

Влияние геометрии группы пневмоисточников на сейсмический сигнал при выполнении 4D-мониторинга

■ Казанин А.Г., Базилевич С.О., Литвачук А.В., АО «МАГЭ», г. Москва

■ Романов В.В., РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва

Аннотация: При выполнении сейсморазведочных работ на акватории для возбуждения упругих колебаний в абсолютном большинстве случаев применяются группирование пневматических источников (ПИ). Основная задача группирования - повышение энергии первичного импульса при снижении уровня вторичных пульсаций. В рамках одной группы могут одновременно работать до нескольких десятков единичных и объединенных в кластеры ПИ. Специфика морских исследований такова, что источник находится в постоянном движении, т.е. геометрические параметры группы не стабилизированы. Многолетний опыт реализации шельфовых проектов позволил сервисным компаниям выработать ряд технологических приемов, способствующих минимизации изменчивости параметров группы, а компаниям-заказчикам определить критерии допустимой вариативности параметров группы (по глубине буксировки, сепарации линий ПИ). Однако, постоянное стремление к повышению точности решаемых сейсморазведкой задач приводит к необходимости дополнительной оценки всех параметров наблюдений, в том числе и параметров геометрии группы.

Ключевые слова: сейсморазведка 3D4C, 4D мониторинг, сейсмический мониторинг, пневмоисточник, NRMS, сигнатура, вторичная пульсация

Введение

В практике зарубежных нефтегазовых компаний сейсмический мониторинг (4D мониторинг) зарекомендовал себя как надежный инструмент управления разработкой шельфовых месторождений, который, с одной стороны, требует больших инвестиций на стадии ГРП, с другой - позволяет получить значительный экономический эффект за счет оптимизации бурения. В связи с реализацией отечественными недропользователями программы освоения шельфовых месторождений, в последние годы интерес к проведению сейсмического мониторинга усиливается и на территории РФ.

Ключевым фактором, влияющим на успешность выполнения сейсмического мониторинга, является повторяемость базовой и последующих мониторинговых съемок. В конечном итоге, совокупность несоответствий съемок приводит к

возрастанию параметра NRMS (или 4D-шума), который характеризует уровень шума, связанного с комплексом методических отличий серии наблюдений. Атрибут NRMS определяется как нормализованное среднеквадратическое отклонение между двумя наборами данных - базы (b) и монитора (m):

$$NRMS = \frac{RMS(b - m)}{RMS(b) + RMS(m)}$$

Величина 4D-отклика, вызванного процессами разработки для конкретного месторождения, должна в достаточной мере превышать уровень NRMS, что является ключевым условием эффективности сейсмического мониторинга.

Считается, что основной вклад в величину NRMS вносится различием в плановом положении пункта приема (ПП) и пункта возбуждения (ПВ) [1], при этом очевидно, что любые другие изменения, как например вариации геометрии

группы ПИ, и как следствие, сигнатуры источника, будут вносить свой вклад в итоговую величину 4D шумов, пусть и в значительно меньшей степени.

Сигнатура источника при работах OBN

При реализации сейсморазведочных работ на шельфе предполагается, что с достаточной точностью известна сигнатура источника в дальней зоне. Информация о сигнатуре источника может быть получена следующими способами:

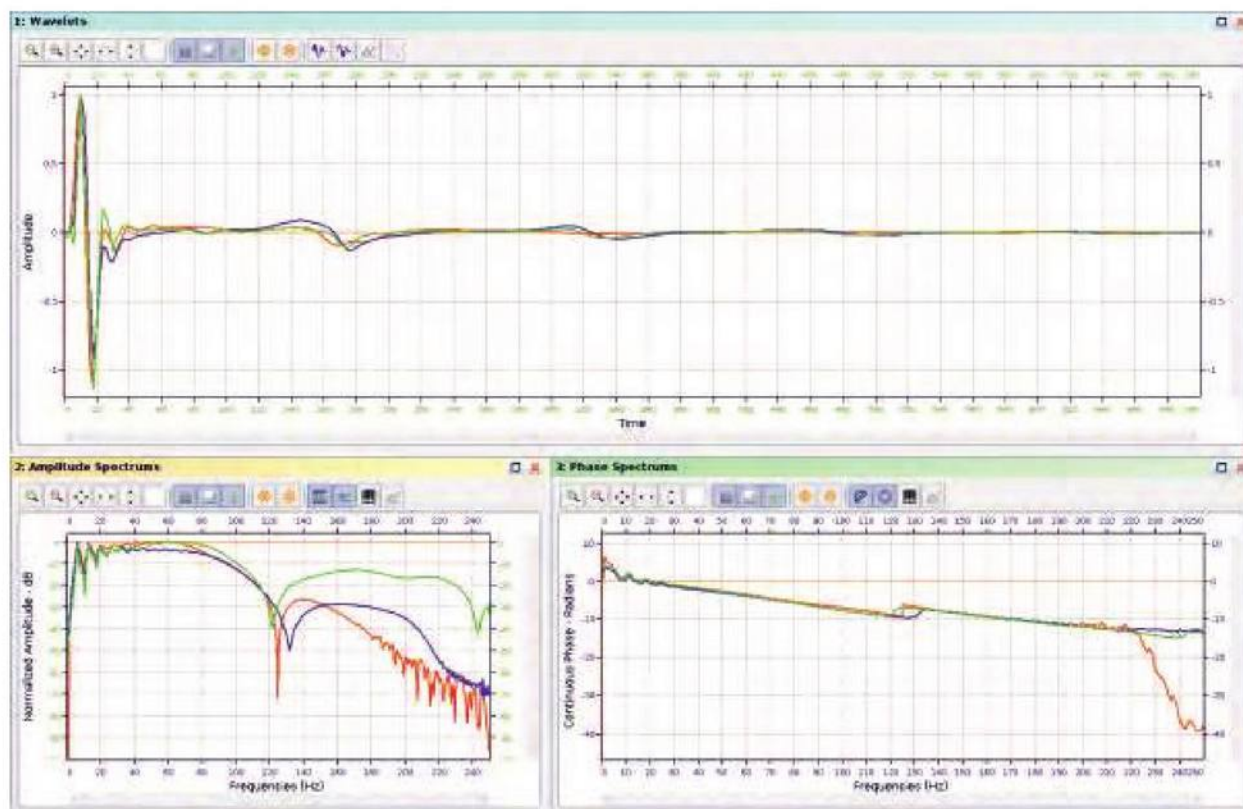
- математическое моделирование в специализированном ПО (Gundalf, Nucleus);
- моделирование на основе записей гидрофонов ближней зоны (NFH);
- прямое измерение;
- извлечение формы импульса из записи донного отражения;

Алгоритмов для математического моделирования сигнатуры предложено достаточно много, но в наиболее популярных пакетах используется подход, основанный на системе уравнений движения пульсирующих пузырей в жидкости, в результате решения которой группа взаимодействующих пузырей представляется как группа невзаимодействующих, внешнее давление для каждого из которых меняется со временем (за счет осцилляции соседних пузырей), что в итоге позволяет получить сигнатуру для каждого пневмоисточника и далее рассчитать суммарную сигнатуру группы (в любом направлении) как их суперпозицию.

Расчет сигнатуры в специализированном ПО в обязательном порядке проводится в рамках проектирования полевых работ, однако при достаточно точном моделировании первичного импульса, имеющиеся на текущий момент программные решения характеризуются значительными погрешностями при

моделировании вторичных пульсаций газового пузыря (bubble). При выполнении работ с буксируемым оборудованием оценить сигнатуру возможно на основе записи с ближнего канала косы или служебного канала, обычно расположенного на малом от источника расстоянии. В отличие от данных моделирования, при использовании информации с косы есть возможность работать с переменной по профилю сигнатурой, что позволяет при определенных условиях компенсировать изменчивость условий возбуждения. Данный метод может быть эффективен только при условии достаточной глубины до морского дна – при отсутствии интерференции прямой волны с донным отражением. В отдельных случаях сигнатура может быть оценена путем статистического накопления сигнала донного отражения, однако этот метод является наименее предпочтительным ввиду того, что подобная оценка импульса будет всегда осложнена фактором геологии – интерференцией донного отражения с нижележащими границами. При этом, достаточная глубина до морского дна продолжает быть обязательным условием.

При выполнении съемок с донными регистрирующими системами (OBN) сейсмическая коса отсутствует и зафиксировать сигнатуру предложенным ранее способом прямого измерения не представляется возможным. Для подобных случаев разработаны алгоритмы моделирования [2], основанные на использовании записей гидрофонов ближней зоны (NFH), для чего соответствующие записи предварительно калибруются с использованием результатов bubble-теста (специального теста, выполняемого перед началом полевых работ с целью контроля объема и глубины буксировки каждого ПИ, при котором выполняется



▲ Рис. 2. Оценка импульса пневмоисточника с помощью различных методов. (Красный – мат. моделирование, зеленый – моделирование на основе NFM, синий – сумма близких удалений).

Методика оценки влияния геометрических параметров группы

При всех отмеченных погрешностях математического моделирования, данный инструмент позволяет получить базовое представление об изменении формы и характеристик сейсмического импульса при изменении конфигурации источника, дает возможность оценки степени зависимости сигнатуры от конкретного параметра геометрии источника. Отдельно необходимо отметить, что иных инструментов оценки азимутальных характеристик сигнатуры для производственных работ не существует.

В ходе эксперимента были получены модельные сигнатуры источника, геометрия которого менялась в заданных пределах – изменение сигнатуры проанализировано в зависимости от изменения глубины буксировки группы, изменения сепарации (расстояния) между

линиями ПИ в IL и XL направлениях (Таблица 1). Исследуемые параметры модели менялись с шагом 0.5 м. В большинстве случаев в работе будут представлены результаты, характеризующие максимальное отклонения параметра от номинального значения. Граничные условия моделирования выбраны исходя из реальных возможных отклонений геометрии источника в процессе выполнения полевых наблюдений, которые обычно обусловлены сменой гидрологических условий (ветровое волнение моря, смена течений, солености воды). Моделирование выполнено в ПО Gundalf.

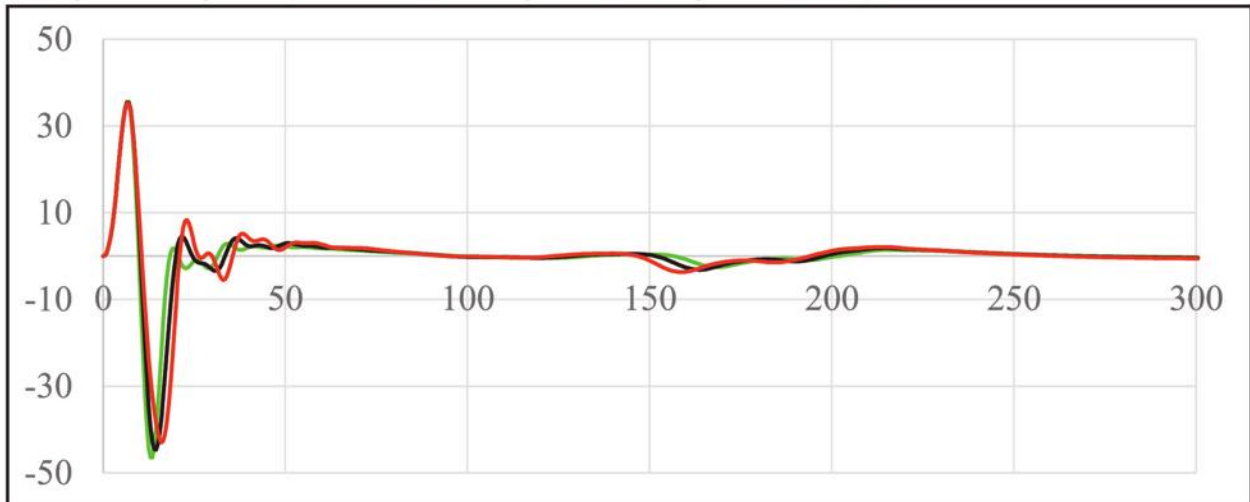
Глубина буксировки

Выбор оптимальной глубины буксировки источника зависит в первую очередь от желаемого частотного состава сигнала [3] и связан с возникновением

▼ Табл. 1. Параметры перебора моделей

Параметр	Номинальное значение	Анализируемые модели
глубина буксировки	6 м	5-7 м (шаг 0.5 м)
XL сепарация	10 м	7-13 м (шаг 0.5 м)
П сепарация	0 м	0-2 м (шаг 0.5 м)

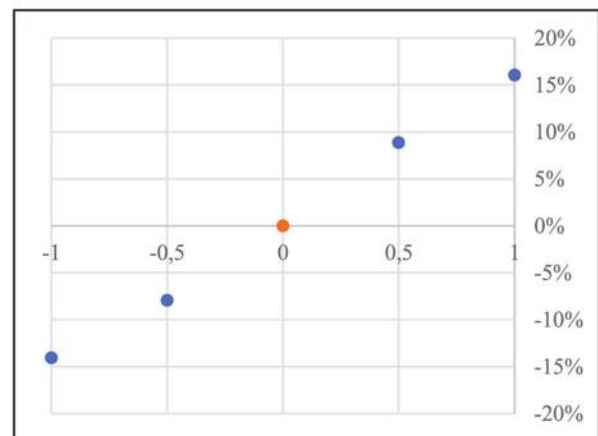
▼ Рис. 3. Сигнатуры источника, полученные при буксировке группы на разной глубине (зелёный – 5 м, черный – 6 м, красный – 7 м).



волны-спутника, вызванной переотражением сейсмического импульса от поверхности вода-воздух существенным образом усложняющим волновую картину (Рис. 3).

Известно и подтверждается результатами моделирования (Рис. 4), что при увеличении заглубления источника происходит увеличение энергии сигнал. В практике сейсморазведочных работ считается допустимым смещение источника по глубине в пределах ± 1.0 м. Для выполнения 4D съемок коридор по данному параметру принято сужать до ± 0.5 м, но даже в этом случае на основании полученных результатов моделирования можно ожидать изменение общей энергии источника в пределах $\pm 8-9\%$ (Рис. 4), что может привести к уровню отличия общей энергии для отдельных ПВ на профиле до 20%.

В спектральной области побочный импульс, ассоциированный с волной-



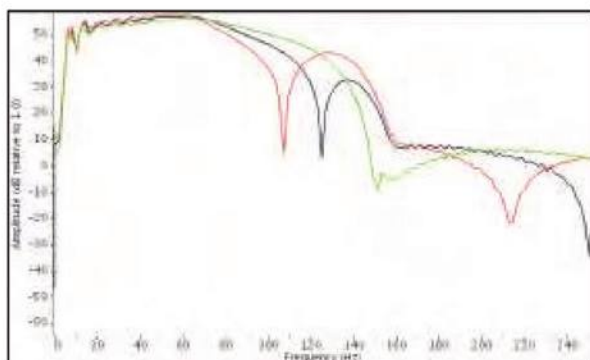
▲ Рис. 4. График относительного изменения энергии источника в зависимости от изменения глубины буксировки (0 – базовая конфигурация).

спутником за источник, выражается как провал на определённой частоте (Рис. 5), которая может быть легко предсказана:

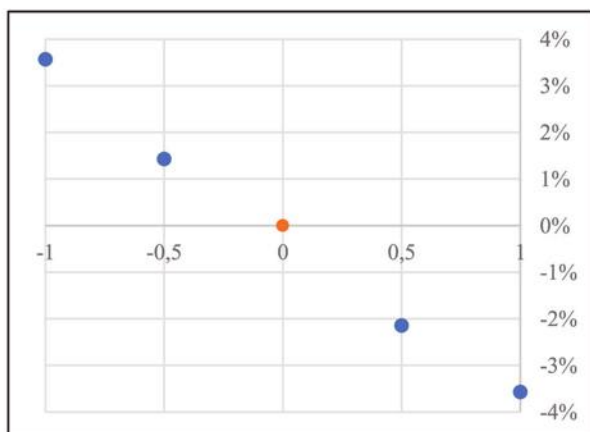
$$f_n = \frac{V_w}{2h}$$

где V_w – скорость в водном слое, h – глубина буксировки источника.

Видно, что при изменении глубины

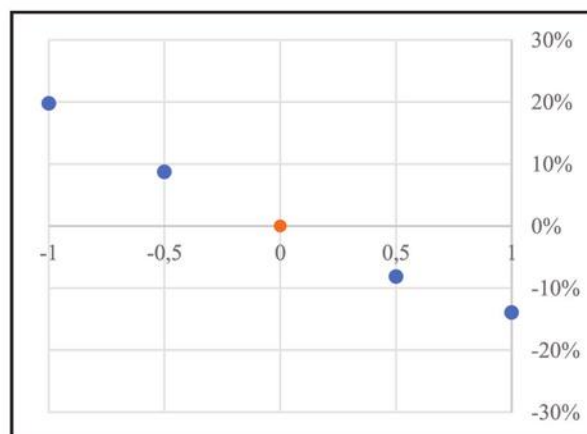


▲ Рис. 5. Спектры сигнатур источника для переменной глубины буксировки (зелёный – 5 м, черный – 6 м, красный – 7 м).



▲ Рис. 6. График относительного изменения периода вторичной пульсации в зависимости от глубины буксировки источника (0 – базовая конфигурация).

буксировки помимо различий в области волны-спутника, некоторым образом меняется и область, связанная с вторичной пульсацией источника. Если период вторичной пульсации остается практически неизменным (Рис. 6), то амплитуда меняется уже существенным образом (Рис. 7). При оценке интенсивности вторичных пульсаций принято оперировать относительной величиной «primary-to-bubble» (РТВ), которая определяет отношение амплитуды первичного сейсмического импульса к амплитуде вторичной пульсации. В данном случае, амплитуда первичного импульса неизменна для любой глубины и все изменения в оценках РТВ связаны непосредственно с амплитудой вторичной пульсации.

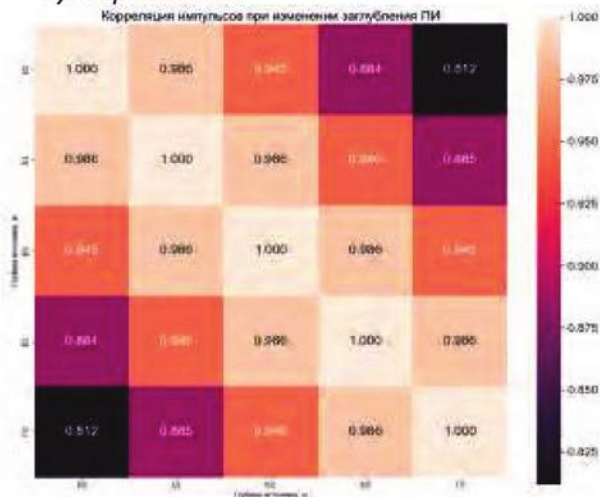


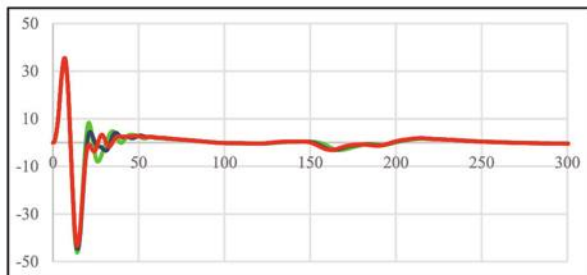
▲ Рис. 7. График относительного изменения РТВ в зависимости от глубины буксировки источника (0 – базовая конфигурация).

Для количественной оценки меры схожести импульсов получена матрица корреляции (Рис. 8).

Коэффициент корреляции (КК) характеризует степень схожести импульсов и, согласно полученным оценкам, изменение глубины буксировки источника в пределах ± 0.5 м приводит к снижению КК до значения ± 0.986 . Стабильно выдерживать глубину буксировки источника в более узком коридоре в ходе полевых наблюдений представляется возможным только со значительным ущербом для скорости выполнения работ, поэтому коридор ± 0.5 м можно считать приемлемым с точки зрения методики работ и

▼ Рис. 8. Матрица корреляции модельных трасс для случая изменения глубины буксировки ПИ.



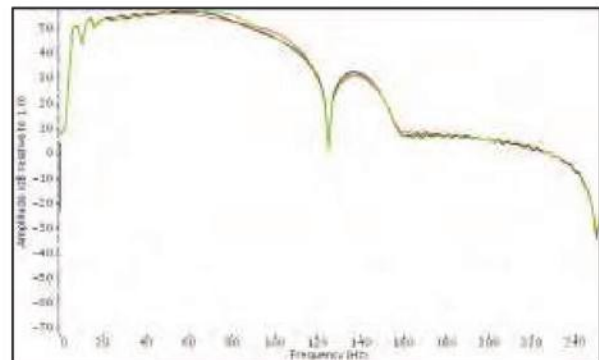


▲ Рис. 9. Сигнатуры источников при переменной сепарации линий ПИ (зеленый – 6 м, черный – 10 м, красный – 14).

обоснованным с теоретической точки зрения в контексте влияния исследуемого параметра на формируемое сейсмическое поле.

Изменение сепарации в ХЛ направлении

Типичным случаем в практике морских работ является смещение линий ПИ в ХЛ (перпендикулярном линии ПВ) направлении – иначе говоря, когда линии ПИ «сходятся» или, наоборот, «разъезжаются» в ходе движения судна-источника по профилю – происходит изменение

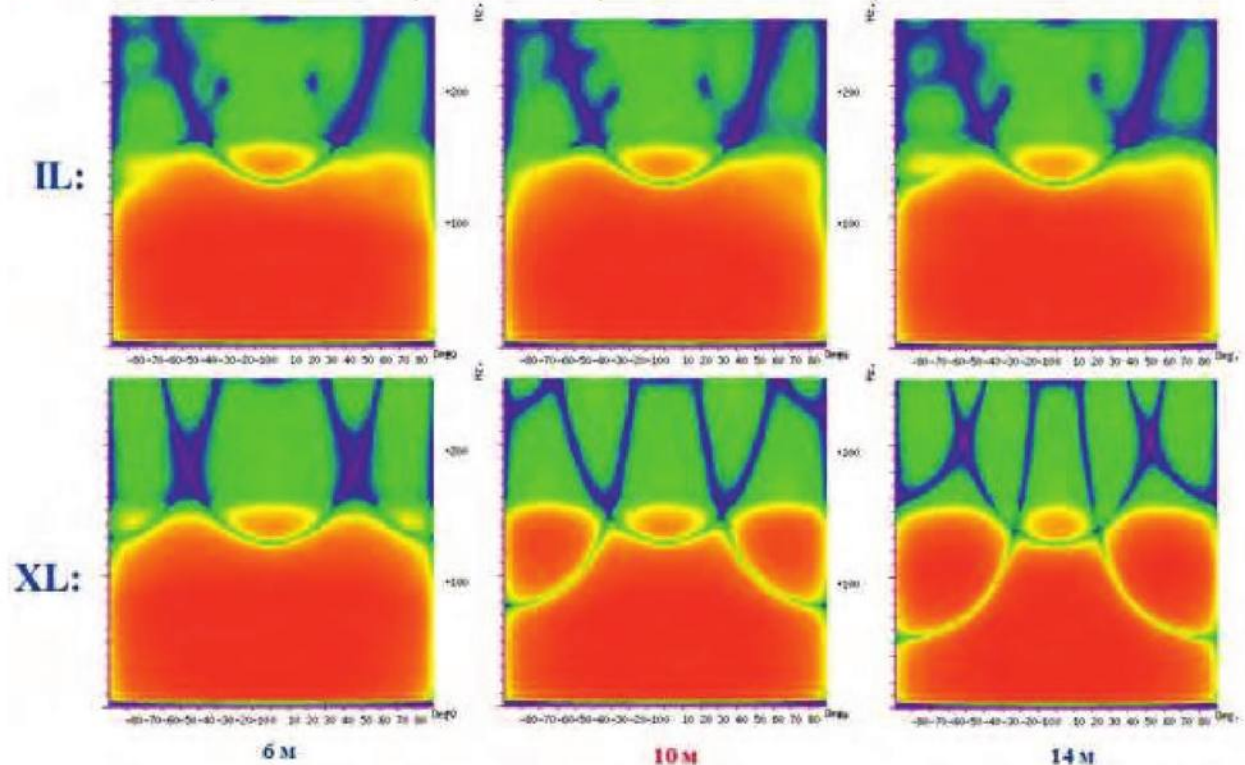


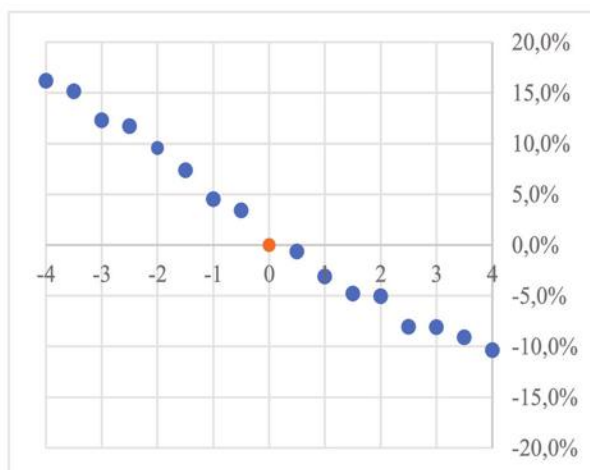
▲ Рис. 10. Спектры сигнатур источников при переменной сепарации линий ПИ (зеленый – 6 м, черный – 10 м, красный – 14 м).

сепарации линий ПИ. В работе проиллюстрированы модельные сейсмические трассы, соответствующие источникам с граничными условиями сепарации 6 и 14 м (при номинальном значении для базовой группы – 10 м) (Рис. 9).

При явном отличии импульсов во временной области, спектры сигнатур значительным образом не изменяются (Рис. 10), хотя некоторые качественные отличия можно отметить для частот более 60 Гц.

▼ Рис. 11. Азимутальные диаграммы для случая изменения сепарации линий ПИ.



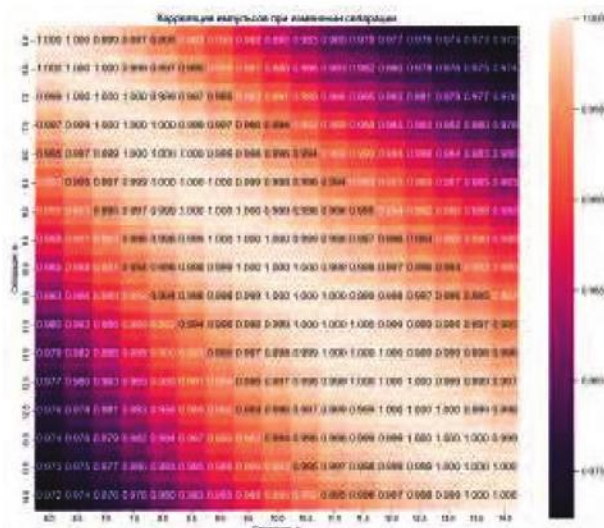


▲ Рис. 12. График относительного изменения энергии источника в зависимости от изменения сепарации (0 – базовая конфигурация).

Изменение сепарации приводит к изменению общего размера группы, что прогнозируемо проявляется в азимутальных диаграммах (Рис. 11), которые характеризуют изменчивость свойств сигнала в зависимости от азимута источник-приёмник. Если в IL направлении диаграмма не меняется, то в XL – изменения уже значительные. Уменьшение сепарации все более приближает источник к точечному виду, тем самым выравнивая его характеристики по направлению. Изменение сепарации в большую сторону (до 14 м) смещает провалы спектры для базовой конфигурации в область сейсмического диапазона частот, что является негативным эффектом при выполнении широкоазимутальных съемок OBN.

Согласно оценкам, (Рис. 12) изменение базы группирования приводит к изменению общей энергии источника, при этом характер изменения является нелинейным.

Для набора исследуемых импульсов получена матрица корреляций (Рис. 13), которая показывает приемлемое совпадение формы импульса в широких пределах изменения сепарации.



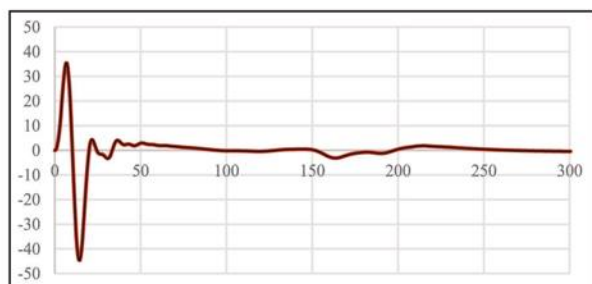
▲ Рис. 13. Матрица корреляции модельных трасс для случая изменения сепарации линий ПИ.

В качестве производственного допуска изменения сепарации обычно используется коридор ± 2 м, что для граничных положений приводит к падению КК до значения 0.996-0.997. Подобные оценки позволяют считать заданные пределы в достаточной мере обоснованными. Стоит сказать, что при нормальных гидрологических и погодных условиях проведения работ сепарацию линий ПИ обычно удается удерживать в более узком коридоре (± 1 м).

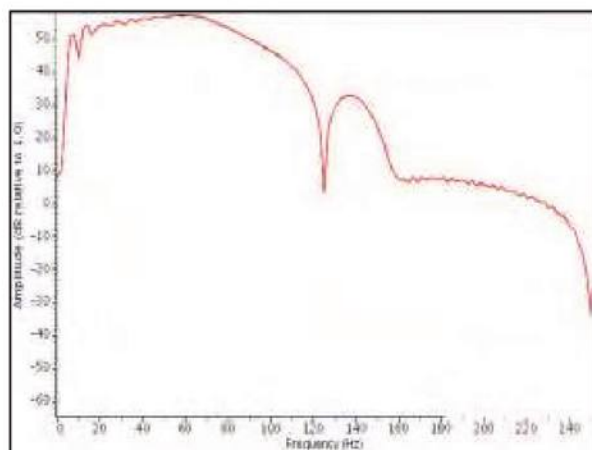
Изменение сепарации в IL направлении

Смещение линий ПИ в IL (параллельном) направлении - когда одна из линии ПИ «обгоняет» другую, в ходе выполнения полевых наблюдений обычно отдельно не контролируется – сама система крепления и буксировки линий ПИ не позволяет линиям значительно расходиться в данном направлении. Однако на практике такая ситуация возможна и может приводить к смещению линий друга относительно друга до 2 м (Рис. 14).

Сейсмические трассы, равно как и их спектры, для изучаемого случая совпада-



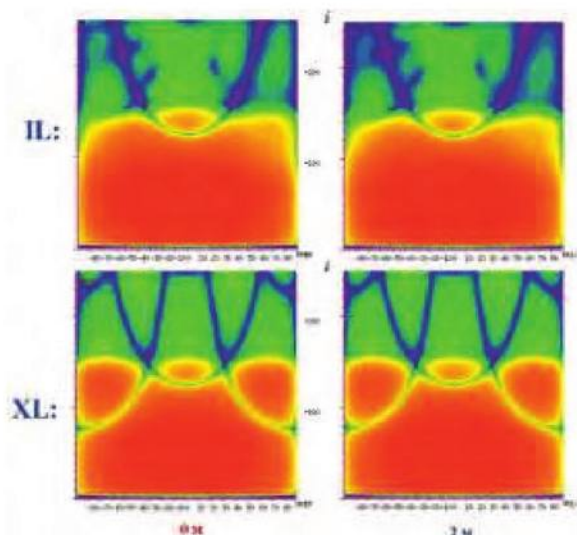
▲ Рис. 14. Сигнатуры источника, соответствующие изменению сепарации в IL направлении (0 м – черный, 2 м – красный).



▲ Рис. 15. Спектры сигнатур источника, соответствующие изменению сепарации в IL направлении (0 м – черный, 2 м – красный).

ют до степени смещения. Матрица корреляции импульсов для данных моделей не приводится – коэффициент корреляции равен единице для всех реализаций эксперимента. Каких-либо различий в части азимутальных характеристик источника изменение сепарации вдоль IL также не вносит (Рис. 16).

Единственным атрибутом модели, где рассматриваемые изменения проявляют себя – частотные диаграммы в плоскости dip/azimuth (Рис. 17), характеризующие в данном случае симметрию группы. В области высоких частот (60-90 Гц) наблюдаются видимые изменения, которые могут быть интерпретированы как поворот источника на плоскости.



▲ Рис. 16. Азимутальные диаграммы для сигнатур источника в случае смещения линий ПИ в IL направлении.

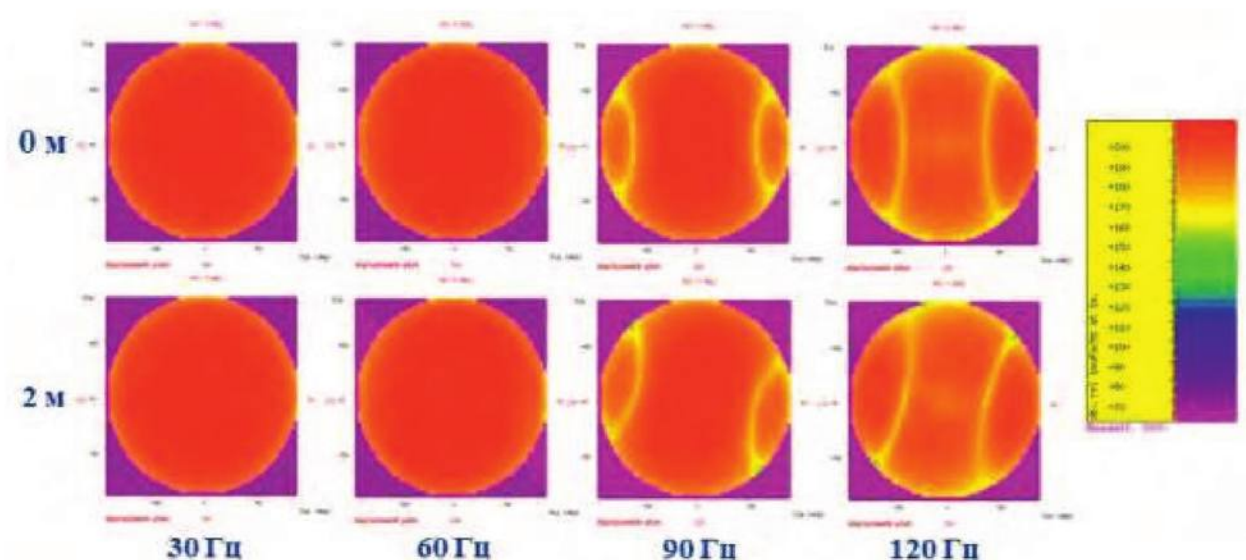
Выводы

Моделирование сигнатуры источника на стадии подготовки к полевым работам давно является отраслевой нормой, однако данный инструмент дает дополнительные возможности в оценке и, при необходимости, обоснованной корректировки спецификации параметров источника для конкретной исследуемой площади.

Так и или иначе, все рассмотренные в работе характеристики геометрии группы проявляются в сигнатуре источника и важно понимать каким образом.

Значимые изменения сигнатуры наблюдаются при изменении заглубления источника даже в узких пределах (± 0.5 м), при этом важно отметить, что при проведении сейсморазведочных работ зафиксировать этот параметр в более узком коридоре, фактически, не представляется возможным.

Влияние изменения сепарации в IL направлении пренебрежимо мало, тогда



▲ Рис. 17. Частотные диаграммы в плоскости dip/azimuth.

как соответствующие изменения в XL уже проявляются в сигнатуре источника. Между тем, имеющиеся на текущий момент полевые допуски в ± 2 м позволяют получать достаточно стабильный по площади импульс.

Для повышения стабильности сигнатуры источника должен быть предпринят комплекс мер как в части проведения полевых работ, так и в ходе последующей обработки. При проведении полевых наблюдений требуется уделять особое внимание контролю глубины погружения источника, для чего требуется обеспечить предсезонную калибровку и последующую корректную работу датчиков глубины пушек. В части стабилизации сепарации линий ПИ внутри группы возможен переход к системам активного управления группой, примеры подобных разработок уже существуют на зарубежных рынках и постепенно внедряются в практику производства работ.

На стадии обработки требуется переход к трехмерным адаптивным алгорит-

мам подавления волн-спутников и вторичных пульсаций. Подобные процедуры уже реализованы в современных пакетах обработки, однако, не всегда применяются на практике.

Литература

1. E. Kragh, 2002, The Leading Edge, Seismic repeatability, normalized RMS and predictability
2. A. Ziolkowski, R. Johnston, 1997, Geophysical Prospecting, Marine seismic sources: QC of wavefield computation from near-field pressure measurements
3. А.Н. Телегин, 2004, «Морская сейсморазведка»