

УДК 550.34.062

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-5-109-116

ОСОБЕННОСТИ ПОДБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОРСКИХ ПНЕВМОИСТОЧНИКОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА

Марк Витальевич Алёшкин✉

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; mark_aleshkin@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-4920-3197>

Аннотация. В практике сейсморазведки высокого разрешения выбор параметров источника или группы источников часто осуществляется эмпирически или на основе предыдущих исследований без адаптации к региону. Такой подход не является корректным и зачастую приводит к снижению информативности получаемых данных. В связи с этим актуальной задачей становится разработка методики оптимизации параметров пневмоисточников, направленной на повышение эффективности сейсмических исследований.

Ключевые слова: сейсморазведка высокого разрешения (СВР), морская сейсморазведка, пневмоисточники, инженерно-геофизические исследования, оптимизация параметров

Для цитирования: Алёшкин М.В. Особенности подбора оптимальных параметров морских пневмоисточников при проведении работ по исследованию верхней части разреза // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 5. С. 109–116.

FEATURES OF THE SELECTION OF OPTIMAL PARAMETERS OF MARINE PNEUMATIC SOURCES WHEN CONDUCTING WORK ON THE STUDY OF THE UPPER PART OF THE SECTION

Mark V. Aleshkin✉

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; mark_aleshkin@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-4920-3197>

Abstract. In high-resolution seismic surveys, source parameters — whether for single sources or source arrays — are often selected empirically or based on prior studies without proper regional adaptation. This approach is methodologically flawed and frequently results in reduced data quality and interpretability. Consequently, there is a pressing need to develop a systematic methodology for pneumatic source optimization to enhance the efficiency and effectiveness of seismic surveys.

Keywords: high-resolution seismic exploration (HRSE), marine seismic exploration, pneumatic sources, engineering geophysical research, optimization of parameters

For citation: Aleshkin M.V. Features of the selection of optimal parameters of marine pneumatic sources when conducting work on the study of the upper part of the section. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 5: 109–116. (In Russ.).

Введение. В связи с усложнением задач, стоящихся перед инженерно-геофизическими исследованиями на акваториях, возникает необходимость получения максимально информативных данных высокого качества. Поэтому еще на этапе планирования и проектирования работы необходимо закладывать оптимальные параметры пневмоисточников, оптимизируя их для конкретных условий и геологического строения.

При работах методом сейсмики высокого разрешения (СВР) очень часто параметры источника, или группы источников, выбираются эмпирически или основываясь на схожих работах прошлых лет без привязки к региону. Такой подход не является корректным и очень часто не позволяет в процессе работ получить максимально информативные данные [Алёшкин, 2017].

Для проведения работ СВР обычно используются пневмоисточники малого объема: Sleeve Gun 10,20,

40 куб. дюймов, Bolt 1500 LL 40, 80 куб. дюймов, ПИ «Пульс», ПИ «Малыш» и др.

Комбинирование пневмоисточников различного объема в кластеры и изменение геометрии кластера пневмоисточников позволяет получить конфигурацию и методику возбуждения импульса давления (сигнатуры) для разнообразных условий, что позволяет управлять интенсивностью и формой зондирующего сигнала, добиваясь оптимального сигнала (сигнатуры) для конкретных условий [Алёшкин, 2017].

При планировании работ необходимо анализировать большое количество параметров, влияющих на качество получаемого материала предыдущих работ (геофизических, геологических и др.), в том числе и характеристики источника: геометрия группы, объем, характеристики направленности, глубина буксировки и др. [Гуленко, 2003].

Расчет и анализ вышеперечисленных параметров позволяет прогнозировать получаемые результаты

и анализировать зондирующую импульс (сигнатуру) на этапе, предшествующем проведению работ.

В работе рассматриваются вопросы выбора оптимальных параметров морских пневмоисточников для исследований верхней части разреза.

Актуальность проблематики. В аппаратурном комплексе морской сейсморазведки одним из наиболее важных элементов являются источники упругих колебаний, в значительной степени определяющие геологическую эффективность, разрешающую способность и глубину проникновения сейсмического сигнала [Калинин и др., 1976].

Метод СВР — технология, обеспечивающая высокую разрешающую способность исследований (от 0,5 до 5 м по вертикали) при умеренной глубинности метода (до 500–1500 м). Данный метод занимает промежуточное положение между классической сейсморазведкой на акваториях и сейсморазведкой сверхвысокого разрешения (CCBP), сочетая детальность и достаточную глубину исследования при проведении работ на мелких месторождениях нефти и газа, изучения геологических разломов и проведении инженерных изысканий для детализации верхней части получаемого разреза (ВЧР) и анализе геологических опасностей.

Выбор оптимальных параметров морских пневмоисточников для исследований верхней части разреза методом СВР действительно требует комплексного подхода, учитывающего геологические особенности района и технические характеристики оборудования. При проектировании системы возбуждения сигнала на основе пневмоисточников необходимо учитывать комплекс взаимосвязанных параметров, определяющих эффективность зондирования. Основное внимание уделяется оптимизации соотношения между разрешающей способностью, глубинностью исследований и качеством получаемых данных.

Геометрия группы источников играет критическую роль в формировании характеристик излучающего сигнала. Применение групповой конфигурации вместо одиночного источника позволяет существенно улучшить направленные свойства системы. Правильно подобранное расстояние между источниками, зависящее от рабочего частотного диапазона и целевой глубины исследований, обеспечивает оптимальную диаграмму направленности. В частности, для изучения ВЧР наиболее эффективны компактные группы с минимальными интервалами между источниками, что позволяет сохранять высокую частотную составляющую сигнала. Изменение направленности излучения является важным геометрическим параметром, поддающимся управлению через конфигурацию группы источников. Применение синфазного возбуждения отдельных элементов группы позволяет формировать требуемую диаграмму направленности с минимальным уровнем боковых лепестков [Giles, et al., 1973].

Объем источника находится в прямой зависимости с энергетическими характеристиками сигнала и его частотным составом. Увеличение объема приводит к росту мощности излучения, но одновременно вызывает снижение высокочастотных компонент. Для детальных исследований верхних горизонтов (с разрешением до 0,5 м) оптимальны малогабаритные источники объемом 20–80 куб. дюймов, генерирующие сигнал в диапазоне 50–250 Гц.

Глубина буксировки источников существенно влияет на спектральный состав сигнала и качество получаемых данных. Оптимальное положение источников в водном слое (обычно 1–5 м) определяется компромиссом между сохранением высокочастотной составляющей, минимизацией влияния вторичных пульсаций и волну-спутником. Слишком малая глубина приводит к усилению интенсивных низкочастотных осцилляций пузыря, тогда как чрезмерное заглубление вызывает нежелательное ослабление высокочастотной части спектра [Степанов и др., 2018].

Рекомендации по оптимизации параметров: ЧТО?

— **предварительное**, например, с помощью программ типа *SeisOpt*, *Gundalf* помогает подобрать оптимальные настройки;

— **полевые тесты** (различные объемы, глубины, конфигурации) перед основными работами;

— **анализ исторических данных** (если есть) для учета региональных особенностей.

Для успешного проведения работ необходимо подобрать оптимальные параметры источника. Обычно такие параметры как отношение peak-to-peak, peak-to-bubble, частотный состав, конфигурация кластера (рис. 1) моделируются перед проведением работ [Hopperstad, et al., 2006].

Теоретический анализ. Оптимальный параметр заглубления источника выбирается исходя из требований к частотному составу сигнала. При работе с пневматическим источником важно учитывать волну-спутник и ее влияние на форму сигнала (рис. 2; 3).

При выборе оптимального заглубления группы пневмоисточников и приемников руководствуются формулой

$$h_u = h_n = \frac{c}{4f},$$

$$\frac{\omega h_u}{c} = \frac{2\pi f_0 h_u}{c} = \pi \Rightarrow f_0 = \frac{c}{2h_u},$$

где f_0 — центральная частота, c — скорость в воде, h_u — глубина погружения источника, h_n — глубина погружения приемника, ω — круговая частота.

Не всегда стоит опираться на оптимальный параметр заглубления, учитывая современные тенденции в комплексах обработки сейсмических данных существует тенденция к усовершенствованному применению алгоритмов подавления волны-спутника.

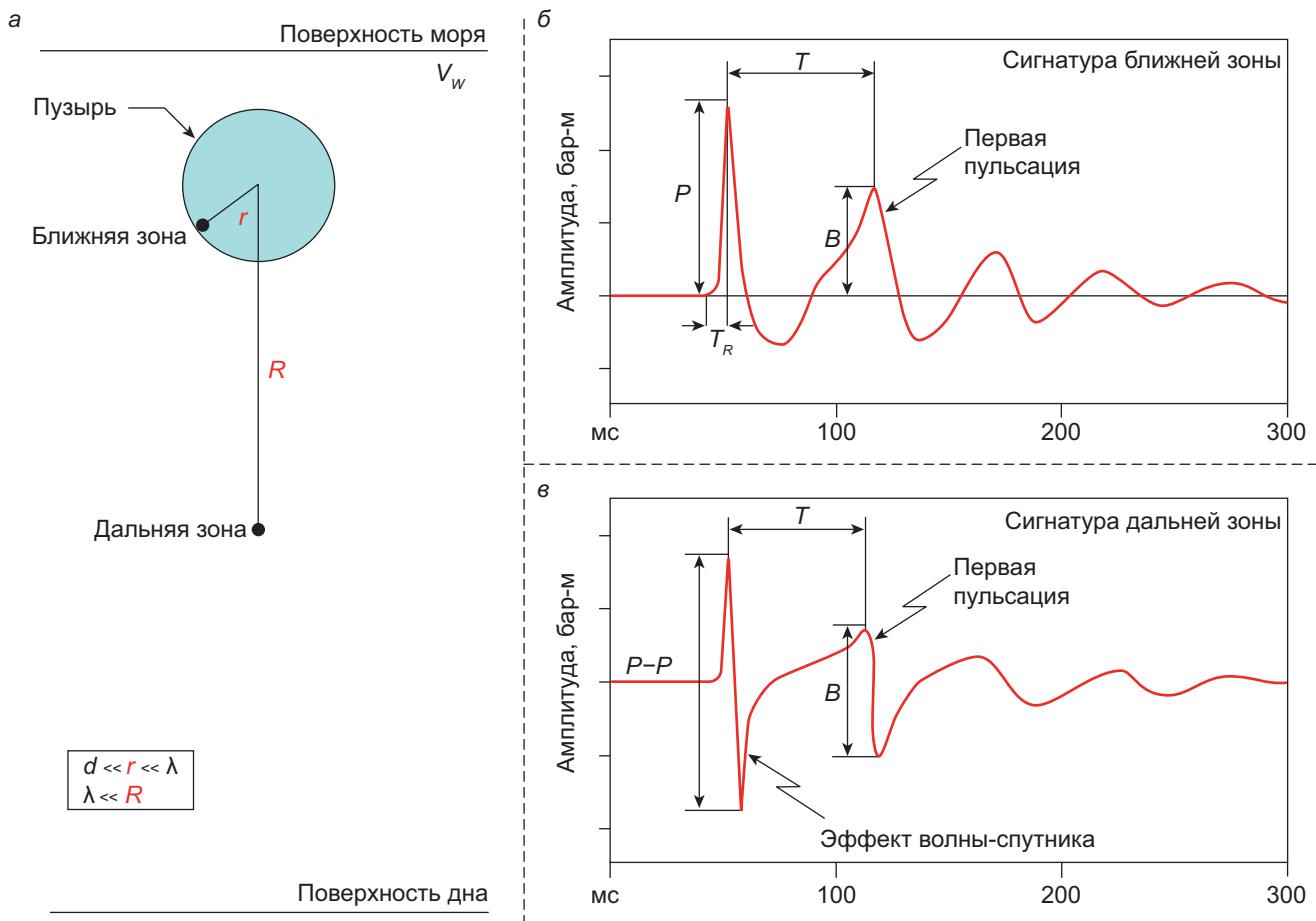


Рис. 1. Схема образования вторичной пульсации (а) и ее влияние на сигнатуру ближней (б) и дальней зоны (в) [Dragoset, 1990]

В связи с этим при проведении работ зачастую выбирается такое заглубление, при котором становится возможным отделение волны-спутника как за источник, так и за приемник для успешной реализации алгоритмов подавления волны-спутника. Единственным необходимым требованием при использовании такой методики остается сохранение постоянного заглубления источника и приемника вдоль профиля.

Для получения оптимального результата необходимо рассмотреть множество конфигураций групп источников, которые очень часто используются при проведении работ на изучение верхней части разреза (рис. 4; 5) [Dragoset, 2003].

Геометрия группы. Анализ параметров излучения пневматических источников демонстрирует существенную вариативность зависимости амплитуды давления от объема камеры в зависимости от конфигурации системы — геометрии группы. В случае изолированного источника наблюдается характерная степенная зависимость с показателем 1/3, где двукратное увеличение объема приводит к возрастанию амплитуды давления лишь приблизительно в 1,26 раза, что обусловлено фундаментальными закономерностями динамики пузырьковых колебаний.

Для групповых конфигураций с достаточным межэлементным расстоянием, исключающим вза-

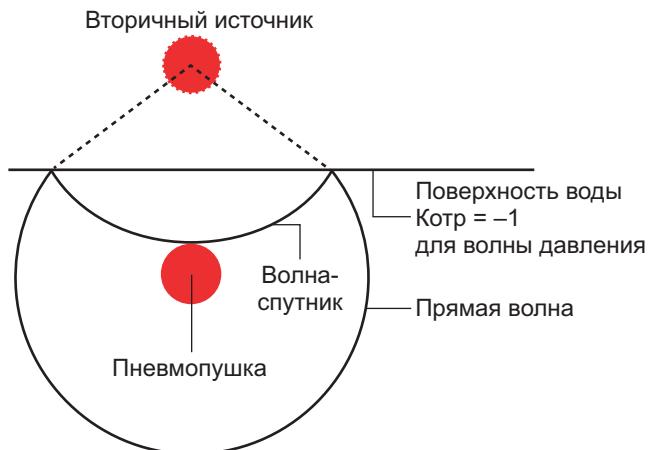


Рис. 2. Схема образования волны спутника

модействие между источниками, устанавливается линейная зависимость, при которой каждый элемент системы функционирует независимо. В кластерных же системах, где наблюдается частичное взаимодействие элементов, проявляется промежуточная зависимость с показателем степени около 2/3, представляющая собой оптимальный баланс между эффективностью излучения и компактностью системы.

Полученные результаты имеют важные следствия. Ключевое значение приобретает не объем отдельных источников, а их общее количество

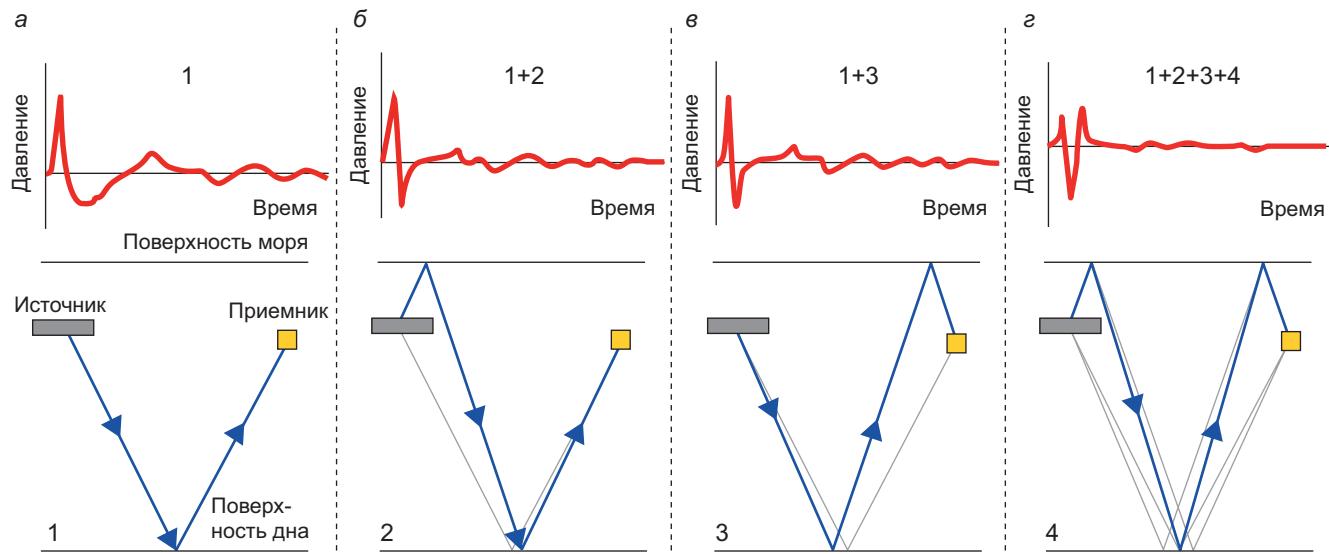


Рис. 3. Эффект от волны спутника на результирующую сигнатуру. Показаны схематичные представления распространения: *а* — отраженной волны; *б* — волны спутника за источником; *в* — волны спутника за приемником; *г* — волны спутника за источник-приемник [Dragoset, 1990]

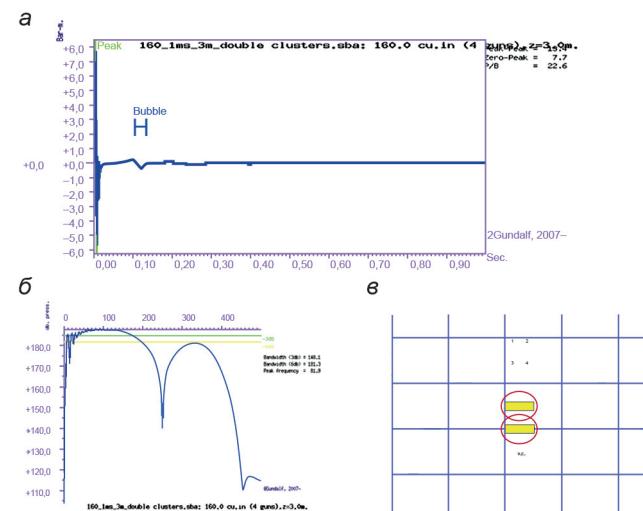


Рис. 4. Пример расчета сигнатуры (*а*) и ее амплитудно-частотный спектр (*б*) для группы из 4 пневмоисточников объемом 40 куб. дюймов каждая, расположенных друг над другом (*в*) в системе. Применение множества источников меньшего объема обеспечивает значительные эксплуатационные преимущества, включая повышение энергетической эффективности, снижение нагрузки на компрессорное оборудование и упрощение технического обслуживания, при этом позволяя достигать требуемых характеристик излучения. Этот вывод подтверждает целесообразность использования распределенных кластерных систем с умеренными объемами отдельных источников для оптимизации параметров сейсмического сигнала.

Однородность группирования и объем источников. Как видно из показанных выше рисунков зачастую при проведении инженерных исследований методом СВР используются пневматические источники одинакового объема, такой способ группирования называется однородным. Этот подход для нефтяной сейморазведки отличается от стандарт-

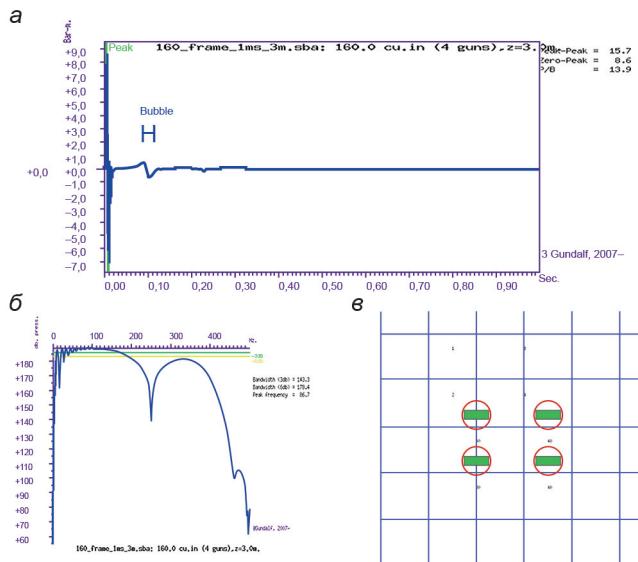


Рис. 5. Пример расчета сигнатуры (*а*) и ее амплитудно-частотный спектр (*б*) для группы из 4 пневмоисточников объемом 40 куб. дюймов каждая, расположенных в вершинах прямоугольника (*в*)

ного по использованию пневматических источников различного объема, так называемое неоднородное группирование.

При неоднородном группировании пневмоисточников параметры системы (объемы камер излучателей, их количество, база группирования и глубина погружения) подбираются исходя из следующих физических принципов:

- синфазное сложение первых импульсов давления;
- основные пики давления от отдельных излучателей суммируются синфазно;
- обеспечение усиления полезного сигнала;
- точный расчет времен задержки срабатывания.

Повторные удары (обусловленные отражением от границы «вода-воздух») складываются в противофазе за счет:

Нужно у оси абсцисс написать Время, мс ?? А ось ординат какая размерность, что есть бар-м???

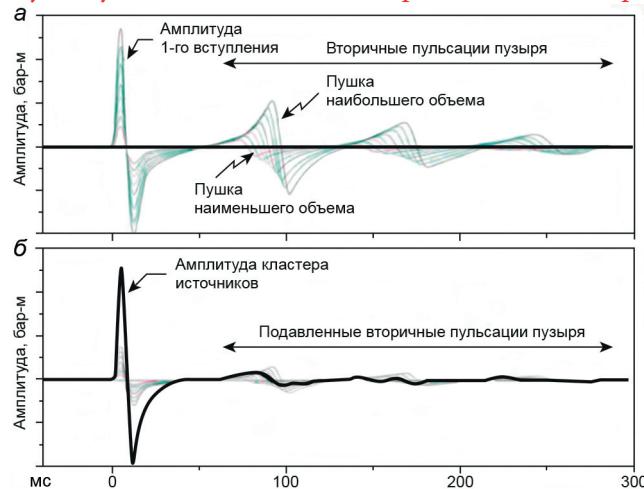


Рис. 6. График амплитуд при конструктивной интерференции при использовании неоднородного кластера пневматических источников: сигнатуры отдельных пневмоисточников (а), сигнтура неоднородного кластера пневмоисточников (б) [Dragoset, 2003]

- правильного подбора объемов камер;
 - оптимального пространственного расположения;
 - точно рассчитанной глубины погружения.
- Критерии оптимизации:**
- максимизация отношения сигнал/шум;
 - подавление вторичных пульсаций;
 - формирование направленной диаграммы излучения;
 - обеспечение требуемого спектрального состава сигнала.

Таким образом при моделировании различных конфигураций групп пневмоисточников зачастую опираются на получение оптимального соотношения параметра peak-to-bubble и минимизации данного параметра при выбранных и зафиксированных значениях заглубления и геометрии кластера пневмоисточника, т. е. уменьшения вторичных пульсаций на этапе проведения полевых работ (рис. 6).

Расчеты параметров для различных конфигураций пневмоисточников. Основываясь на предыдущих рассуждениях, было проведено моделирование групп различной конфигурации при использовании пневмоисточников объема 20, 40, 60, 80 куб. дюймов и при заглублении источников и приемников 3 и 4 м. Расчет был выполнен для кластера с расположением пневмоисточников в вершинах прямоугольника, данная геометрическая конфигурация была выбрана в связи с возможностью реализации рамы пневмоисточников такой геометрии, а также в связи с наличием взаимного влияния между пневматическими источниками (группированием) (рис. 7).

Как видно из представленной таблицы расчетов кластеров (табл. 1), как однородных, так и не однородных, с объемами пушек, характерных для использования в широко разрешающей сейморазведке, можно судить о том, что необходимо рассматривать эффективность используемого источника по всем перечисленным параметрам: peak-to-peak, peak-to-bubble, заглубление, пиковая частота и энергия.

Таблица

Расчеты основных параметров моделирования кластеров пневмоисточников

Массив, куб. дюймы	Глубина ПВ-ПП	Peak-peak, усл. ед.	Peak-bubble, усл. ед.	Пиковая частота, Гц	Энергия, Дж
20-40-20-40	3-3	22,6	20,3	115	7752
	3-4	19,6	13,8	91,6	7752
	4-4	23,4	10,6	85,8	8882,6
20-60-20-60	3-3	23,3	36,2	113,1	8236,8
	3-4	20,3	24,3	91,6	8236,8
	4-4	24,4	19,1	85,8	9311,7
20-80-20-80	3-3	24,3	46,3	109,2	8817,6
	3-4	21,3	31,3	91,6	8817,6
	4-4	25,3	24,5	77,5	9876,8
40-40-40-40	3-3	24,1	58,5	108,5	8226,5
	3-4	20,6	37,9	91,6	8226,6
	4-4	24,5	26,2	85,8	9478,2
40-60-40-60	3-3	25,4	56,6	109,2	9606,9
	3-4	22,3	38,4	85,8	9606,9
	4-4	26,3	32,7	81,9	11038,2
40-80-40-80	3-3	25,4	56,6	109,2	9606,9
	3-4	22,3	38,4	85,8	9606,9
	4-4	26,3	32,7	81,9	11038,2
40-40-40-40 (по углам)	3-3	24,1	58,5	108,5	8226,5
	3-4	20,6	37,9	91,6	8226,6
	4-4	24,5	26,2	85,8	9478,2

Примечание: ПВ — пункт возбуждения — или источник. ПП — пункт приема — или приемника.

В частности, для данного примера можно видеть, что параметр peak-to-peak, показывающий общую мощность амплитуду сигнала незначительно отличается для различных кластеров — минимум 19,6, максимум 26,3 единиц. Такой разброс значений говорит о сравнительно стабильной энергии излучения для различных рассмотренных конфигураций.

В то же время параметр peak-to-bubble может значительно изменяться в зависимости от параметров источника однородности/неоднородности кластера, а также глубины буксировки пневмоисточника, так как она влияет на динамическую характеристику схлопывания осциллирующей полости.

Параметр пиковой частоты является достаточно критичным для получения нужных характеристик спектра колебаний, что отражает получаемую разрешающую способность метода исследований. Для проведения работ методом СВР критично наличие высокочастотной составляющей в спектре сигнала источника [Johnson, 2019].

Энергия сигнала влияет на глубину исследований и является интегральным параметром, зависящим от объема, давления и геометрии источника.

Результаты моделирования сигнатур различных конфигураций пневмоисточников демонстрируют

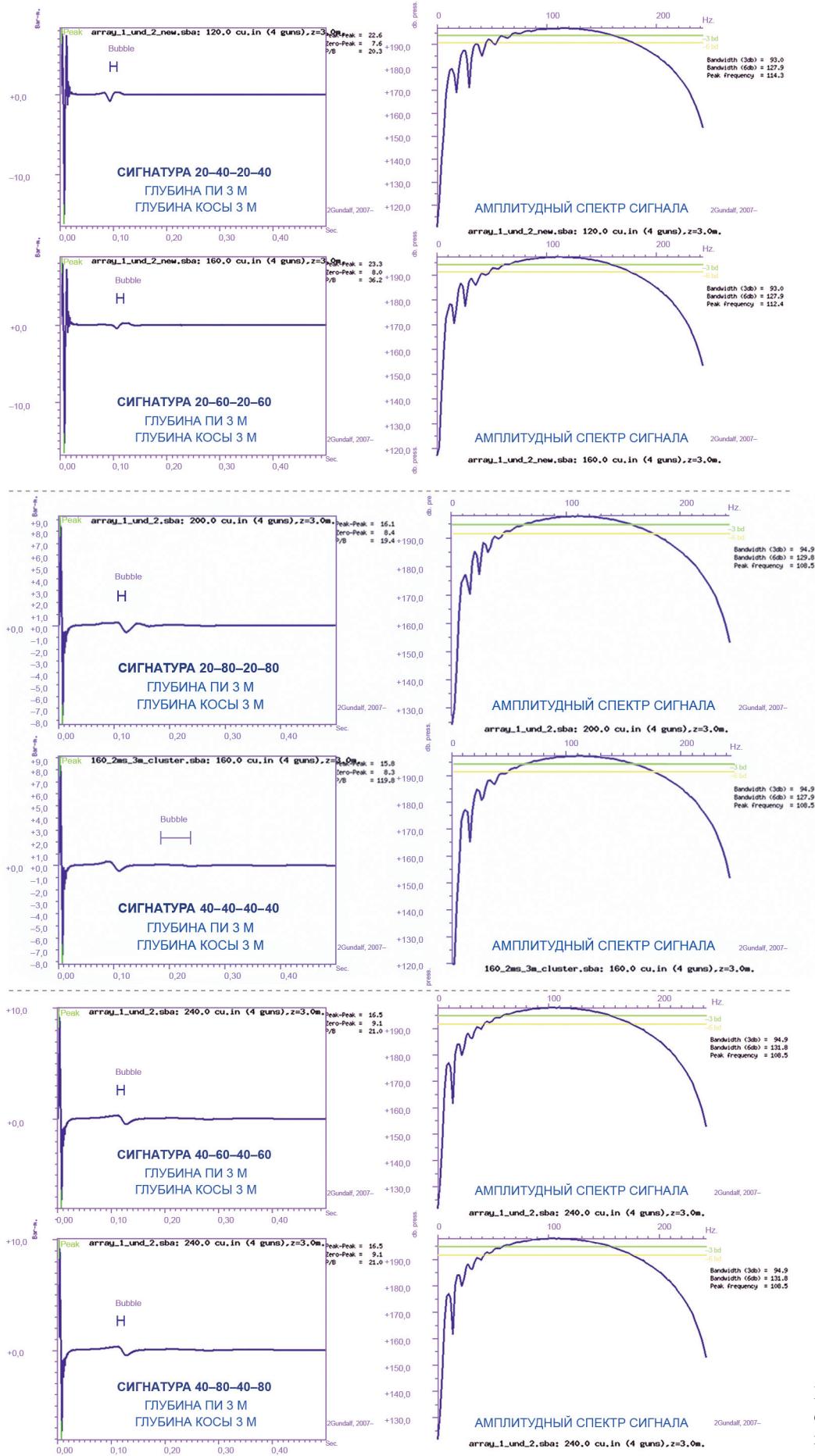


Рис. 7. Смоделированные сигнатуры для различных конфигураций групп пневмоисточников

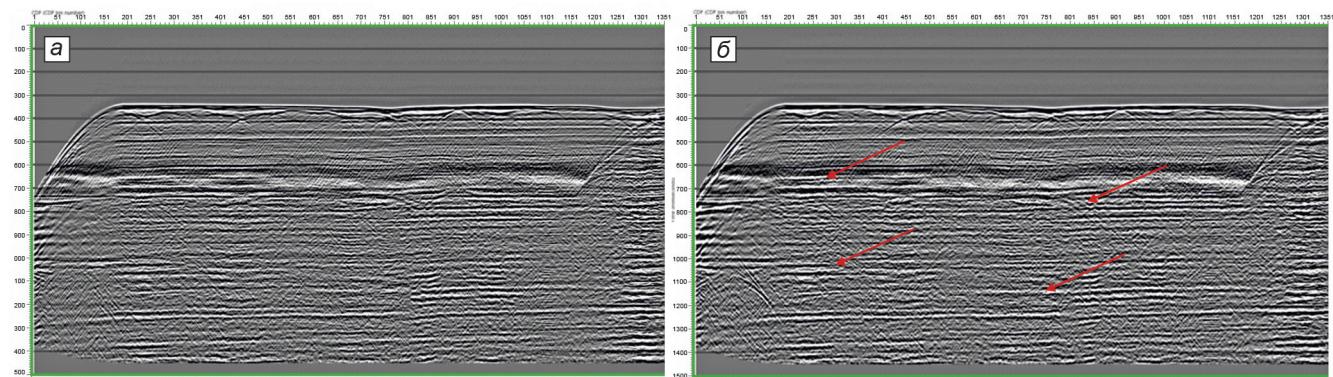


Рис. 8. Временные разрезы по профилю тестирования, полученный с помощью группы пневмоисточников объема 40-40-40-40 куб. дюймов, размещенных по углам прямоугольной рамы: а — при заглублении источников 3 м и приемной косы 4 м; б — при заглублении источников 4 м и приемной косы 4 м

существенные различия в спектральных характеристиках излучаемых сигналов. Наиболее значимые различия наблюдаются в низкочастотной области спектра, где отмечается проявление деструктивной интерференции, обусловленной вторичными пульсациями воздушного пузыря. Данное явление особенно выражено при использовании неоднородного группирования при использовании кластера 20-60-20-60 куб. дюймов, где наблюдается существенное искажение формы основного зондирующего импульса. Низкочастотная составляющая является так же критически важной при проведении работ с более высокочастотным целевым интервалом и детальной разрешающей способностью [Hegna, et al., 2011].

Проведенный сравнительный анализ позволяет сделать вывод о преимуществе использования групп 40-40-40-40 и 20-80-20-80 куб. дюймов, которые демонстрируют оптимальные характеристики по следующим ключевым параметрам:

- спектральный состав сигнала;
- соотношение амплитуд основного импульса и пузырьковых осцилляций (peak-to-bubble);
- минимизация деструктивных интерференционных эффектов;
- стабильность формы излучаемого импульса.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение указанных конфигураций пневмоисточников обеспечивает получение высококачественных данных при проведении сейморазведочных работ методом высокого разрешения, отвечая всем необходимым требованиям к параметрам зондирующего сигнала.

Анализ временных разрезов тестового профиля не выявил существенных различий в характеристиках сейсмической записи при различных параметрах заглубления источников (рис. 8, а, б). Однако было установлено, что увеличение глубины погружения пневмоисточников приводит к незначительному улучшению низкочастотной составляющей спектра. При этом амплитудно-частотные характеристики вторичных пульсаций воздушного пузыря остаются

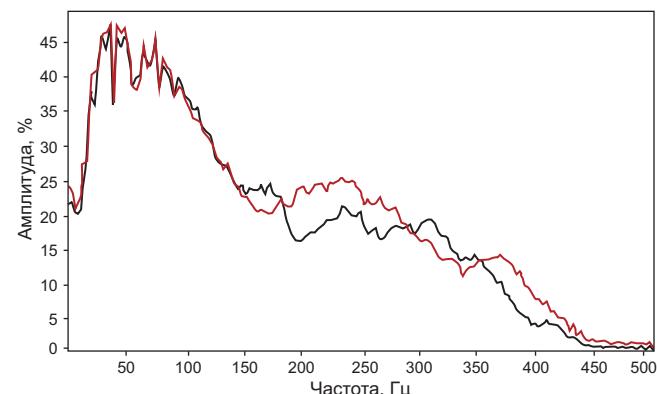


Рис. 9. Спектр по временному разрезу, полученному по тестовому профилю. Красным показан спектр при заглублении пневмоисточников 4 м, черным при заглублении пневмоисточников 3 м

практически неизменными независимо от глубины погружения (рис. 9).

Наблюдаемые локальные вариации параметров сейсмической записи в отдельных зонах разреза могут быть обусловлены не только изменением глубины погружения источников, но и влиянием следующих факторов, возникающих при повторном прохождении опытного профиля:

- наличием дополнительных помех;
- изменением гидродинамических условий;
- вариациями условий возбуждения и приема сигнала.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости более детального изучения влияния глубины погружения на спектральные характеристики сигнала с учетом всех возможных источников помех и вариаций условий съемки.

Заключение. Анализируя результаты моделирования сигнатур для различных конфигураций источников, можно утверждать, что для успешного проведения работ, направленных на исследование верхней части разреза, необходимо моделирование множества параметров и детальный анализ каждого из них. Эмпирический выбор параметров пневмоисточников без учета конкретных условий приводит к потере информативности данных. Оптимизация

требует анализа геометрии группы, объема, глубины буксировки и направленности с учетом геологии района.

1. Параметр заглубления выбирается классическим способом (оптимальный параметр заглубления), а также способом, при котором становится возможным отделение волны-спутника как за источник, так и за приемник для успешной реализации алгоритмов его подавления. Единственным необходимым требованием при использовании такой методики остается сохранение постоянного заглубления источника и приемника вдоль профиля.

2. Ключевое значение приобретает не объем отдельных источников, а их общее количество в системе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алёшин M.B. Особенности обработки данных инженерной сейсморазведки на акваториях // Тезисы международной конференции «Инженерная геофизика-2017». EAGE, 2017. С. 1–4.

Гуленко В.И. Пневматические источники упругих волн для морской сейсморазведки: Монография. Краснодар: КубГУ, 2003. 313 с.

Калинин А.В., Калинин В.В., Пивоваров Б.Л. Потенциальная эффективность группирования источников в морской сейсморазведке // Прикладная геофизика. Вып. 82. М.: Недра, 1976. С. 77–80.

Степанов Н.А., Ланцев В.В., Горбачев С.В. и др. Специфика применения сигнатурной деконволюции на данных с нестабильным источником // Труды Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия-2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии» [Стендовый доклад] Тверь: ПолиПРЕСС, 2018.

3. При использовании источников небольшого объема неоднородное группирование не всегда позволяет получить наилучшие результаты.

4. При моделировании различных конфигураций групп пневмоисточников зачастую опираются на получение оптимального соотношения параметра peak-to-bubble и минимизации данного параметра при выбранных и зафиксированных значениях заглубления и геометрии кластера пневмоисточника.

При подготовке к выполнению работ необходимо производить моделирование и анализ получаемых параметров зондирующего импульса пневмоисточников, а также производить опытно-методические работы перед проведением финальных исследований.

Dragoset W.H. Air-gun array specs: A tutorial // Geophysics: The leading edge of exploration. 1990. No. 1. P. 24–32.

Dragoset W.H., Hargreaves N., Larner K. Air Gun Source Instabilities and Shot-by-Shot Signature Deconvolution // Geophysics. 2003. Vol. 9. P. 487–491.

Giles B.F., Johnston R.C. System approach to air gun array design // Geophysical Prospecting. 1973. Vol. 21, No. 1. P. 77–101.

Hegna S., Parkes G. The low frequency output of marine air-gun arrays // Geophysics. 2011. Vol. 6. P. 77–81.

Hopperstad J.F., Laws R. Source Signature Estimation — Attenuation of the Seafloor Reflection Error in Shallow Water // 68th EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2006. European Association of Geoscientists & Engineers, 2006. Article № cp-2-00123.

Johnson R. Experimental Verification of Pulse Shaping // Journal of Vibration and Acoustics. 2023. Vol. 145, № 2. P. 1–34.

Статья поступила в редакцию 12.01.2025,
одобрена после рецензирования 12.03.2025,
принята к публикации 30.10.2025