

Методика получения сейсмоакустических данных высокого и сверхвысокого разрешения на акваториях с использованием системы наблюдений SplitMultiSeis

■ Бирюков Е.А., Исаенков Р.И., Понимаскин А.И., Иванова В.В., Токарев А.М.

В настоящее время в связи с активным освоением Арктического шельфа одним из актуальных направлений развития нефтегазовой отрасли является повышение безопасности строительства и эксплуатации морских добывающих комплексов. Для эффективного решения задач инженерно-геологических изысканий в первую очередь, для выявления и характеристики геологических опасностей необходимо получать данные высокого и сверхвысокого разрешения. В данной статье мы рассказываем о наиболее важных требованиях, которым должны удовлетворять сейсмоакустические данные для успешного решения инженерных задач, а также показываем реализацию методики получения данных высокого и сверхвысокого разрешения с помощью системы двухуровневых трехчастотных наблюдений SplitMultiSeis.

Введение.

В настоящее время в связи с активным освоением Арктического шельфа одним из актуальных направлений развития нефтегазовой отрасли является повышение безопасности строительства и эксплуатации морских добывающих комплексов. С точки зрения геологии угрозу безопасности представляют такие процессы и явления как: сейсмичность; оползни; тектонические нарушения; газонасыщенные пласты, находящиеся под высоким поровым давлением; газовые гидраты; многолетнемерзлые породы и многие другие. Причем зоной особого интереса для морского строительства является верхняя часть геологического разреза (как правило, до 100 м по грунту).

Для эффективного решения задач инженерно-геологических изысканий, в первую очередь, для выявления и характеристики геологических опасностей, необходимо получать данные высокого и сверхвысокого разрешения. Таким образом, необходима методика работ для получения таких данных и критерии оценки качества данных. Стоит заметить, что нельзя просто использовать методики стандартные для нефтяной сейсморазведки (10-100Гц), так как необходимо учитывать специфику работ на высоких частотах.

В данной статье мы рассказываем о наиболее важных требованиях, которым должны удовлетворять сейсмоакустические данные для успешного решения инженерных задач. В качестве примера будет рассмотрено, как эти требования учитывались при получении данных высокого и сверхвысокого разрешения с помощью системы двухуровневых трехчастотных наблюдений SplitMultiSeis.

Методика SplitMultiSeis.

Методика, реализованная с помощью программно-аппаратурного комплекса SplitMultiSeis, разработана специально для эффективного решения задач инженерных изысканий. Она состоит из поверхностных и заглубленных систем наблюдений с использованием разных типов источников, что позволяет оптимизировать процесс получения данных.

Сейсмоакустическое профилирование выполняется в трехчастотном диапазоне:

Параметрический профилограф - Ультравысокоразрешающая сейсморазведка (СУВР, eng. ultrahighresolution-seismic, UHR) - центральные частоты записи 8 кГц и 100 кГц;

Электроискровой источник «Спаркер» с регистрацией заглубленной 16-канальной косой. - Сверхвысокоразрешающая

сейсморазведка (CCBP, eng. veryhighresolutionseismic, VHR) - центральная частота сигнала около 500 Гц;

Акустический пневмоисточник «пушка» с регистрацией 96-канальной косой - Высокоразрешающая сейсморазведка (CBP, eng. highresolutionseismic, HR) – центральная частота сигнала около 200 Гц.

Полный комплекс работ предполагает, что одновременно (за один проход судна) выполняется пять различных видов геофизических и гидрографических методов, а именно:

- батиметрическая съемка многолучевым эхолотом (МЛЭ);
- гидролокация бокового обзора (ГЛБО);
- непрерывное сейсмоакустическое профилирование в двухчастотном варианте (СУВР);
- сейсмическая заглабленная съемка сверхвысокого разрешения (CCBP);
- сейсмическая съемка высокого разрешения (CBP).

Так же осуществляется навигационное обеспечение всех видов работ.

Схема расположения всего геофизического, гидрографического и навигационного оборудования представлена на Рис.1.

Данная методика была протестирована

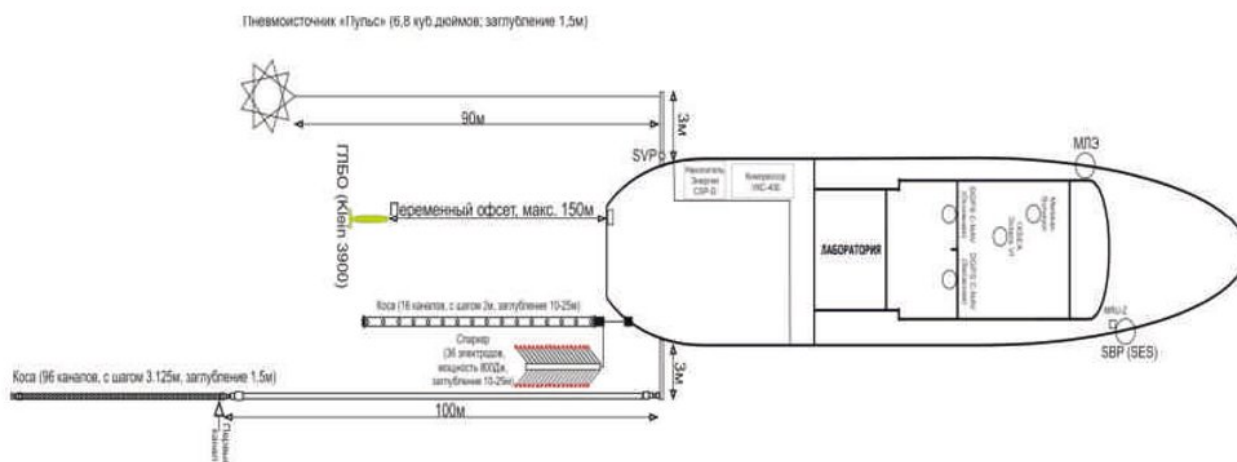
в условиях Белового моря, использовалась в производственных регионально-инженерных работах в море Лаптевых (получен 1501 погонный километр сейсмоакустических данных).

Аппаратура сейсмической съемки сверхвысокого разрешения с заглабленной косой (CCBP)

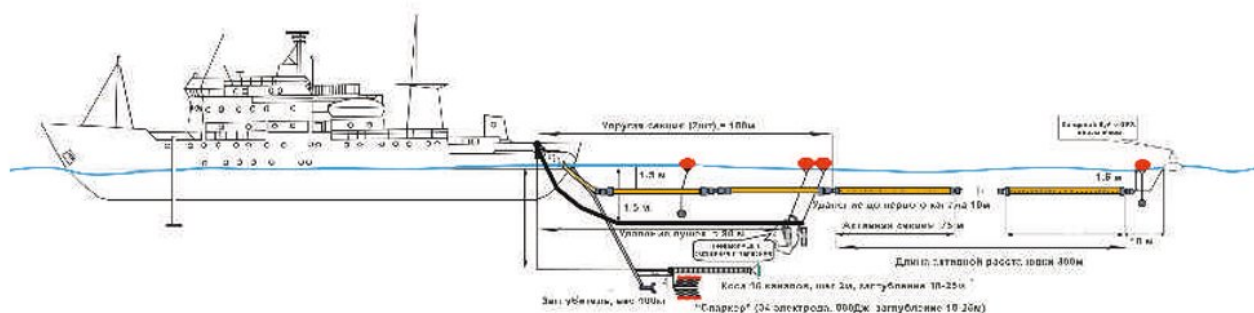
В табл. 1 приведены основные параметры используемой аппаратуры при проведении работ методикой CCBP. Аппаратура была подобрана таким образом, чтобы оптимизировать процесс работы, получать данные достаточного качества. Излучатель был сконструирован таким образом, чтобы влияние направленности для диапазона углов от 0 до 30 градусов и частот от 0 до 3 кГц не превышало 10%. Группирование каналов отсутствует, что обеспечивает диаграмму приема сигнала близкой к сферической.

Аппаратура сейсмической съемки высокого разрешения (CBP)

В табл. 2 приведены основные параметры используемой аппаратуры при проведении работ методикой CBP. Для уточнения положения линии приема, к концевой части был установлен буй с приемником GPS.



▲ Рис. 1а. Методика двухуровневых трехчастотных наблюдений, реализованная с помощью программно-аппаратурного комплекса SplitMultiSeis.



▲ Рис. 16. Методика двухуровневых трехчастотных наблюдений, реализованная с помощью программно-аппаратурного комплекса SplitMultiSeis.

▼ Табл. 1. Основные параметры аппаратуры, используемой при проведении работ методикой ССВР.

Устройство	Параметры	Иллюстрация
Электроискровой источник Geodevice	Количество электродов: 36/10/5 Расстояние между электродами: 2 см База группирования: 34 см	
Источник импульсного сигнала Geodevice	Энергия разряда: 800 Дж Емкость: 240 мкФ	
Регистрирующее устройство Split	Количество каналов: 16 Шаг между каналами: 2 м Длина приемного устройства: 30 м Группирование каналов: отсутствует	
Сейсмостанция Split	Параметры записи: Шаг дискретизации: 0.1 мс Время записи: 800 мс Разрядность АЦП: 14 бит	

▼ Табл. 2. Основные параметры аппаратуры, используемой при проведении работ методикой СВР.

Устройство	Параметры	Иллюстрация
Пневмоисточник Пульс	Используемое рабочее давление: 140 атм Объем: 100 см ³ Интервал возбуждения: ~ 4 м Центральная частота возбуждаемого сигнала: 250 Гц	
Регистрирующее устройство Си Технолоджи	Количество каналов: 96 Шаг между каналами: 3.125 м Длина приемного устройства: 300 м Группирование каналов: прямоугольное, 4 приемника на базе 1.5 м	
Сейсмостанция Си Технолоджи	Параметры записи: Шаг дискретизации: 0.25 мс Время записи: 1500 мс Разрядность АЦП: 24 бита	

Основные критерии для получения данных высокого и сверхвысокого разрешения:

Позиционирование

Для корректной обработки и интерпретации важным фактором является правильное позиционирование системы наблюдения. Волнение моря, подводные течения, изменения курса судна могут привести к отклонению реального поло-

жения системы наблюдений от рассчитанного теоретическим образом. Такие отклонения приводят к подвижкам положения источника и приемника. При работе на частотах порядка 50-100 Гц длина волны составляет около 15-30 метров в водной толще, а потому погрешности определения координат в первые метры несущественны. Однако при работе с высокочастотными источниками

(250-500 Гц) длины волн становятся равными 3-6 метров, а потому и точность определения координат должна быть не больше метра.

К сожалению, на данный момент практически невозможно найти навигационную систему, которая позволяла бы получать требуемую точность позиционирования и при этом была финансово доступна для использования в инженерных работах. (MissiaenT., 2005)

Однако сейчас развиваются альтернативные подходы к позиционированию, основанные на акустической привязке, датчиках давления, расположенных на косе и т.д. Некоторые проблемы позиционирования, например, с определением заглубления приемников, могут быть решены на этапе обработки.

Требования к источнику.

Спектральные характеристики

Исходя из требования высокого разрешения на получаемых данных большое внимание при выборе параметров методики следует уделять источнику. Наиболее важные параметры источника, определяющие вертикальную и горизонтальную разреженность записи, которые можно будет достичь при последующей обработке - это ширина полосы частот сигнала и центральная частота. Чем шире полоса – тем импульс уже и разрешение выше. Разрешающая способность на данных СВР должна быть примерно 2.5-5м и ширина полосы примерно от 70 до 250 Гц. На данных ССВР разрешение должно быть 0.5-1.5 м и ширина полосы частот от 150 до 750 Гц (Шматков А.А., 2016)

При работе методикой SplitMultiSeis в качестве источника заглубленной части системы использовался электроискровой источник «спаркер». Спектральные характеристики сигнала «спаркера» зависят от глубины погружения источника, мощнос-

ти и количества электродов. Зависимость видимого периода описывается эмпирической формулой (Калинин, Пивоваров и др, 1983)

$$T = \frac{1,15U^{0,5}C^{0,3}}{(1 + 0,1h_u)^{\frac{5}{6}}}$$

где U – напряжение, C –емкость, h_u – заглубление источника.

Таким образом, при работе с источником «спаркер» можно с помощью изменения мощности источника и количества электродов варьировать спектральные характеристики сигнала, что является важнейшим фактором для работ в прибрежных зонах, в условиях меняющихся глубин моря и позволяет адаптировать систему к решению широкого диапазона геологических задач.

Направленность

Другим важным параметром источника является направленность. Источники, характеризующиеся высокой направленностью, будут показывать снижение центральной частоты и ширины спектра сигнала на дальних удалениях. (Verbeek, 1995) Таким образом, для проектировки съемки таким образом, чтобы было возможно обеспечить равномерное покрытие на всем диапазоне удалений, направленность источника должна быть либо сферической, либо известной заранее. Если для последующей обработки важна сохранность формы сигнала во всем диапазоне удалений, например, для таких процедур как AVO анализ, необходимо также учитывать направленность источника. Рассмотрим метод расчета диаграммы направленности для группы источников.

Параметры группы наиболее просто рассчитываются для случая, когда криволинейностью годографа наблюдаемой волны можно пренебречь, т.е. сейсмичес-

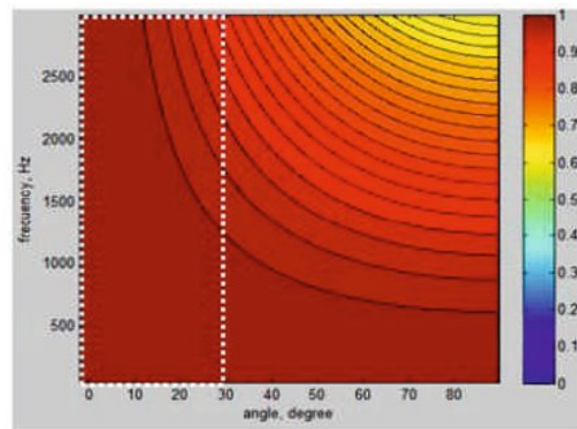
кие волны можно считать локально плоскими, а их кажущиеся скорости в пределах базы группы – постоянными. Диаграмму направленности можно рассчитывать по формуле для плоских монохроматических волн (Фейнман и др, 1965):

$$K(\omega) = \frac{\sin\left(\frac{n\varphi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)}$$

$$\varphi = \frac{\omega \Delta x}{V} \sin \alpha,$$

где ω – круговая частота волны, Δx – расстояние между приемниками, n – количество приемников в группе, V – скорость распространения волн в среде, α – угол подхода волны, отсчитываемый от вертикали, φ – фазовое запаздывание волны для одного из пары близстоящих приемников.

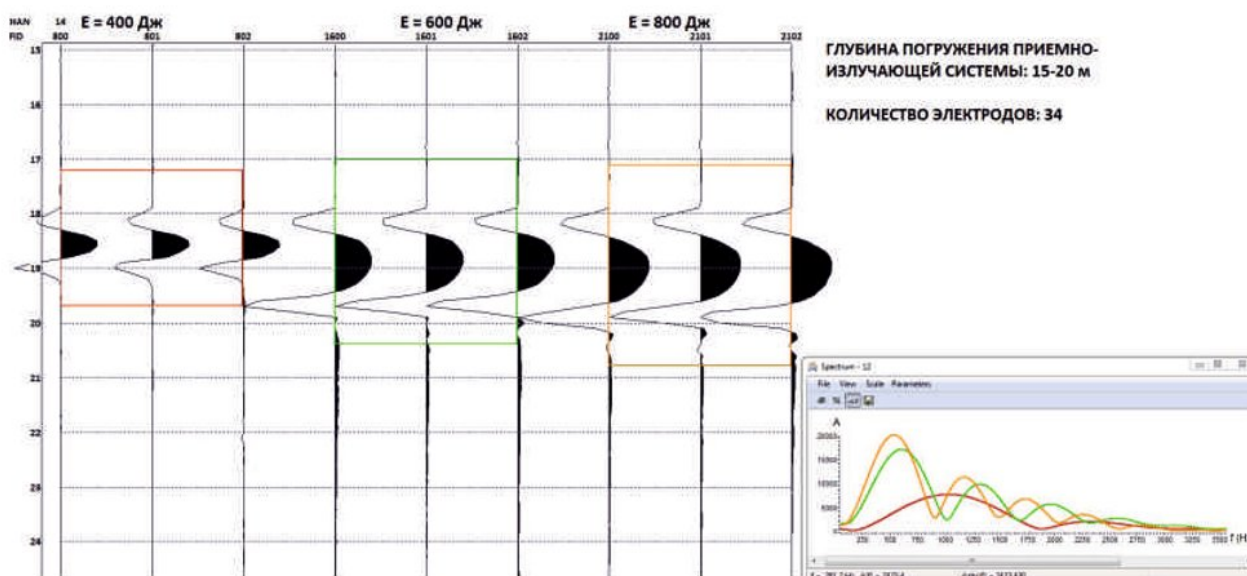
В системе SplitMultiSeis был выбран многоэлектродный спаркер, сконструированный таким образом, что в полезном диапазоне частот его сигнал не подвержен влиянию направленности. Рассчитанная направленность источника показана на Рис. 2., сигнал и его спектр при различных условиях возбуждения показан на Рис. 3.



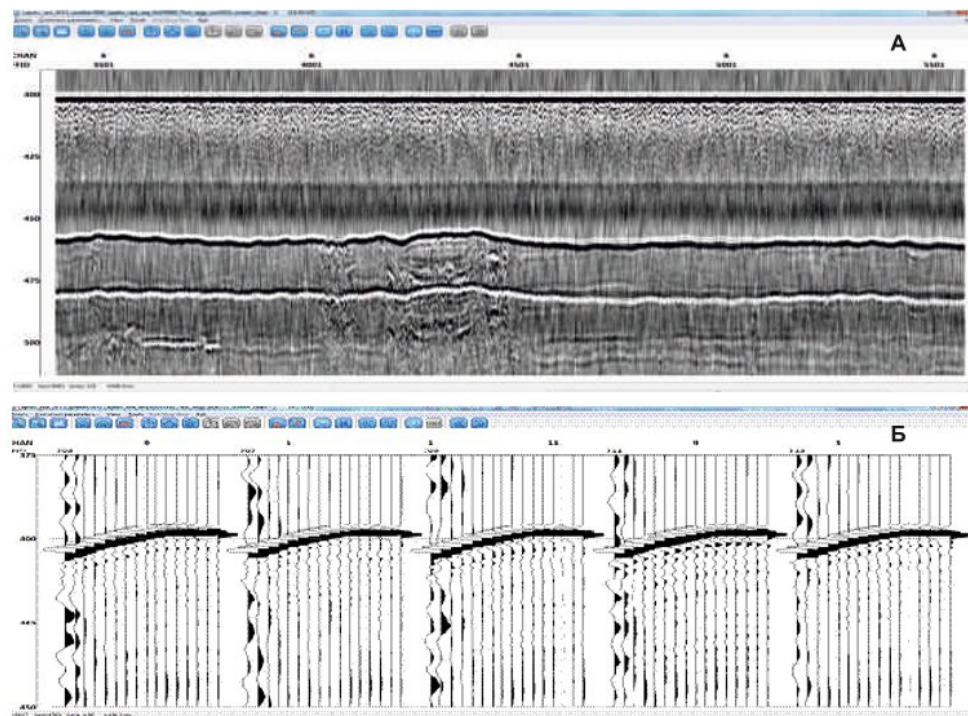
▲ Рис. 2. Характеристика направленности электроискрового источника. По горизонтальной шкале – углы излучения, отсчитываемые от нормали к свободной поверхности, по вертикали – частота сигнала.

Максимальное изменение амплитуды сигнала в диапазоне частот 0–3 кГц и углов 0–30 градусов составляет 12 % для частоты 3 кГц и угла 30 градусов. Основная часть энергии сигнала (из анализа амплитудного спектра рисунок 3) сосредоточена в диапазоне частот до 1.5–2 кГц. Частоты в диапазоне от 0 до 1000 Гц (первый лепесток амплитудного спектра сигнала) практически не подвержены влиянию направленности. (Токарев, Пирогова, 2015).

▼ Рис. 3. Сигнал прямой волны, зарегистрированный дальним каналом при различных параметрах наблюдений.



► Рис. 4(а, б).
Отражения
от источника
пушка на данных
заглубленной
косы.



Стабильность сигнала

Также необходимо уделять большое внимание стабильности сигнала. За счет многоуровневой системы наблюдения при работе методикой SplitMultiSeis, помимо того, что используются стандартные методы набортного контроля качества сигнала (гидрофон в ближней зоне, просмотр амплитудного спектра сигнала, просмотр соотношения сигнал/шум) открываются дополнительные возможности контроля качества данных. Заглубленной системой можно регистрировать сигнал пневмоисточника, причем на такой сигнал не будет влиять ни группирование, ни заглубление поверхностной косы, что позволяет уверенно оценивать заглубление и стабильность работы источника. Пример такой записи показан на рисунке 4.

Требования к приемной группе

Пространственный алиасинг

В первую очередь при планировании съемки необходимо стараться избежать пространственного алиасинга. Наличие пространственного алиасинга – один из

сильнейших факторов, влияющих на качество обработки. Пространственный алиасинг возникает, если шаг между двумя соседними точками приема слишком велик и это приводит к временному разрыву, большему, чем видимый период для одной и той же волны (Sheriff and Geldart, 1983). Таким образом, оптимальный интервал между приемниками Δx будет функцией угла отражения и максимальной частоты сигнала (Missiaen T., 2005).

$$\sin(\theta_{\max}) \leq \frac{V}{2f_{\max} \Delta x}$$

В комплексе SplitMultiSeis шаг между каналами был выбран таким образом, чтобы избежать пространственного алиасинга: 3,125 метра у приповерхностной косы, а у заглубленной – 2 м. Таким образом, при центральной частоте от 250-500 Гц, расстоянии между приемниками в 3,125 метров, скорости в воде 1480 м/с и максимальной частоте сигнала в 500 Гц пространственного алиасинга можно будет избежать для событий, пришедших под углом менее 30 градусов. При тех же параметрах, но шаге между приемника-

ми в 2 метра, алиасинга удастся избежать для событий, пришедших под углами в 48 градусов

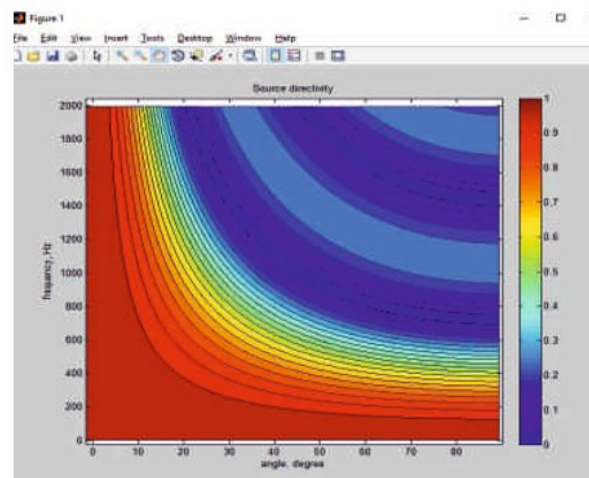
Направленность приемной группы

Для применения процедур динамического анализа важно также иметь представление о диаграмме направленности приема. Направленностью заглубленной косы можно пренебречь, так как в ней каналы не группированы (см. табл 1), важно оценить направленность поверхностной системы. Это необходимо для корректной обработки, дальнейшей интерпретации динамических параметров данных. Пример диаграммы для показана на рисунке 5.

Форма импульса

Для оценки геологических опасностей необходимо в процессе обработки повышать разрешение в данных такими процедурами как деконволюция, получать дополнительную информацию для интерпретации из динамического анализа и инверсии. Для проведения этих процедур нужно знать форму импульса сигнала.

При производстве работ с приповерхностной системой наблюдения, сигнал



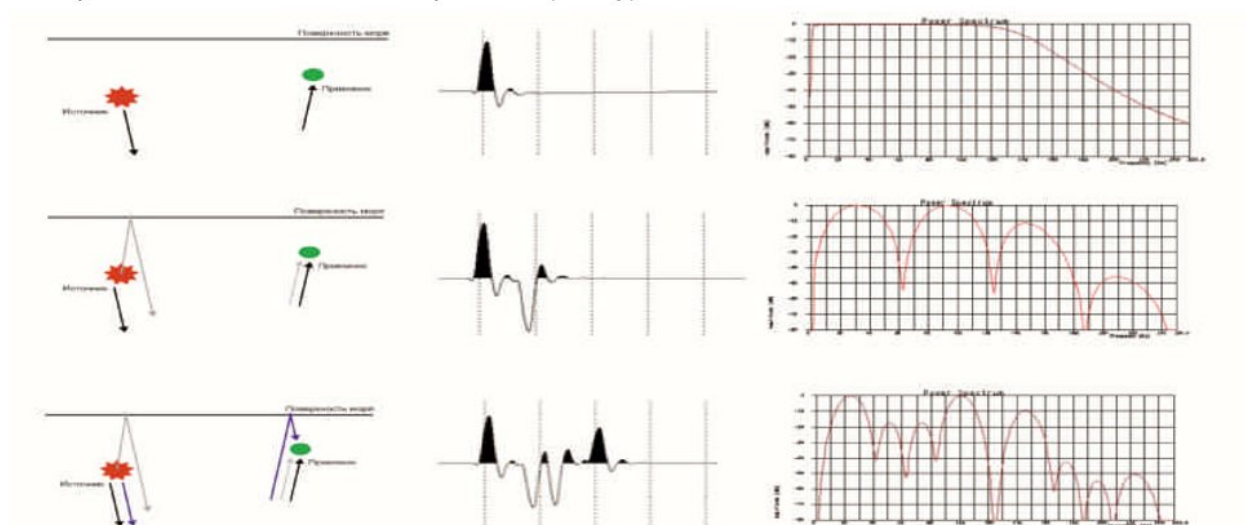
▲ Рис. 5. Характеристика направленности группированного канала. По горизонтальной шкале – углы подхода волны, отсчитываемые от нормали к свободной поверхности, по вертикали – частота принимаемого сигнала.

отраженной волны осложняется волнами-спутниками (Рис. 6).

Волна-спутник – это отраженная от поверхности моря упругая волна, возбуждаемая источником. Таким образом, импульс является результатом интерференции отраженной волны и волны-спутника.

В отличие от приповерхностной системы, при заглублении приемно-излуча-

▼ Рис. 6. Принципиальная схема формирования сигнала, сигнатура и ее спектр для волны, отраженной от дна (сверху), волны, отраженной от дна и осложненной волной-спутником за источник (по центру) и волны, отраженной от дна и осложненной волнами-спутниками за источник и приемник(снизу).



ющей системы волна спутник имеет временную задержку больше длины импульса и не влияет на спектр отраженной волны. Поэтому можно из данных извлечь импульс источника, свободный от интерференции.

Комбинирование приповерхностной системы с заглубленной при проведении съемки, как в системе SplitMultiSeis, обеспечивает дополнительную регистрацию волнового поля однократно отраженных волн без влияния свободной поверхности (поверхность граничащих сред вода-воздух). За счет этого форма зарегистрированного сигнала стабильнее по профилю, что обеспечивает высокое качество последующего динамического анализа. Более того, в случае заглубленной методики появляется возможность оценки реальной сигнатуры излучаемого импульса для каждой трассы профиля.

Кинематический анализ

Знание о скоростях являются ключевыми не только непосредственно для суммирования по ОГТ, а также для проведе-

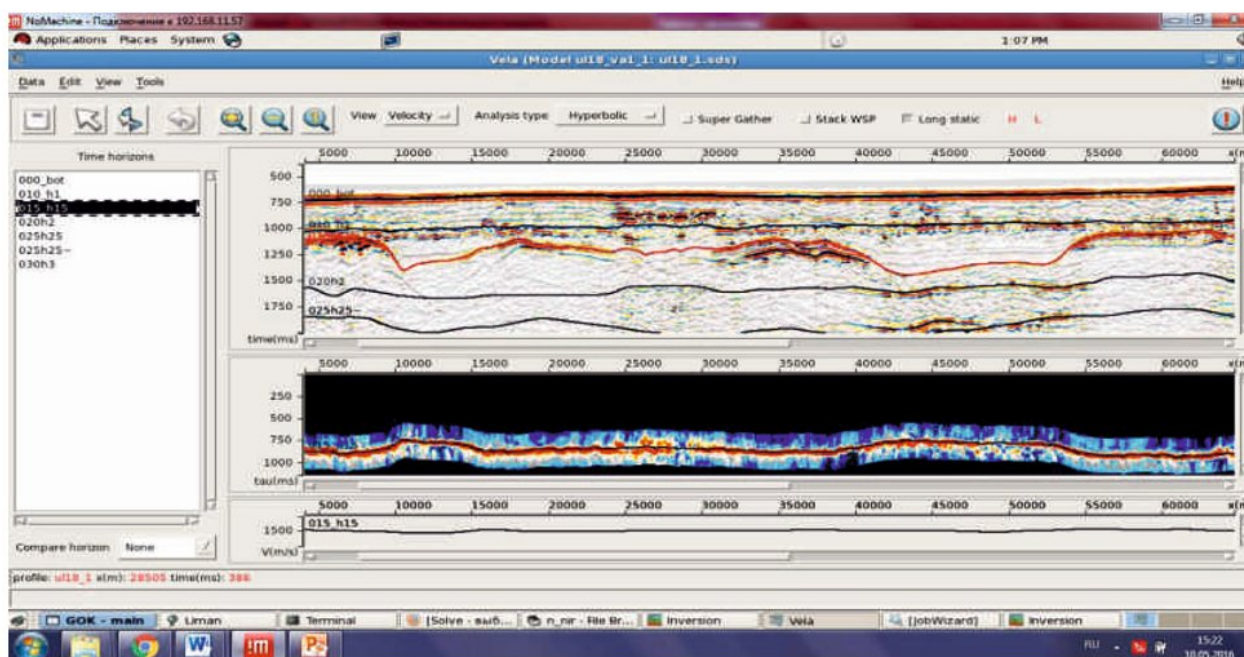
ния инверсии, дальнейшей интерпретации данных для выделения геологических опасностей.

Оптимальные скорости можно определить путем вертикального скоростного анализа и уточнить посредством горизонтального. На точность скоростного анализа будет влиять, в первую очередь длина годографа, которая напрямую зависит от длины расстановки. Величина длины годографа, достаточная для эффективного скоростного анализа, зависит, в свою очередь, от сейсмогеологических условий, глубины моря, скоростных контрастов. Частый шаг между приемниками и большая длина приповерхностной косы в системе SplitMultiSeis позволяет достигнуть высокой точности скоростного анализа. Пример спектра скорости для данных, полученных методикой SplitMultiSeis представлен на Рис. 7.

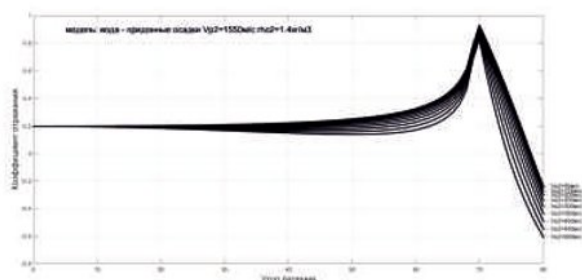
Диапазон углов падения-отражения

Диапазон углов падения-отражения должен удовлетворять требованиям AVO (amplitude-versus-offset) анализа; Стоит

▼ Рис. 7. Горизонтальный спектр скорости по данным полученным методикой SplitMultiSeis.



отметить, что для инженерных задач на акватории целевой интервал геологического разреза составляет первые десятки метров от морского дна. В данном интервале отложения, как правило, представлены слабо консолидированными мягкими осадками, акустические свойства которых незначительно изменяются как по глубине, так и по латерали. Для дифференциации таких осадков по упругим свойствам с помощью акустических методов, требуется широкий диапазон углов падения, обычно $>30^\circ$.



▲ Рис. 8. Изменение AVO-отклика от морского дна для придонных осадков с различными V_s .

Как видно из рисунка 8, AVO-отклик различных придонных осадков существенно различается только при углах падения более 30 градусов. В связи с этим, необходимо иметь широкий диапазон углов, чтобы успешно проводить AVO-анализ.

Заглубление системы, параметры которой аналогичны приповерхностной системе (активная длина регистрирующей линии), позволяет расширить диапазон углов отражения регистрируемых волн, что, в свою очередь, повышает точность и эффективность кинематического анализа времен прихода волн, а также AVO (amplitude-versus-offset) – анализа. Таким образом, использование заглубленной системы при работе с методикой SplitMultiSeis позволяет про-

вести эффективную оценку динамических характеристик записи.

Контроль качества и система сбора

При наличии множества требований к данным, необходимо непосредственно на этапе сбора контролировать их качество. Для этого в системе сбора должна быть предусмотрена возможность контроля формы импульса сигнала, спектра сигнала, возможность визуализации как сейсмограмм, так и данных общего пункта приема. Система сбора данных SplitMultiSeis разработана специально под специфику получения данных высокого и сверхвысокого разрешения, и предусматривает контроль всех важнейших факторов.

Заключение

Разработка методик инженерных морских сейсмоакустических исследований для выделения геологических опасностей, требований к методикам для целей дальнейшего динамического анализа, интерпретации являются актуальными задачами в настоящее время. В качестве примера одной из методик для получения данных достаточного разрешения была предложена методика, реализуемая с помощью программно-аппаратного комплекса SplitMultiSeis.

Комплекс SplitMultiSeis дает возможность проводить работы на глубинах от 10 м, покрывая таким образом почти все российские акватории, за исключением транзитных зон. При этом за один проход судна выполняется 5 видов работ, что значительно сокращает время и затраты на проведение съемки. Заглубленная съемка ССВР позволяет продолжать съемку при значительном ухудшении

погодных условий, что также увеличивает производительность выполнения работ. Наблюдения на разных уровнях и частотах открывают дополнительные возможности контроля качества, что позволяет надежно и оперативно определять сбои работы различных компонент комплекса.

Стабильность исходного сигнала и возможность его контроля позволяют устойчиво определять динамические атрибуты записи.

Резюмируя вышеизложенное, система SplitMultiSeis позволяет проводить работы на высоком уровне, получать данные, на основе которых возможна детальная интерпретация, выделение геологических опасностей. Подобная методика показала полезность при проведении работ в море Лаптевых, где позволила значительно сократить временные затраты и оптимизировать процесс получения данных.

На основании данных, полученных с помощью двухуровневой трехчастотной системы SplitMultiSeis, были выделены геологические опасности в диапазоне глубин от первых до сотен метров. Совместная интерпретация данных разного разрешения повысила достоверность выделения таких объектов как приповерхностный газ, многолетнемерзлые породы и т.д.

Литература

1. Калинин А.В., Калинин В.В., Пивоваров Б.Л. Сейсмоакустические исследования на акваториях, М. Недра, 1983.
2. Токарев М.Ю., Пирогова А.С., Определение упругих свойств газонасыщенных осадков по данным сверхвысокоразрешающих сейсмоакустических наблюдений с заглубленной системой. Кандалакшский залив, Белое море, Технологии сейсморазведки, № 3, с. 66-74, 2015.
3. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике, том 3, Мир, 1965.
4. Шматков А.А., Разработка методики трехмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях, Кандидатская диссертация по специальности 25.00.10 - Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых (техн. науки), 2016.
5. Missiaen T., 2005, VHR 3D marine seismics for shallow water investigations: some practical guidelines. Marine Geophysical Researches 26, 145–155.
6. Sheriff R.E., Geldart L.P. Exploration seismology (Data-processing and interpretation) (vol.2), Cambridge University Press – 1983.
7. Verbeek N., 1995, Aspects of high resolution marine seismics. PhD thesis, University of Utrecht, 134 p.