

Эффективность морских источников сейсмических сигналов в условиях предельно малых глубин моря

- Рудаков А.В., АО «Южморгеология», г. Геленджик,
- Гуленко В.И., ФГБОУ ВО «Кубанский госуниверситет», г. Краснодар

В настоящее время, как правило, сейсмические исследования в транзитных зонах выполняют по технологии ОВС [1, 3 и др.] с применением телеметрических регистрирующих комплексов, где в качестве датчика может служить как одиночный сейсмоприемник, так и многокомпонентный. В качестве источников сейсмических сигналов обычно применяют пневматические излучатели. Область применения морской сейсморазведки с донными косами продолжает расширяться за счет повышения спроса на сейсмические данные высокого качества для обеспечения эффективной разведки и разработки месторождений. В значительной степени этому способствует дальнейшее совершенствование технологий морской сейсморазведки с применением донных телеметрических кос.

Как известно, транзитная зона характеризуется многообразием поверхностных условий и резкой их сменой. Мощность водного слоя зачастую близка к минимальной. В таких условиях нередко возникает вопрос о качестве регистрируемых данных из-за отсутствия оптимальных условий для формирования сигнала, излучаемого пневматическим источником при малой мощности водного слоя.

При небольшой глубине акватории есть два варианта применения пневматического источника.

Первый вариант, и довольно традиционный, – это буксируемая в водном слое группа отдельных излучателей, сконфигурированная с учётом оптимальных акустических характеристик в единую конструкцию. В этих условиях суммарный объём подобных групп обычно не превышает 12–14 л.

Второй вариант, ввиду более сложной реализации пока менее распространенный, – это погружной пневматический источник, предназначенный для возбуждения упругих волн под дном моря в неглубокой скважине.

Цель данной работы – оценка эффективности и целесообразности применения этих двух решений для возбуждения сейсмического сигнала в условиях малых и предельно малых глубин.

Принимая во внимание, что оба варианта подразумевают использование именно пневматических источников, то стоит отметить, что наиболее широкое применение в последние годы получили скважинные пневмоисточники фирмы «Bolt Technology Inc». Эти источники выпускаются в разных исполнениях: как для работы в чистой воде при обычной морской сейсморазведке, так и в скважинной модификации DHS, известные также как Mud Guns (грязевые пушки), которые используются в сильно загрязненных акваториях, в болотистой местности и для возбуждения упругих волн в скважинах. Основное отличие этих источников – высокая защищенность от попадания абразивных частиц в трущиеся узлы источника и высокая надежность при работе в сильно загрязненной среде.

Транзитная, или переходная зона, как особый вид сейсмогеологических условий, характеризуется целым набором специфических факторов, создающих особые трудности при проведении сейсморазведочных работ. К числу таких факторов относятся:

1. Интерференция упругих волн в водном слое.

2. Влияние границ «вода-воздух» и дно на акустические характеристики пневматических источников.

3. Потери энергии на неупругие деформации при распространении сейсмических волн в неконсолидированных грунтах донной толщи и др.

4. Латеральная изменчивость донного грунта.

5. Неоднородность строения дна.

6. Волны-помехи.

7. Влияние водной растительности.

С разной степенью полноты эти вопросы рассматриваются в ряде публикаций [2, 4, 5, 6–8 и др.].

Вначале рассмотрим влияние границ и интерференции упругих волн в водном слое глубиной H на акустические характеристики источника, буксируемого на глубине $h_u \leq H$. Вследствие многократных отражений в водном слое от границы «вода-воздух» с коэффициентом отражения -1 и от границы дна с коэффициентом отражения равным k_{omp} волна, излучаемая источником в нижнее полупространство, является интерференционной. При этом выражение, описывающее профиль интерференционной волны давления, излучаемой в любом направлении α_2 нижнего полупространства (угол α_2 отсчитывается от вертикали: $-\pi/2 \leq \alpha_2 \leq \pi/2$), полученное в приближении плоских волн, в дальней зоне (без учета расхождения) может быть записано в виде суммы волн, излучаемых действительным излучателем и бесконечной цепочкой мнимых излучателей, расположенных в верхнем полупространстве [3–5]:

$$F(t) = k_{np\downarrow} \cdot \sum_{l=0}^{\infty} (-k_{отр})^l [f(t - l \cdot \tau_1) - f(t - l \cdot \tau_1 - \tau_2)], \quad (1)$$

где $\tau_1 = 2H/(C \cdot \cos \alpha_1)$; $\tau_2 = 2h/(C \cdot \cos \alpha_1)$; $l = 0; 1; 2; \dots$; $C = 1500$ м/с – скорость звука в

воде; $f(t)$ – профиль волны давления, излучаемой источником в безграничном пространстве (функция источника); α_1 – угол выхода луча из источника (отсчитывается от вертикали); k_{omp} – коэффициент отражения от дна; $k_{np\downarrow}$ – коэффициент преломления волны при переходе из водного слоя в нижнее полупространство.

Комплексный спектр этой функции имеет следующий вид:

$$S_F(i\omega) = k_{np\downarrow} \cdot S_f(i\omega) \cdot \sum_{l=0}^{\infty} (-k_{отр})^l e^{-i\omega \cdot l \cdot \tau_1} (1 - e^{-i\omega \cdot \tau_2}), \quad (2)$$

где $S_f(i\omega)$ – комплексный спектр функции $f(t)$.

Отсюда обобщенная комплексная интерференционная характеристика источника в водном слое может быть получена в виде:

$$K_u(i\omega, h, H) = S_F(i\omega) / S_f(i\omega) = k_{np\downarrow} \cdot (1 - e^{-i\omega \cdot \tau_2}) \sum_{l=0}^{\infty} (-k_{отр\downarrow})^l e^{-i\omega \cdot l \cdot \tau_1}. \quad (3)$$

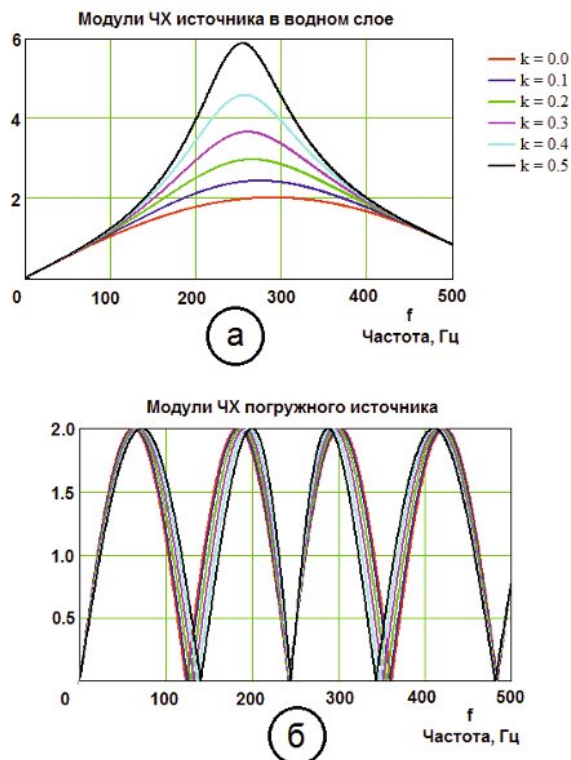
При излучении вертикально вниз ($\alpha_1 = 0$) аналогичное выражение можно получить и для погружного источника, расположенного в поддонной толще в скважине глубиной $H_{скв}$ (глубина отсчитывается от дна моря):

$$K_{скв}(i\omega, H_{скв}, H) = 1 - e^{-i\omega \cdot \tau_2} \cdot (k_{отр\uparrow} - k_{np\uparrow} \cdot k_{np\downarrow}) \cdot \sum_{l=1}^{\infty} [(-1)^l \cdot (k_{omp\downarrow})^{l-1} \cdot e^{-i\omega \cdot l \cdot \tau_1}] \quad (4)$$

где $\tau_1 = 2 \cdot H/C$; $\tau_2 = 2 \cdot H_{скв}/V$; V – скорость упругих волн в поддонной толще; $k_{omp\uparrow}$, $k_{omp\downarrow}$, $k_{np\uparrow}$, $k_{np\downarrow}$ – коэффициенты отражения и преломления на границе дна, стрелками показано направление падения волны на границу.

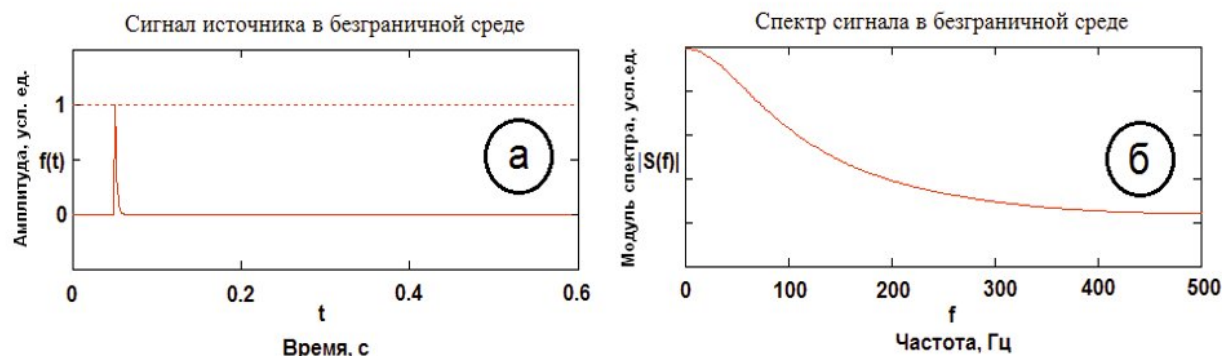
В качестве примера на рис.1 приведены модули этих характеристик при глубине моря $H = 1.5$ м, $\alpha_1 = 0$ и при разных коэффициентах отражения от дна: $k_{omp\downarrow} =$

0; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4 и 0.5. Глубина погружения пневмоисточника в водном слое – рис.1 (а) – составляет $h = 1.3$ м, погружной источник – рис.1 (б) – находится в скважине глубиной $H_{скв} = 2.5$ м (от дна), скорость упругих волн в донном грунте $V = 800$ м/с.



▲ Рис. 1. Модули частотных характеристик пневмоисточников при глубине моря $H = 1.5$ м, $\alpha_1 = 0$; (а) – глубина источника в водном слое $h = 1.3$ м; (б) – погружной источник в скважине $H_{скв} = 2.5$ м.

Пусть сигнал, излучаемый источником в безграничной среде, имеет следующий вид – рис.2.



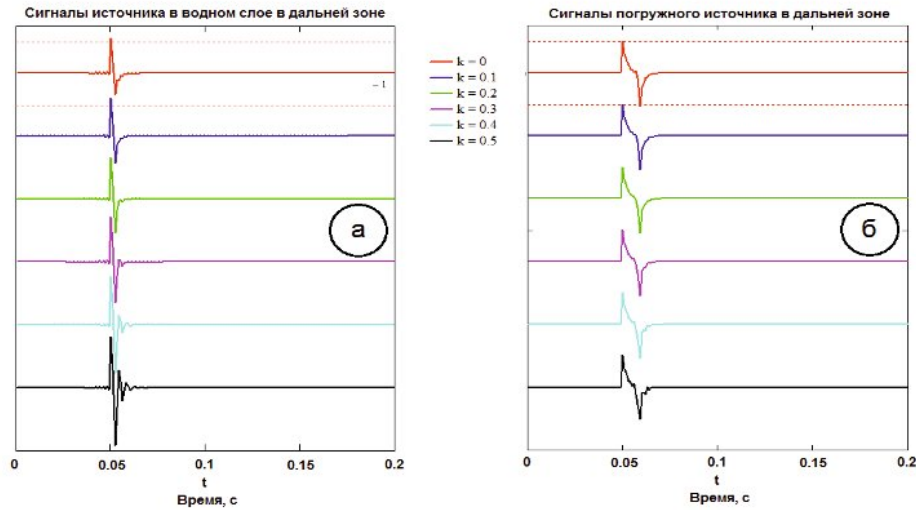
▲ Рис. 2. Сигнал источника в безграничной среде и его амплитудный спектр.

Тогда, с учетом частотных характеристик (3) и (4), сигналы рассматриваемых источников, излучаемые в вертикальном направлении, в дальней зоне будут иметь вид, показанный на рис. 3.

Как следует из сопоставления характеристик и сигналов, представленных на рис.1 и рис.3, частотная характеристика источника, находящегося в водном слое, существенно зависит от глубины моря. При малых глубинах водного слоя максимум характеристики смещается в область относительно высоких частот ($f_{max} = 1/(2 \cdot \tau_1)$), при этом частоты сейсмического диапазона оказываются в полосе гашения. Как видно из (4) и рис.2(б), частотная характеристика погружного источника при $\tau_2 \gg \tau_1$ слабо зависит от глубины моря и практически не зависит от жесткости дна. Сейсмические частоты в излучении погружного источника при этом находятся в полосе пропускания в пределах первого лепестка частотной характеристики, ширина которого, как следует из выражения (4) при $k_{опр\downarrow} = 0$, определяется выражением: $\Delta f = (\tau_1 + \tau_2)^{-1}$.

Теперь выясним, что происходит в приемнике, который на предельном мелководье обычно находится на дне водного слоя, после отражения сейсмической волны от глубокой границы.

При сейсморазведочных работах на предельном мелководье для приема отраженных волн обычно применяются



▲ Рис. 3. Сигналы источника в водном слое (а) и погружного источника (б) в дальней зоне при разных коэффициентах отражения от дна.

«PZ dual sensor» – системы датчиков гидрофон + вертикальный геофон [3, 5], которые располагаются на дне моря на глубине H . Вследствие многократных отражений в водном слое волна, приходящая к приемнику снизу так же, как и волна, излучаемая источником в нижнее полупространство, является интерференционной.

Поэтому обобщенная комплексная интерференционная характеристика гидрофона на дне водного слоя может быть получена в аналогичном виде [3]:

$$K_h(j\omega, H) = G_h(\omega) \cdot k_{np\uparrow} (1 - e^{-j\omega\tau_1}) \sum_{l=0}^{\infty} (-k_{omp\downarrow})^l e^{-j\omega \cdot l\tau_1}, \quad (5)$$

где $G_h(\omega)$ – собственная частотная характеристика гидрофона.

Немного иначе обстоит дело для вертикального геофона, установленного на дне водного слоя и имеющего упругий контакт с донным грунтом. В этом случае по сравнению с гидрофоном, регистрирующим волны давления, волны сжатия и разрежения, отраженные от поверхности «вода – воздух», геофоном регистрируются с обратными знаками. Соответствующая обобщенная комплексная интерференционная характеристика геофона,

установленного на дне водного слоя, имеет следующий вид [3]:

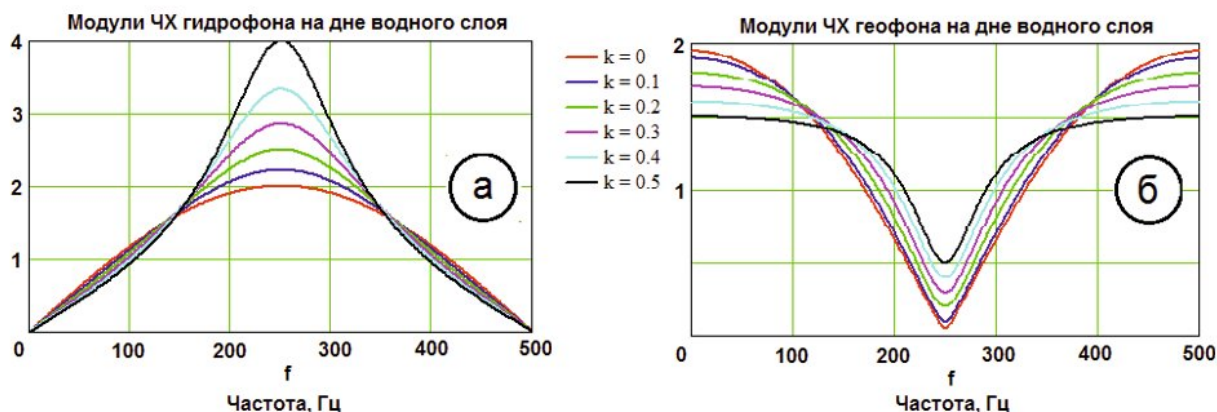
$$K_g(j\omega, H) = G_g(\omega) \cdot Q_g(\alpha_2) \cdot \left[1 + (1 - k_{отр}^2) \sum_{l=1}^{\infty} (-k_{отр})^{l-1} e^{-j\omega \cdot l\tau_1} \right],$$

где $G_g(\omega)$ – собственная частотная характеристика геофона, $Q_g(\alpha_2) = \cos(\alpha_2)$ – характеристика направленности вертикального геофона 1-го рода (угол α_2 отсчитывается от вертикали).

На рис.4 приведены модули частотных характеристик установленных на дне гидрофона (а) и геофона (б) при глубине моря $H = 1.5$ м, $\alpha_1 = 0$ и при разных коэффициентах отражения от дна: $k_{omp\downarrow} = 0; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4$ и 0.5 .

Сравнивая представленные на рис. 4 характеристики, можно говорить о том, что при глубине моря 1.5 м полоса пропускания Z-геофона соответствует сейсмическому диапазону частот 0–200 Гц, в отличие от гидрофона, частотная характеристика которого смещена в область более высоких частот с максимумом около 250 Гц и полосой пропускания в интервале 150–350 Гц.

На рис.5 приведены сигналы источника, буксируемого в водном слое, отраженные от глубокой границы и зарегистриро-



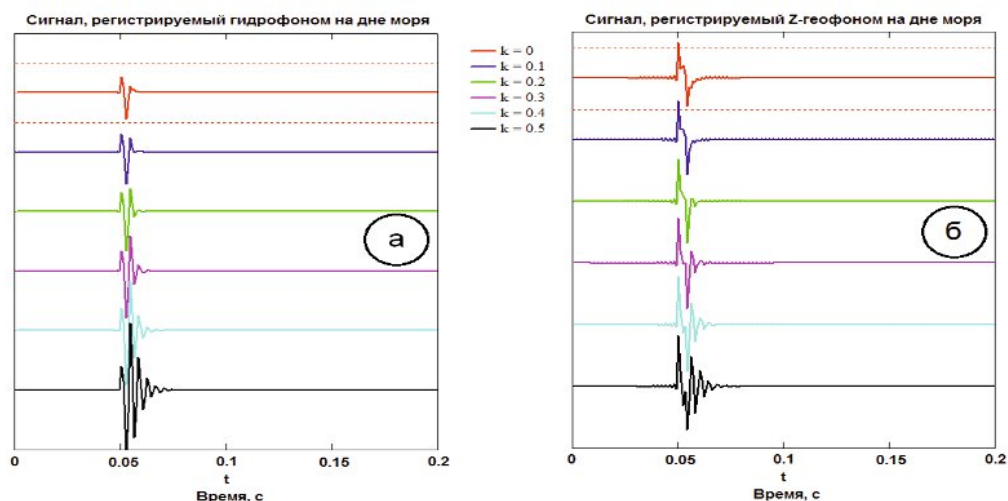
▲ Рис. 4. Модули частотных характеристик гидрофона (а) и геофона (б), установленных на дне моря; $H = 1.5$ м, $\alpha_1 = 0$; (а).

ванные гидрофоном (а) и Z-геофоном (б) на дне моря, рассчитанные для разных коэффициентов отражения от дна. На рис.6 приведены сигналы погружного источника, расположенного в скважине на глубине $H_{\text{скв}} = 2.5$ м от дна, отраженные от глубокой границы и зарегистрированные гидрофоном (а) и Z-геофоном (б) на дне моря, рассчитанные для тех же коэффициентов отражения от дна.

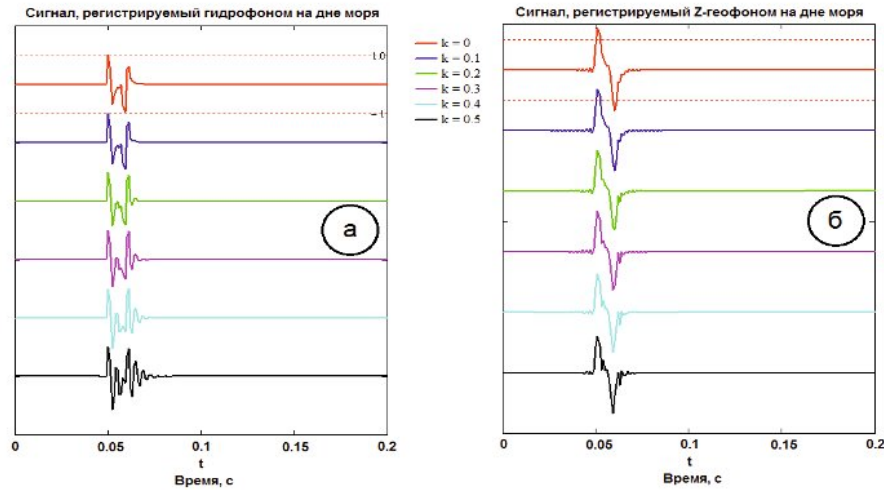
Различие сигналов, возбуждаемых буксируемым в водном слое источником, отраженных от глубокой границы и зарегистрированных гидрофоном и Z-геофоном на дне моря, при прочих равных параметрах обусловлено различиями их

частотных характеристик, представленных на рис.4.

Результаты расчёта, представленные на рис. 6, свидетельствуют о том, что применение погружного источника, при прочих равных условиях, практически полностью позволяет избежать влияния коэффициента отражения от дна на форму отраженного сигнала, регистрируемого гидрофоном, и вовсе нивелирует влияние данного параметра при регистрации отраженного сигнала геофоном. Из сопоставления сигналов, представленных на рис. 3(б) и 6(б), также следует, что геофон практически без искажений обеспечивает регистрацию сигналов,



▲ Рис. 5. Сигналы источника, буксируемого в водном слое, отраженные от глубокой границы и зарегистрированные гидрофоном (а) и Z-геофоном (б) на дне моря, рассчитанные для разных коэффициентов отражения от дна.



▲ Рис. 6. Сигналы погружного источника, расположенного в скважине на глубине $H_{\text{скв}} = 2.5$ м от дна, отраженные от глубокой границы и зарегистрированные гидрофоном (а) и Z-геофоном (б) на дне моря, рассчитанные для тех же коэффициентов отражения от дна.

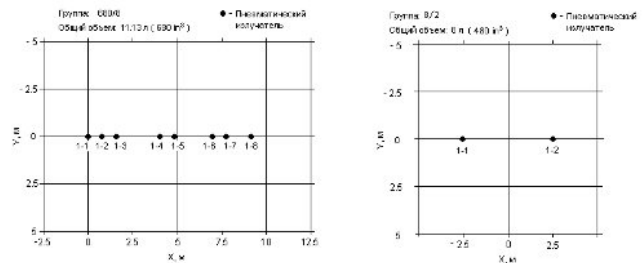
возбуждаемых погружным источником.

Рассмотрим результаты опытно-методических испытаний по опробованию этих источников в лиманно-плавневой зоне.

Возбуждения упругих волн выполнялись в лимане, глубина акватории которого составила 1.5 м. Как отмечалось ранее, в качестве источника сейсмического сигнала использовались пневмопушки фирмы «Bolt Technology Inc». В качестве системы сбора данных использовалась телеметрическая система «ARAM ARIES II». Учитывая то, что работы проводились в лиманно-плавневой зоне, регистрация сигнала осуществлялась как на геофоны, так и на гидрофоны, в зависимости от поверхностных условий.

На рис. 7 приведены конфигурации двух пневматических источников, которые применялись для возбуждения упругих волн при проведении опытно-методических работ. Объем буксируемого группового пневмоисточника составляет 11.13 л, группа состоит из восьми одиночных пневмоизлучателей разного объема. Объем погружного (скважинного) источника составляет 8 л. Группа состоит из 2-х пневмоизлучателей по 4 л каждый.

На рис. 8 представлена сейсмограмма, зарегистрированная на одном и том же пикете, при возбуждении групповым источником в водном слое (слева) и погружным пневматическим источником (справа).

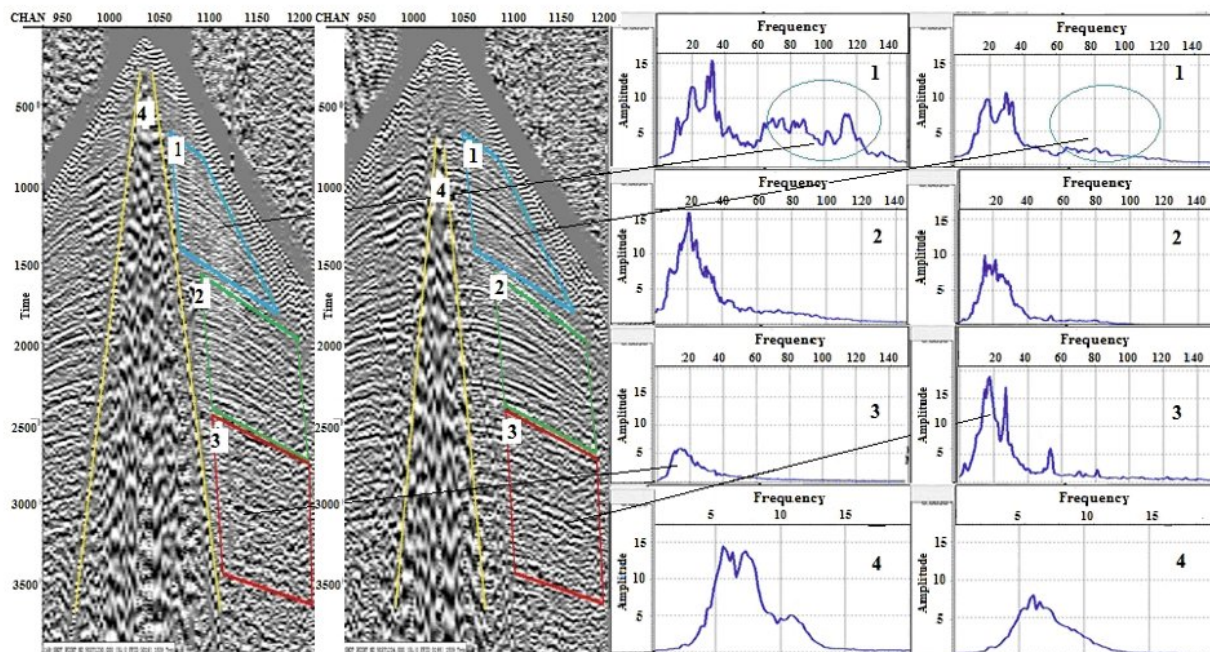


▲ Рис. 7. Конфигурации двух вариантов групповых пневмоисточников, применяемых на предельном мелководье.

Проведя анализ волновой картины в 4-х различных окнах сейсмограммы, можно отметить следующее:

1. Поверхностная низкоскоростная и низкочастотная волна выражена интенсивнее на сейсмограмме с излучением от группового источника. Об этом же свидетельствуют и спектры помехи в окне 4.

2. В 1-ой группе целевых отражений (окно 1) при излучении групповым пневмоисточником регистрируется высокочастотная помеха в области 100 Гц. Анализируя рис.1, где приведен модуль частотной характеристики источника, мы



▲ Рис. 8.

убеждаемся в корректности модельных расчётов. В области же частот 10–40 Гц, где и сосредоточена в основном энергия целевых отражений, амплитуда сигнала практически одинакова для обоих источников. Визуальная оценка сейсмограмм позволяет говорить о более выразительной прослеживаемости годографов при возбуждении погружным источником.

3. В интервале времен 1.5–2.5 с (окно 2) высокочастотная помеха от группового буксируемого пневмоисточника становится менее интенсивной и спектр сигнала приобретает более классический вид. Однако визуальная прослеживаемость отражений всё так же преобладает при использовании буксируемого источника.

4. Наиболее явным преимуществом применения погружного источника является наличие глубинных низкочастотных отражений на временах 2.5–3.5 с (окно 3).

Сравнивая результаты опытно-методических работ и модельных теоретических расчетов, необходимо еще учитывать и то обстоятельство, что регистрация сейсмограмм была выполнена с дискрет-

ностью 2.0 мс, т.е. в полосе частот, ограниченной сверху граничной частотой фильтра зеркальных частот в 205 Гц, что безусловно привело к существенному нивелированию различий частотных характеристик источников и приемников. При дискретности регистрации в 1.0 мс и, соответственно, в полосе частот до 410 Гц такое различие было бы значительно более выраженным.

Таким образом, проведя сравнительный анализ буксируемого и погружного источников, на основе теоретических расчетов и результатов реальных опытно-методических испытаний, можно с уверенностью утверждать о большей эффективности применения последнего в условиях предельного мелководья, особенно в сочетании с приемниками геофонами.

При глубинах акватории свыше 2–3 м для оценки эффективности применения источников с приемниками разных типов необходимо учитывать и другие факторы, в частности, существенное влияние двух этих технологий возбуждения упругих волн на производительность полевых

работ. Однако данный вопрос требует отдельного детального рассмотрения и будет представлен в последующих работах.

Литература

1. Ампилов Ю.П. Презентация «PGS» Тенденции в развитии рынка сейсморазведочных работ на российском шельфе // Сейсмические технологии, <Москва 2014>, тезисы докладов.
2. Ггельганц А.А., Серебренников Г.П. и др. Отчет по теме 105-80Н.: Совершенствование методики сейсмических исследований на мелководном шельфе (в 2-х частях). – Мурманск, НИИМоргеофизика ВМНПО «Союзморгео», 1983, с. 75-80.
3. Гуленко В.И., Земцова Д.П., Долинин А.Н., Коновалова Ю.И. Особенности обработки данных морской сейсморазведки, полученных с донными приемниками на основе системы датчиков гидрофон+геофон // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2009. – № 3 (29). – С. 9–12.

4. Гуленко В.И., Карпенко В.Д., Шлыков В.А. Влияние внешнего акустического поля и границ водного слоя на акустические характеристики пневматического излучателя. – Сб. «Разведочная геофизика», вып.110. – М.: Недра, 1989, с.98-105.

5. Гуленко В.И., Шумский Б.В. Технологии морской сейсморазведки на предельном мелководье и в транзитной зоне: Монография. – Краснодар: КубГУ, 2007. – 111 с.

6. Морская сейсморазведка: Под ред. А. Н. Телегина, 2004, М., Геоинформмарк, с. 150.

7. Мосякин А.Ю. Особенности сейсморазведки в лиманно-плавневой зоне Краснодарского края // Приборы и системы разведочной геофизики: Ежеквартальное официальное издание Саратовского отделения ЕАГО, № 1 – 2005 г. С.40-41.

8. Mougenot D. Транзитная зона: последний рубеж сейсморазведки // Приборы и системы разведочной геофизики: Ежеквартальное официальное издание Саратовского отделения ЕАГО, № 1 – 2005 г. С.10-13.

Подробнее об авторах



Рудаков
Александр Владимирович

начальник ГГЭ «ЮМГСейс»
АО «Южморгеология»



Гуленко
Владимир Иванович

профессор кафедры
геофизики геологического
факультета КубГУ,
д.т.н., профессор