характеристика направленности обращается в нуль.

### ФОРМА ВЫХОДНОГО СИГНАЛА

Отличим предлагаемой конфигурации от часто используемой в настоящее время технологии *PZ*-суммирования является форма выходного сигнала. В результате применения технологии *PZ*-суммирования происходит разделение волновых полей на восходящее и нисходящее, таким образом, на выходе получается поле восходящих волн с формой волны, аналогичной форме волны давления на входе системы, увеличенной в 2 раза по уровню амплитуд.

В случае использования антенны из двух вертикально расположенных гидрофонов ситуация несколько сложнее. Как следует из выкладок в работе

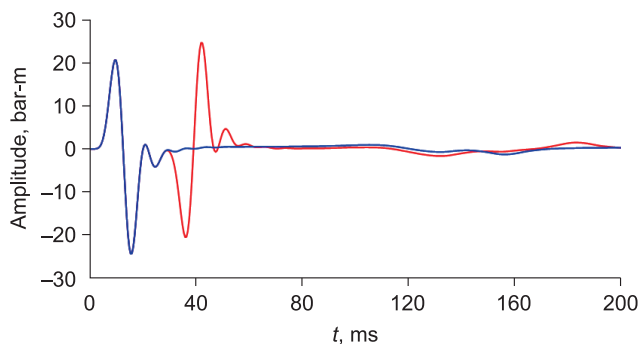


Рис. 2. Входной сигнал (синий) и сигнал с волной-спутником (красный), глубина регистрации 20 м.

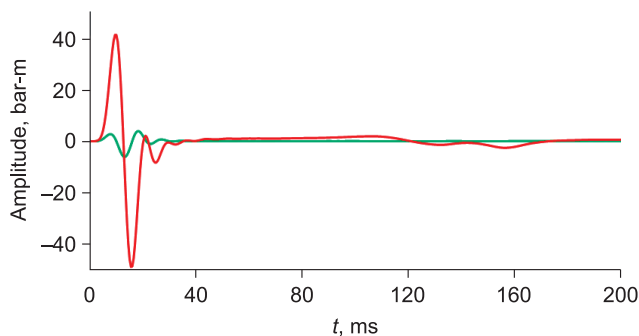


Рис. 3. Выходные сигналы в случае *PZ*-суммирования (красный) и в случае использования антенны из двух гидрофонов (зеленый).

[Калинин, Владов, 2009а], в данном случае при соблюдении отношения  $\frac{4\pi d}{\lambda} = 0.4$  сигнал на выходе системы будет повторять форму производной входной волны давления. Поскольку в случае расположения датчиков в водной толще давление прямо пропорционально скорости колебаний частиц среды ([Там же]), данная антенна будет измерять производную скорости, т. е. ускорение.

Получающиеся в результате использования различных технологий подавления нисходящего волнового поля формы сигнала приведены на рисунках ниже. В качестве входного сигнала (рис. 2) использована сигнатура группового пневмоисточника с учетом волны-спутника со стороны источника. Сигнал для антенны из двух вертикально расположенных гидрофонов смоделирован для расстояния между гидрофонами 37.5 см. Подробнее вопрос расстояния между гидрофонами будет рассмотрен ниже, заранее можно сказать, что форма сигнала всегда будет повторять форму производной скорости в случае достаточно малых размеров антенны.

На рис. 3 приведены полученные выходные сигналы. Видно, что при использовании антенны сигнал уменьшается по амплитуде и становится трехфазным. Выходной сигнал прямо пропорционален производной входного, поэтому он является более высокочастотным,  $S_{\text{вых}}(j\omega) \sim S_{\text{вх}}(j\omega) * j\omega$ .

Стоит также заметить, что при использовании антенны из двух гидрофонов удается обойти одну из проблем *PZ*-суммирования – приведение датчиков друг к другу [Гуленко, Шумский, 2007], так как гидрофоны в этой антенне идентичны друг другу.

### СВОЙСТВА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ДАННОЙ АНТЕННЫ И ОЦЕНКА НЕОБХОДИМЫХ РАЗМЕРОВ

Как видно из формулы (1) для диаграммы направленности, ее форма зависит только от угла подхода волны. Но данная формула – результат идеализированного взгляда на данную антенну, так как диаграмма направленности получена для ограничения на размеры антенны  $\frac{4\pi d}{\lambda} \leq 0.4$ . Соответственно размер антенны ограничен сверху. В табл. 1 приведен максимальный размер антенны для разных верхних частот сигнала (при расчете использована скорость в воде 1500 м/с).

Таблица 1

Расчет максимального размера антенны для критерия  $\frac{4\pi d}{\lambda} \leq 0.4$

Граничная частота сигнала, Гц	Максимальный размер антенны, см
1	9000
10	900
30	300
50	180
75	120
100	90
250	36
500	18
1000	9

## Расчет максимального размера антенны

для критерия  $\frac{4\pi d}{\lambda} \leq 1$ 

Граничная частота сигнала, Гц	Максимальный размер антенны, см
1	24000
10	2400
30	800
50	480
75	320
100	240
200	120
250	96
500	48
1000	24

Стоит рассмотреть вопрос изменения диаграммы направленности при увеличении размера. Для этого рассмотрим изначальное выражение для спектра выходного сигнала данной антенны, приведенное в статье [Калинин, Владов, 2009a]:

$$S_{\text{вых}}(j\omega) = S_{\text{вх}}(j\omega) 2jse^{-\frac{j\omega(\tau+\tau_0)}{2}} \sin\left(\frac{4\pi d(1+\sin\theta)}{2\lambda}\right).$$

Диаграмму направленности определяет последний множитель:  $\sin\left(\frac{4\pi d(1+\sin\theta)}{2\lambda}\right)$ . В указанной статье делается предположение о малости  $\frac{4\pi d}{\lambda}$  ( $\frac{4\pi d}{\lambda} \ll 1$ ), что

приводит к эквивалентности выражения под знаком внешней функции синуса своему аргументу (как синуса малого угла), следствием чего становится диаграмма направленности в форме кардиоиды

$\frac{4\pi d}{\lambda} * \frac{1+\sin\theta}{2}$ , где  $\frac{4\pi d}{\lambda}$  – масштабирующий множитель. Условие  $\frac{4\pi d}{\lambda} \ll 1$  выполняется уже при  $\frac{4\pi d}{\lambda} \leq 0.4$ .

Для исследования свойств диаграммы направленности антенны больших размеров стоит отбросить это предположение и построить исходную функцию  $\sin\left(\frac{4\pi d(1+\sin\theta)}{2\lambda}\right)$  для различных  $\frac{4\pi d}{\lambda} > 0.4$ . Это и было

сделано в настоящей работе. Результат приведен на рис. 4 и 5, в ненормированном и нормированном виде (значение диаграммы направленности для нормального падения восходящих волн принято за 1, диаграммы для  $\frac{4\pi d}{\lambda} = 2.5$  и  $\frac{4\pi d}{\lambda} = 3$  не изображены в нормированном виде из-за их явной непригодности для поставленной задачи).

Как видно из приведенных иллюстраций, в действительности диаграмма направленности такой антенны имеет форму, схожую с кардиоидой вплоть до  $\frac{4\pi d}{\lambda} = 1$ , при больших значениях этого отношения кардиоиды “расширяется” и при  $\frac{4\pi d}{\lambda} = 3$  она абсолютно перестает принимать субвертикально передающи-

еся колебания. Таким образом, при оценке максимально возможных размеров антенны можно использовать критерий  $\frac{4\pi d}{\lambda} \leq 1$  или  $L \leq 0.16\lambda_{\min}$ , где  $L$  – размер

антенны ( $L=2d$ ), а  $\lambda_{\min}$  – наименьшая длина волны. Расчет максимального размера антенны с использованием этого критерия для разных частот приведен в табл. 2.

Снизу размеры антенны теоретически не ограничены (в рамках принятой модели), но при использовании антенны малых размеров и предложенного в предыдущих статьях цикла [Калинин, Владов, 2009а, б] алгоритма обработки данных размеры антенны существенно влияют на ее помехоустойчивость и, соответственно, на отношение сигнал / шум результирующих данных. Поэтому в настоящей статье дополнительно исследуется вопрос помехоустойчивости.

Приведенные ниже расчеты выполнены с использованием сигнала пневматического источника (форму сигнала см. на рис. 6), поэтому выводы о размерах антенны верны исключительно для данного источника, хотя в первом приближении их можно использовать для других сигналов со схожим частотным диапазоном (рис. 7).

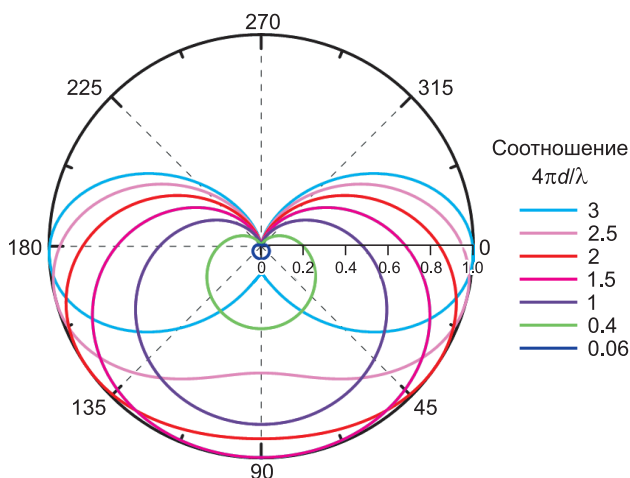


Рис. 4. Диаграммы направленности для различных значений  $\frac{4\pi d}{\lambda}$ .

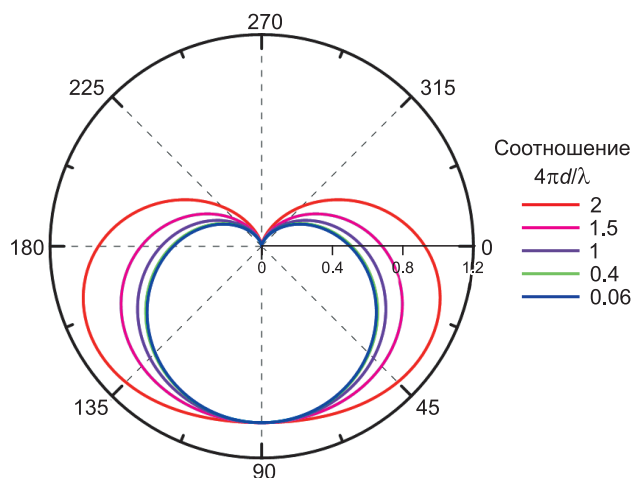


Рис. 5. Диаграммы направленности для различных значений  $\frac{4\pi d}{\lambda}$  в нормированном виде.

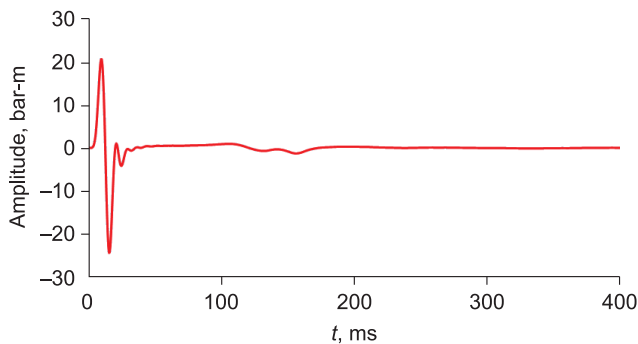


Рис. 6. Форма сигнала пневматического источника.

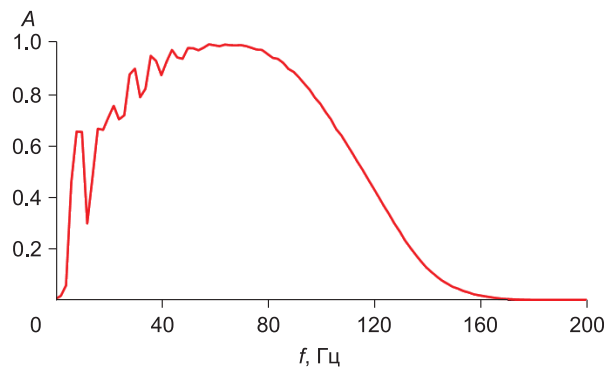


Рис. 7. Нормированный амплитудный спектр сигнала пневматического источника.

Для настоящего исследования нами были смоделированы сигналы для антенн из двух гидрофонов разного размера по вертикали. Размер антенны варьировал от 7.5 см до 7.5 м. Глубина верхнего гидрофона антенны принята фиксированной и равна 20 м. В исходный сигнал каждого из гидрофонов был введен белый шум, ограниченный полосой частот 3–200 Гц с тремя разными отношениями сигнал / шум – минимальным (6), средним (11) и максимальным (16), рассчитанными для гидрофона на примере полевых данных, полученных с помощью донного оборудования в процессе опытно-методических работ (ОМР) в Печорском море при глубинах воды около 20 м. Шаг дискретизации – 2 мс. С учетом того, что шум на исходной записи не менялся, а варьировали только размеры антенны, полученные результаты отражают исключительно влияние размера антенны на отношение сигнал / шум результирующей записи (при этом отражается общая тенденция, конкретные значения могут несколько измениться для других характеристик сигнала) (рис. 8).

Далее с этими исходными данными был смоделирован сигнал после применения антенны (после введения временного сдвига в сигнал верхнего гидрофона и вычитания).

По смоделированному результату применения антенны также рассчитывалось отношение сигнал / шум

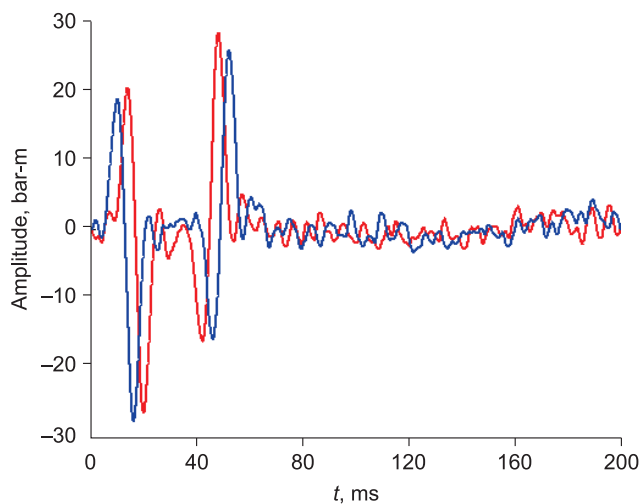


Рис. 8. Сигнал с верхнего (красный) и нижнего (синий) гидрофонов после добавления шума (отношение сигнал / шум 11).

(табл. 3). Отношение сигнал / шум рассчитывалось аналогично расчету на полевых данных, по среднеквадратичным амплитудам в окнах (на рис. 9 окно сигнала – зеленый прямоугольник, окно шума – красный).

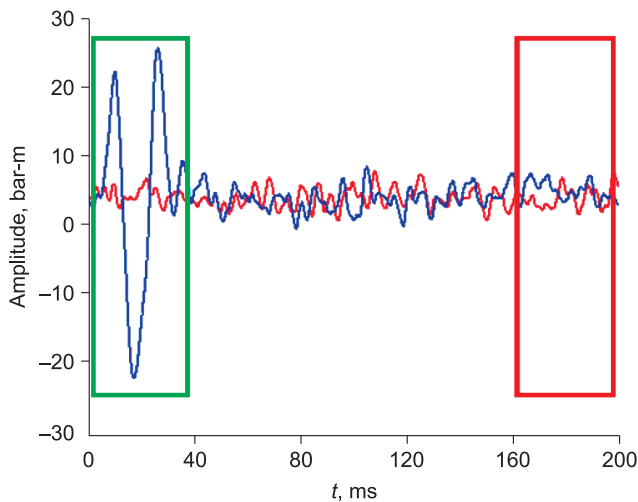
Как отмечалось ранее, одной из существенных проблем процедуры *PZ*-суммирования является повышенная зашумленность данных геофона и, соответственно, необходимость проводить дополнительное шумоподавление, что не всегда позволяет сохранить качество данных после суммирования [McLain et al., 2010]. Из табл. 3 видно, что в результате применения исследуемой антенны, как и в случае классической конфигурации геофон–гидрофон, ухудшается отношение сигнал / шум. С помощью данных ОМР на шельфе Печорского моря было определено среднее отношение сигнал / шум для геофонов (3) и гидрофонов (11). Отношение сигнал / шум, которое будет иметь результирующая запись после приведения к одному уровню амплитуд и суммирования таких данных, равно приблизительно 6.

Таким образом, можно сделать вывод, что антенна гидрофон–гидрофон имеет большее относительно системы геофон–гидрофон отношение сигнал / шум

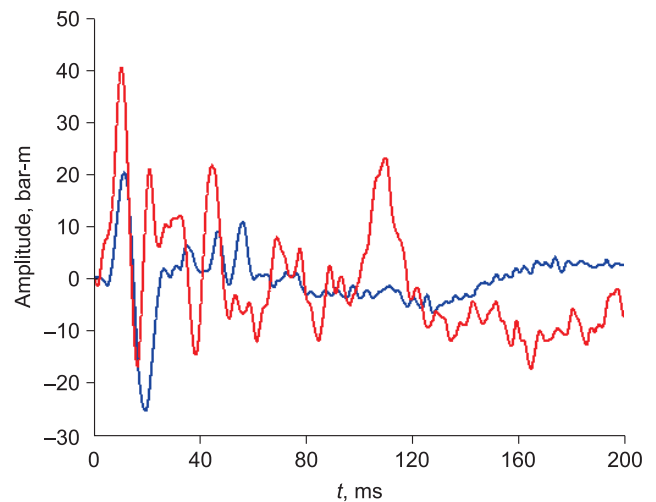
Таблица 3

Расчет отношения сигнал / шум для разных размеров антенны

Размер антенны (см)	Отношение сигнал / шум в результате применения антенны при исходном отношении:		
	$S / N = 6$	$S / N = 11$	$S / N = 16$
7.5	1	1.1	1
30	1.3	1.7	1.8
45	1.5	2.2	3.0
60	1.8	3.2	4.3
75	2.2	3.5	4.8
90	2.5	4.3	6.1
105	2.8	5.4	7.1
120	3.1	6.1	8.1
150	3.7	7.3	9.2
180	4.8	8.0	10.7
210	5.4	8.6	13.7
240	5.7	11	14.2
270	6	11	15.4
300	6	11	16



**Рис. 9.** Сигнал после регистрации с помощью антенны из двух гидрофонов (исходное отношение сигнал / шум 11) для длины антенны 7.5 см (красный) и 7.5 м (синий).



**Рис. 10.** Сигнал антенны из двух гидрофонов после обработки способом вычитания из суммотрассы интеграла разностной трассы (исходное отношение сигнал / шум 11) для длины антенны 7.5 см (красный) и 7.5 м (синий).

при размерах более 120 см. А при таком размере, согласно критерию  $\frac{4\pi d}{\lambda} \leq 1$  и данным табл. 2, кардиоидная диаграмма направленности обеспечивается до частот 200 Гц.

#### ПРИМЕНЕНИЕ ЕЩЕ ОДНОГО СПОСОБА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ГРУПП

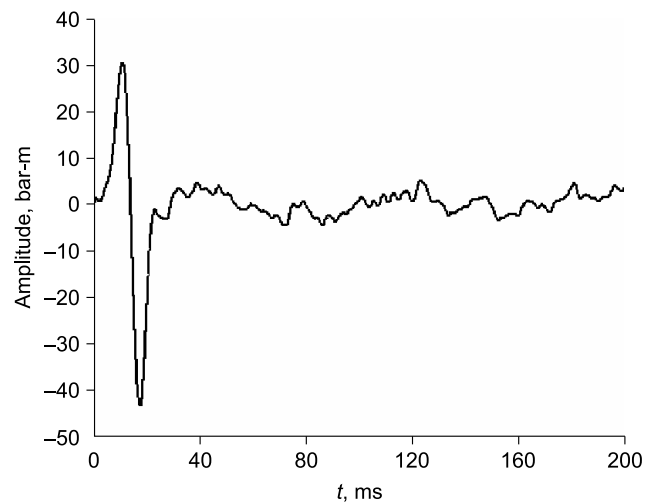
Кроме описанного в работе [Калинин, Владов, 2009а] способа обработки данных на разных уровнях (ввод задержки и вычитание данных), существует еще несколько. При проведении исследования нами опробован также способ вычитания из суммотрассы интеграла разностной трассы (подробно теорию этого

метода см.: [Monk, 1990]). Для данного способа обработки было проанализировано отношение сигнал / шум при разных расстояниях между гидрофонами (табл. 4). Результаты показывают, что способ [Monk, 1990] является менее устойчивым по отношению к данной модели шума. Это происходит из-за усиления низкочастотного шума процедурой интегрирования (низкочастотный шум виден на результатах обработки сигнала на рис. 10). Результаты показывают, что из-за использования в теории способа при разложении поля только элементов ряда Тейлора первого порядка на больших расстояниях между гидрофонами происходит неполное подавление волны-спутника (например, на временах 40–60 мс на синем графике рис. 10). Идеальными с точки зрения подавления волны-спутника в данном случае являются размеры антенны около 3.7–4.0 м (рис. 11).

Таблица 4

Расчет отношения сигнал / шум для разных размеров антенны

Размер антенны (см)	Отношение сигнал / шум в результате применения антенны при исходном отношении:		
	$S / N = 6$	$S / N = 11$	$S / N = 16$
7.5	1	1	1.2
30	1.1	1.2	1.3
60	1.2	1.9	1.7
90	1.5	2.4	2.4
120	2.3	3.0	2.8
150	2.4	3.2	3.1
180	2.6	3.3	4
240	2.8	4	6.2
300	3.2	5.7	6.5
360	3.6	6.1	9.8
420	3.8	6.9	10.3
540	4.4	8.7	12.3
600	4.6	8.8	13.1
720	4.8	9	14
750	5.9	9	15



**Рис. 11.** Сигнал антенны из двух гидрофонов после обработки способом вычитания из суммотрассы интеграла разностной трассы (исходное отношение сигнал / шум 11) для длины антенны 3.75 м.



## ВЫВОДЫ

Нами исследованы свойства группы из двух вертикально расположенных гидрофонов, созданной для подавления нисходящего волнового поля: форма выходного сигнала такой антенны и ограничения на ее размеры.

Из проведенного исследования можно сделать вывод, что при изменении размера антенны изменяются два основных параметра: ее диаграмма направленности (полоса частот, для которой диаграмма направленности является кардиоидной) и отношение сигнал / шум результирующих данных. Для каждой конкретной частоты существует некая максимальная длина антенны, при превышении которой диаграмма направленности перестает быть кардиоидной. При уменьшении же размера антенны уменьшается ее помехоустойчивость, следовательно, чем меньше антенна, тем меньше отношение сигнал / шум на результирующих данных. Исследование показало, что отношение сигнал / шум после применения антенны идентично исходному отношению на гидрофоне в случае размера антенны около 3 м. При этом условии антенна является антенной малых размеров только до

частот в 75 Гц согласно критерию  $\frac{4\pi d}{\lambda} \leq 1$  и только до

этих частот имеет кардиоидную характеристику направленности. Соответственно, для расширения полосы размер антенны необходимо уменьшить. Сравнение с отношением сигнал / шум в результате суммирования данных геофона и гидрофона показало, что использование антенн из двух гидрофонов длиной более 120 см позволит получить лучшее качество результирующей записи после вычитания. Но и в этом случае кардиоидная характеристика направленности будет сохраняться в ограниченной полосе частот – до 200 Гц в случае длины антенны 120 см и до 130 Гц в случае длины 180 см. При этом использование антенны длиной 180 см позволяет повысить отношение сигнал / шум на треть в сравнении с системой геофон-гидрофон.

Резюмируя вышесказанное, мы приходим к выводу, что антенну из двух гидрофонов нецелесообразно использовать в транзитной зоне или на предельном мелководье в виде донных станций в присутствии течений, так как антенны большой высоты будут подвержены влиянию движения воды, что создаст дополнительные шумы. Несмотря на то, что получившиеся в результате данного исследования размеры антенн слишком велики, в дальнейшем возможно рассмотрение систем из большего числа гидрофонов, а также численный анализ возможности данной конфигурации при работе с более высокочастотными источниками колебаний (например, спаркером).

*Авторы работы выражают благодарность С.В. Горбачеву, начальнику отдела геофизики ООО "РН-ШЕЛЬФ-АРКТИКА", за конструктивную критику и помощь в написании данной статьи.*

## Литература

Гуленко В.И., Шумский Б.В. Технологии морской сейсморазведки на предельном мелководье и в транзитной зоне. Краснодар: Изд-во КубГУ, 2007.

Калинин В.В., Владов М.Л. Возможность создания однонаправленных антенн малых волновых размеров для сейсморазведки. Ч. 1: Приближение плоских волн // Технологии сейсморазведки. 2009а. № 2. С. 33–37.

Калинин В.В., Владов М.Л. Возможность создания однонаправленных антенн малых волновых размеров для сейсморазведки. Ч. 2: Приближение сферических волн // Технологии сейсморазведки. 2009б. № 3. С. 15–19.

McLain B., Carter C., Akkanti S. et al. Attenuation of geophone-component OBC noise: a case study from the Gulf of Khambhat // 80<sup>th</sup> SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts. 2010. P. 3560–3564.

Monk D.J. Wavefield separation of twin streamer data // First Break. 1990. V. 8, N 3. P. 96–104.

*Поступила в редакцию 29 мая 2014 г.,  
в окончательном варианте – 27 июня 2014 г.*

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

**КАЛИНИН Виктор Васильевич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

**ВЛАДОВ Михаил Львович** – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.  
E-mail: vladov@geol.msu.ru

**ЕГОРОВ Антон Алексеевич** – студент магистратуры кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.  
E-mail: anton21egorov@gmail.com