

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 550.34.062

М.В. Алёшкин<sup>1</sup>

## МЕТОДИКА ПОДАВЛЕНИЯ ПОВТОРНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ПНЕВМОИСТОЧНИКА В МОРСКОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ НА МЕЛКОВОДЬЕ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,  
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

Lomonosov Moscow State University, 119991, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Наряду с электроискровыми и электродинамическими источниками, используемыми в основном в работах, направленных на исследование верхней части разреза, к числу невзрывных источников, получивших широкое распространение, относятся пневматические источники. Этот тип источников в теории соответствует всем требованиям, предъявляемым к геофизической аппаратуре. Основная проблема, осложняющая работу, заключается в наличии интенсивных пульсаций, большой длительности излучаемых сигналов, а также в не очень высокой надежности некоторых конструкций.

Особенно остро встает проблема пульсаций при работах на мелководье. Малая глубина воды не позволяет извлечь сигнатуру, приемлемую для построения результирующего оператора, из данных в связи с интерференцией пульсаций от прямой волны с дном, а оператор подавления, извлеченный из теоретической сигнатуры, часто дает неприемлемый результат.

Для решения проблемы подавления вторичных пульсаций от пневмоисточников на мелководье предлагается совокупное использование информации о вторичных пульсациях, извлеченной из прямой волны и извлеченной из донного отражения, предсказывающей деконволюции по форме сигнала и алгоритмам адаптивного вычитания.

*Ключевые слова:* пневмоисточники, морская сейсморазведка, сигнатурная деконволюция, вторичные пульсации, волна-спутник.

Also, as electric spark and electrodynamic sources, used mainly in works of the upper part of the section, non-explosive sources, which have become widespread, include pneumatic sources. This type of sources meets all the requirements for geophysical equipment. The main problem of such kind of sources is the presence of intense pulsations, long duration of the emitted signals, as well as not very reliability of some clusters.

Especially topical is the problem of pulsations during the shallow water acquisitions. The shallow water depth does not allow to extract the signature acceptable for the construction of the effective operator from the data due to the interference of pulsations from the direct wave with the bottom, and the suppression operator which extracted from the theoretical signature, often gives an unacceptable result.

To solve the bubble oscillation problems in shallow-water acquisition, it is proposed to use combined information of bubble oscillation extracted from a direct wave, extracted from bottom reflection, waveform predicting deconvolution and adaptive subtraction algorithms.

*Key words:* air guns, marine seismic, signature deconvolution, bubble oscillations, ghost-wave.

**Введение.** Проблема образования и подавления вторичных пульсаций источника типа центр расширения (в частности, пневмоисточника) при морских работах хорошо изучена теоретически. Процессы образования, распространения и затухания волн описаны в литературе по морской сейсморазведке, например в [Баум и др., 1975]. На практике же геофизики часто сталкиваются с несовершенством системы наблюдений и аппаратуры. Рассмотрим эту проблему на примере пневмоисточника. К одному из популярных подходов к подавлению вторичных пульсаций можно отнести использование пневмопушек с особым устройством пневмокамер. В парогазовую полость,

образовавшуюся после срабатывания источника, происходит вторичный выпуск воздуха. При таком подходе происходит резкое уменьшение скорости схлопывания полости, в результате пульсация ослабляется. В пневмоисточниках такого вида используются две воздушные камеры. После срабатывания первой камеры (генератор) и расширения полости до максимального радиуса происходит срабатывание второй камеры (инжектор). При правильном подборе объемов таких пневмокамер ( $I=G \cdot n$ , где  $n=3,4$ ) можно добиться почти полного подавления пульсаций, но общий КПД такой системы, соответственно, будет ниже в  $n$  раз [Гуленко, 2003]

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, аспирант; e-mail: mark\_aleshkin@mail.ru

**Гидродинамика подводного взрыва.** Вторичные пульсации источника возникают следующим образом. При срабатывании пневмопушки под водой образуется полость с газами под высоким давлением. Пока давление газа превышает гидростатическое давление окружающей водной толщи, под его воздействием масса воды будет двигаться с ускорением от точки взрыва. Сила давления уменьшается по мере расширения пузыря газа и становится равной нулю, когда расширение пузыря снижает давление газа до гидростатического [Калинин, Калинин, 1976]. Но поскольку в этот момент водная масса достигает максимальной скорости движения от источника, она по инерции продолжает двигаться в том же направлении, но уже с замедлением, так как результирующая сила теперь направлена внутрь. Через некоторое время движение водной массы прекращается, затем сила, направленная внутрь, вызывает схлопывание полости с последующим резким увеличением давления газа, и процесс повторяется. В результате этого газовый пузырь пульсирует, и при каждой пульсации возбуждаются сейсмические волны [Шерифф, Гелдарт, 1987].

Если предположить жидкость несжимаемой, то легко показать, что движение границы описывается нелинейным дифференциальным уравнением 2-го порядка:

$$R'' + \frac{3}{2} \frac{R'^2}{R} = \frac{1}{\rho_0 R} (P - P_0). \quad (1)$$

Рассматривая схлопывание сферической полости, которая в начальный момент будет иметь радиус  $R_{\max}$  и давление  $P$  внутри, которое значительно меньше гидростатического давления  $P_0$ , и приняв, что такое соотношение значений давления сохраняется для большей части периода пульсаций, Релей получил простое решение:

$$R'' = \frac{2(P - P_0)}{3\rho_0} \left( \frac{R_{\max}^3}{R^3} - 1 \right) \approx \frac{3}{2} \frac{P_0}{\rho_0} \left( \frac{R_{\max}^3}{R^3} - 1 \right). \quad (2)$$

Это решение описывает схлопывание Релевской полости.

Если выразить максимальный радиус через величину полной энергии пульсирующего пузыря, то получим уравнение Релея–Виллиса:

$$T = 1,14 \sqrt{\rho_0} \frac{E^{1/3}}{P^{5/6}}. \quad (3)$$

Полученное выражение (3) очень удобно для оценки относительной энергии и акустических характеристик разных типов морских источников. Для процессов, сопровождающихся образованием сферических газовых полостей в воде, эта зависимость тем лучше согласуется с экспериментом, чем больше глубина погружения излучателя и чем

меньше теплообмен между газом, находящимся в пузыре, и окружающей жидкостью [Dragoset, 1990]. Формула (3) часто используется для расчетов во многих программных обеспечениях, но из-за ограничений, описанных выше, при описании акустических характеристик источника на мелководье не совсем применима [Алешкин, 2017].

На сейсмических данных сигнал вторичных пульсаций выглядит как события (обычно низкочастотные), повторяющие каждое отражение с определенным периодом, зависящим от характеристик пневмопушки, в первую очередь от ее объема. При этом энергия вторичных пульсаций может быть весьма высокой. Этот эффект весьма вреден, так как вторичные пульсации интерферируют с полезными отражениями, скрывая их.

**Волна-спутник.** Волны-спутники — помехи, возникающие при проведении морских и наземных сейсмических работ. Они образуются при заглуплении источников и приемников и связаны с отражением волн от свободной поверхности или от других контрастных границ в нижнее полупространство. Наличие волн-спутников искажает амплитудный и фазовый спектры сейсмического сигнала. Обычно они проявляются в ослаблении высоких и низких частот, а также в появлении нулей амплитудного спектра на некоторых частотах [Степанов и др., 2018], эта особенность приводит к ухудшению разрешающей способности сейсморазведки.

Анализ такого фактора, осложняющего сигнал, необходим при подборе параметров сигнатурной деконволюции и оказывает очень большое влияние на подобранный оператор подавления вторичных пульсаций. В некоторых случаях подавление волны-спутника и повторных пульсаций происходит одновременно, но в основном подавление волн-спутников происходит на последних этапах сигнальной обработки данных, что накладывает ограничения на оператор подавления вторичных пульсаций. Для борьбы с волнами-спутниками часто применяют нестандартные системы наблюдения, использующие многокомпонентную и многоуровневую регистрацию, многоуровневое возбуждение и наклонную буксировку сейсмической косы [Hopperstad, Laws, 2006]. Такие методические приемы борьбы со спутниками очень трудно применять на предельном мелководье, возможный шаг изменения заглупления сейсмической косы незначителен, а работа с наклонной косой возможна только при использовании короткой косы, что не соответствует большинству производственных технических заданий.

**Применение группирования пневмоисточников для подавления вторичных пульсаций.** Наряду с использованием отдельно взятых пневмоисточников широкое распространение получила технология их группирования. Следовательно, применение группы пневмопушек разного объема с разными

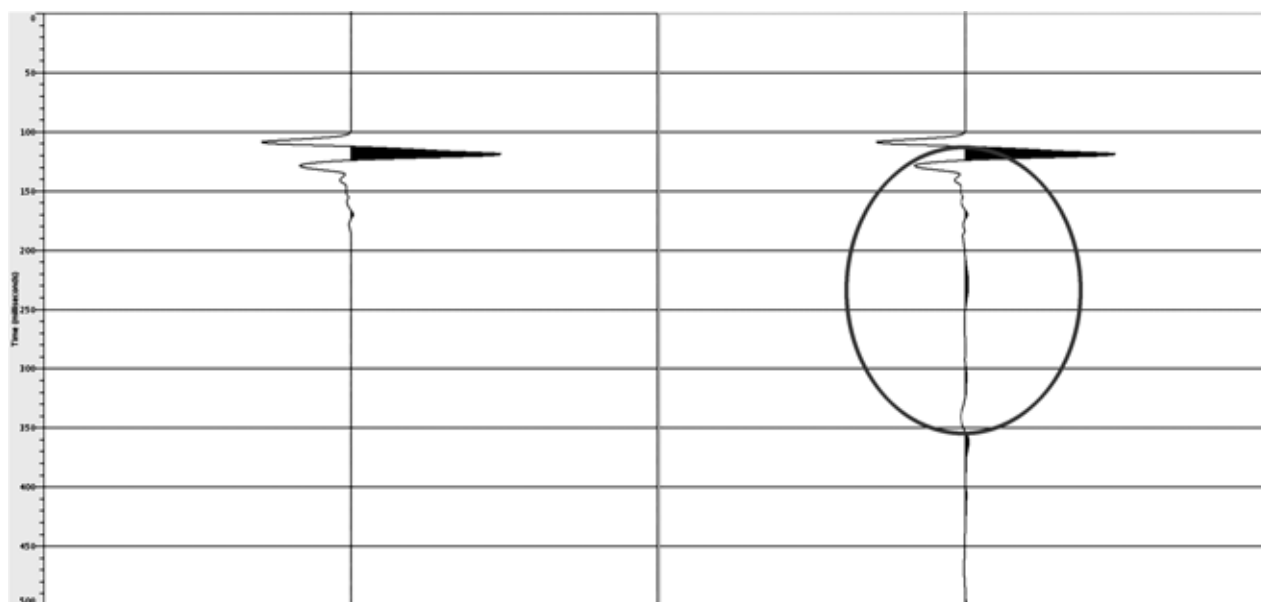


Рис. 1. Извлеченная сигнатура после применения оператора подавления вторичных пульсаций на основе фильтра соответствия (слева) и извлеченная сигнатура, после применения операторов подавления вторичных пульсаций, полученных с использованием предсказывающей деконволюции (справа). Овалом выделена область, показывающая ошибки в работе оператора

периодами колебаний позволяет уменьшить вторичные пульсации, так как при интерференции сигналов вторичные колебания складываются в противофазе, а также повысить интенсивность первого импульса давления и создать направленное излучение [Dragoset, Hargreaves, 2003].

В случае повышения интенсивности первого импульса базу группирования и расстояния между источниками выбирают минимально возможными исходя из требований независимого процесса пульсации газовых полостей. В случае ослабления пульсаций, как описано выше, база выбирается, как длина интерференционной системы для ослабления волн помех, она должна быть не меньше преобладающей длины волны. Предельное мелководье создает проблему для группирования пневмоисточников, так как на глубине менее 2 м часто становится невозможно соблюдать оптимальный параметр заглупления сейсмоисточников [Giles, Johnson, 1973].

**Сигнатурная деконволюция на этапе обработки данных.** Так как полностью решить проблему возникновения вторичных пульсаций на этапе подбора методики и при проведении полевых работ не удастся, то эта проблема переходит в проблему математической обработки сейсмических сигналов.

При обработке сейсмограмм, полученных в результате морской сейсмической разведки, сигнатура включает в себя, как описано выше, помимо прочих факторов, волны-спутники со стороны источника и приемника. Кажется, на первый взгляд, что подобрать обратный фильтр и применить его к данным составляет достаточно простую задачу, но это не так по нескольким причинам:

1) амплитудный спектр имеет глубокий провал по частоте, определяемый глубиной источника;

2) вариации глубины источника в ходе работ приводят к смещениям провала в спектре;

3) мелкая глубина воды — в таком случае вторичные пульсации могут интерферировать с кратной волной, поэтому становится невозможно извлечь сигнатуру из данных, если при проведении работ глубина изменялась незначительно.

При подборе оператора подавления вторичных пульсаций обычно используется несколько стандартных подходов:

- 1) предсказывающая деконволюция;
- 2) получение оператора из теоретически рассчитанной сигнатуры;
- 3) получение оператора из сигнатуры, извлеченной из полевых данных (прямая волна, донное отражение).

Применение оператора, полученного с помощью предсказывающей деконволюции, не всегда дает удовлетворительный результат, так как при применении оператора подавления пульсаций на полевых данных возникают высокочастотные помехи, хотя на извлеченной или смоделированной сигнатуре получается приемлемый результат.

Получение оператора из теоретической сигнатуры часто не приносит желаемого результата. Стандартные алгоритмы расчета сигнатур, представленные в программном обеспечении, моделируют сигнатуру в ближней зоне, а рассчитанный оператор применяется к данным, которые получены в дальней зоне источника (рис. 1, 2).

Еще одну проблему представляет отсутствие возможности моделировать волну-спутник со стороны приемника при моделировании сигнатуры в дальней зоне. Возникает проблема, связанная с применением модельного оператора к полевым данным, определяемая наличием в сейсмограм-

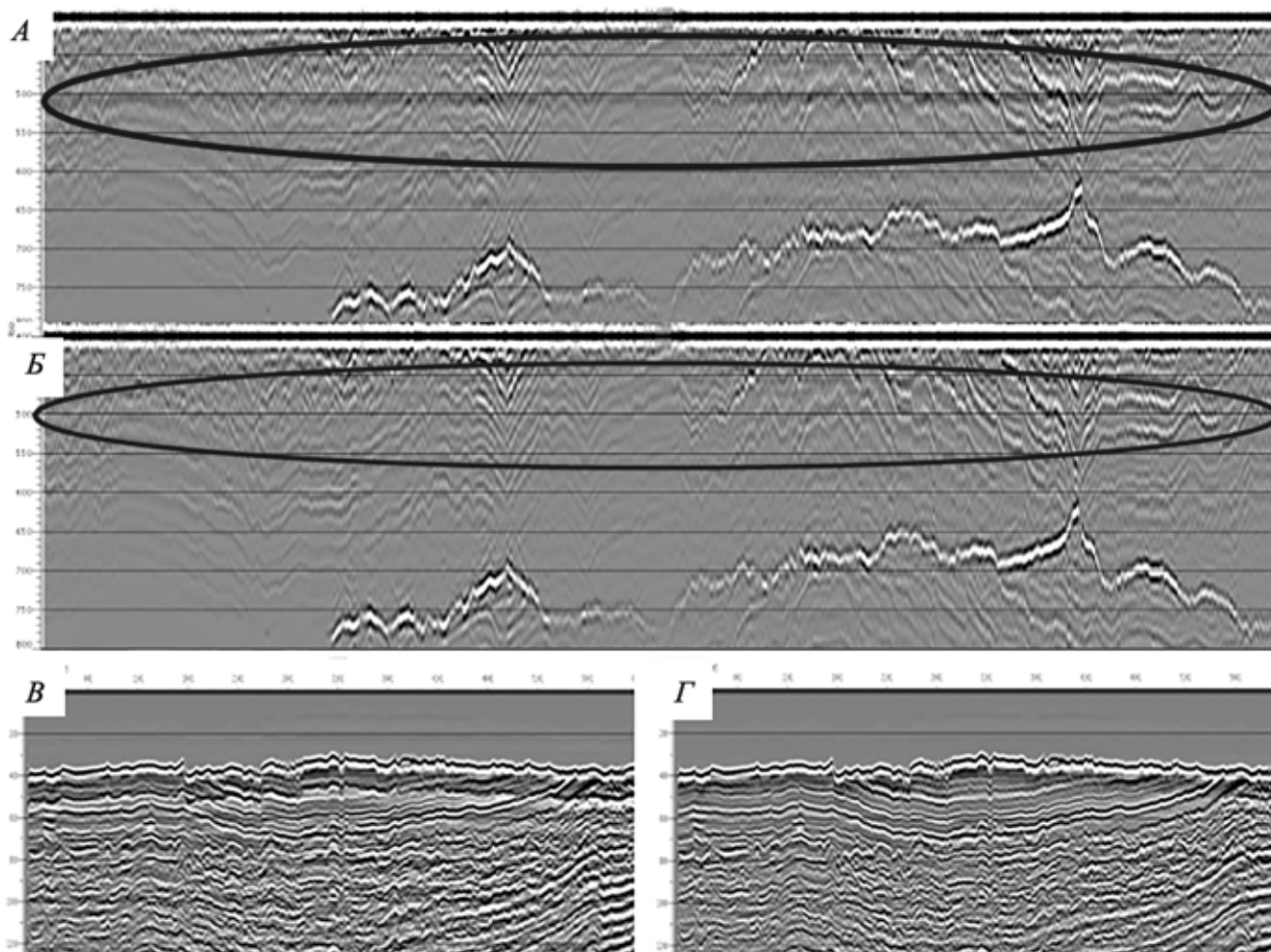


Рис. 2. Пример ФАК (А, Б), до подавления вторичных пульсаций (А) (овалом показана область проявления вторичных пульсаций) и после выполнения подавления вторичных пульсаций с использованием адаптивного вычитания (Б) (овалом показана область проявления вторичных пульсаций), временной разрез до подавления вторичных пульсаций (В) и после подавления вторичных пульсаций (Г)

мах помех разной природы, которые невозможно учесть при получении импульса. Фильтр рассчитывается при помощи средств решения обратных задач, тем самым его применение приводит к неустойчивости решения. В частности, выше отмечено наличие глубоких провалов в спектре исходного импульса, обусловленных волнами-спутниками. Обратный фильтр будет обеспечивать значительный рост энергии спектральных компонент. Так как в полевых данных присутствуют случайные и когерентные помехи, не имеющие провала в спектре, то применение такого оператора приведет к увеличению амплитуды помех.

Оператор детерминистической деконволюции, полученный из полевых данных (из прямой волны или донного отражения), показывает наилучшие результаты при достаточной накопленной

статистике и отсутствии интерференции с первой кратной волной от поверхности дна.

Такой подход хорошо показывает себя при глубоководных работах, но имеет ряд проблем при работе на мелководных акваториях.

**Выводы.** 1. Рассмотренные решения не позволяют подавить помеху полностью и достичь такого соотношения сигнал/шум, которое позволяет выделять изучаемые горизонты.

2. Предполагается использование всех рассмотренных решений в совокупности, включив их в общую систему адаптивного вычитания.

3. Использование при подавлении пульсаций теоретической сигнатуры, наиболее близкой к реальной, и формирование оператора из расчетной сигнатуры к практической требуют разработки специальных алгоритмов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алёткин М.В. Особенности обработки данных инженерной сейсмозащиты на акваториях // Тез. междунар. конф. «Инженерная геофизика 2017». М.: ЕАГО, 2017.

Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975. 704 с.

Гуленко В.И. Пневматические источники упругих волн для морской сейсмозащиты. Краснодар, Кубанский государственный университет, 2003.

Калинин А.В., Калинин В.В., Пивоваров Б.Л. Потенциальная эффективность группирования источников

в морской сейсморазведке // Прикладная геофизика. Вып. 82. М.: Недра, 1976.

*Степанов. Н.А., Ланцев В.В., Горбачев С.В. и др.* Специфика применения сигнатурной деконволюции на данных с нестабильным источником // Тез. междунар. геолого-геофизической конф. «Геоевразия-2018». М.: ЕАГО, 2018.

*Шерифф Р., Гелдарт Л.* Сейсморазведка. Т. 1. М.: Мир, 1987.

*Dragoset W.H.* Air-gun array specs: A tutorial // Geophysics: The leading edge of exploration. Texas, SEG, 1990.

*Dragoset W.H., Hargreaves N., Lerner K.* Air gun source instabilities and shot-by-shot signature deconvolution // Geophysics, Texas, SEG, 2003. Vol. 13. N 3. P. 45–52.

*Giles B.F., Johnston R.C.* System approach to air gun array design // Geophys. Prosp. 1973. Vol. 21, N 1. P. 77–101.

*Hopperstad J.F., Laws R.* Source Signature Estimation — Attenuation of the Seafloor Reflection Error in Shallow Water. Amsterdam, EAGE, 2006.

Поступила в редакцию 00.00.2019

Поступила с доработки 00.00.2020

Принята к публикации 00.00.2020