

Возбуждение упругих волн в условиях мелководья и транзитной зоны суша-море

- Гуленко В.И., Захарченко Е.И., Кафедра геологии и геофизики КубГУ, г. Краснодар.
- Бадиков А.Н., ООО «ПУЛЬС», г. Геленджик.

Аннотация. В работе рассмотрены различные факторы, влияющие на процесс возбуждения упругих волн и на технологию работ при сейсморазведке на предельном мелководье и в переходной зоне суша-море. В качестве основных из них рассмотрены такие, как интерференция волн в водном слое, близость отражающих границ «вода-воздух» и дно и их влияние на процесс пульсации газовой полости, потери энергии на неупругие деформации при распространении интенсивных колебаний в придонных отложениях, а также влияние их неоднородности на характеристики стабильности возбуждаемых упругих волн и др.

Сформулированы основные требования, предъявляемые к источникам для сейсморазведки в условиях мелководья.

Мелководье – как особый тип сейсмо-геологических условий – характеризуется наличием "сверхтонкого" водного слоя с характерным параметром $N\lambda \leq 0.2$, влиянием которого и обусловлены особые сложности, как в приеме, так и в возбуждении упругих волн при проведении сейсморазведочных работ [3, 10, 11 и др.].

Диапазон глубин моря, соответствующих понятию "мелководье", в настоящее время однозначно не определен, так как при монотонном уменьшении глубины моря вдоль профиля условия приема и возбуждения упругих волн и, соответственно, характеристики сейсмической записи также изменяются монотонно. Тем не менее, на практике к мелководным акваториям обычно принято относить районы работ с глубиной моря менее 20 м (по разным источникам от 10 м до 30 м), при этом переходные участки "суша-море" с глубиной воды от 0.5 до 2-3 м и от 0 до 0.5 м, характеризующиеся наиболее сложными условиями, называют "предельным мелководьем" и "транзитной зоной".

К зоне предельного мелководья относятся береговые топи, плавни, лиманы, заливные части суши, отмели,

дельты рек, открытые мелководные рифы, широкие приливные зоны, литоральные зоны и близкие к побережью мелководные участки, характеризующиеся особой сложностью в проведении сейсморазведочных работ, так как в этой зоне неприменимы ни чисто морская технология, ни наземная. В этой зоне запрещено в качестве источника упругих колебаний использовать взрывчатые вещества; традиционно применяемые при морской сейсморазведке пневматические источники на предельном мелководье, как правило, теряют свою эффективность, вибрационные же источники здесь неприменимы из-за слабости грунтов. Использование буксируемых пьезокос в этой зоне невозможно из-за малых глубин, применению наземных сейсмоприемников препятствует наличие водного слоя. При этом использование любых технических средств ограничено, как правило, недостаточной грузоподъемностью, энерговооруженностью и проходимостью применяемых транспортных средств.

Площади мелководных участков акваторий достаточно велики. Так, например, согласно [4], общая площадь Российского шельфа с глубинами моря

до 20 м составляет свыше 700 тыс. км², при этом свыше 130 тыс. км² занимает предельное мелководье. Значительная часть из этих площадей относится к районам с высокими перспективами нефтегазоносности, где проведение разведочных работ представляет практический интерес.

С геологической точки зрения верхняя часть разреза в зонах мелководья обычно характеризуется переслаивающимися континентальными и морскими осадками, сравнительно быстро изменяющейся морфологией, наличием погребенных речных долин, палеорусел рек, песчаных баров и др., что в сочетании с изменчивостью упругих свойств донных осадков и толщины водного слоя представляет собой один из самых сложных типов сейсмогеологических условий.

Рассмотрим подробнее влияние основных факторов, определяющих особенности возбуждения упругих волн в условиях мелкого моря.

1. Влияние интерференционных процессов в водном слое

При сейсморазведочных работах на мелководье источник упругих волн обычно располагается в водном слое глубиной H на расстоянии h от поверхности моря ($H \geq h$). 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 в нижнее полупространство, является интерференционной. При этом выражение, описывающее профиль интерференционной волны, излучаемой в любом направлении α_2 нижнего полупространства (угол α_2 отсчитывается от вертикальной оси: $\pi/2 \leq \alpha_2 \leq 3\pi/2$), полученное в приближении плоских волн в дальней зоне (без учета расхождения)

может быть записано в виде суммы волн, излучаемых в направлении α_2 действительным излучателем и бесконечной цепочкой "мнимых" излучателей, расположенных в верхнем полупространстве [3,13]:

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

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_{np} – коэффициент преломления луча при переходе в нижнее полупространство.

Комплексный спектр этой функции имеет следующий вид:

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

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

Отсюда обобщенная комплексная интерференционная характеристика водного слоя может быть получена в виде:

$$K(j\omega, \alpha, h, H) = S_F(j\omega) / S_f(j\omega) = k_{np} \cdot (1 - e^{-j\omega\tau_2}) \cdot \sum_{l=0}^{\infty} (-k_{omp})^l \cdot e^{-j\omega l\tau_1}. \quad (3)$$

Модуль этого выражения после преобразований может быть представлен в виде произведения двух функций:

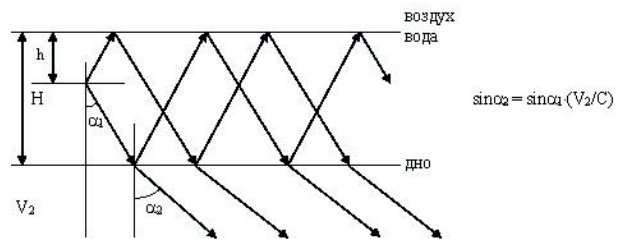
$$K(\omega, \alpha_1, h, H) = K_1(\omega, \alpha_1, h) \cdot K_2(\omega, \alpha_1, H), \quad (4)$$

одна из которых, $K_1(\omega, \alpha_1, h) = 2 \cdot |\sin(\omega\tau_2/2)|$ – модуль частотной харак-

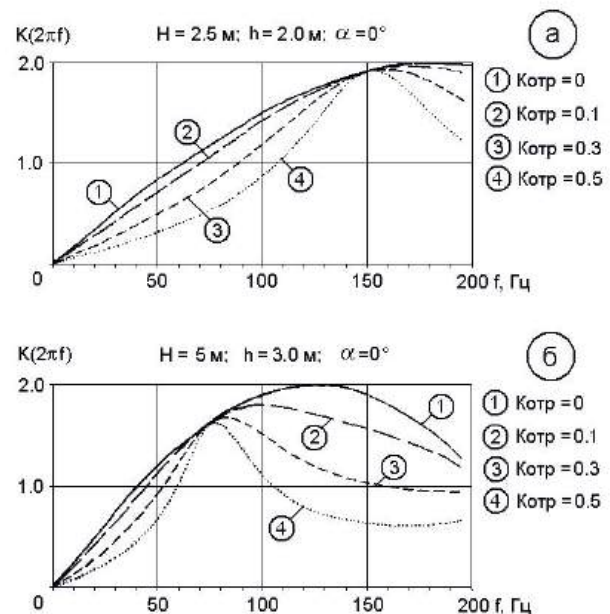
теристики, учитывающей влияние границы "вода-воздух", другая функция – $K_2(\omega, \alpha_1, H) = k_{пр} \cdot [1 + 2 \cdot k_{отр} \cos(\omega \tau_1) + k_{отр}^2]^{-1/2}$ – модуль частотной характеристики, учитывающей влияние границы дна. При фиксированных параметрах α , h и H , т.е. в функции частоты все выражение (4) представляет собой модуль частотной характеристики точечного излучателя в водном слое; в функции угла α это выражение описывает диаграмму направленности точечного гармонического излучателя с частотой ω , расположенного в водном слое глубиной H на удалении h от поверхности воды – см. рис.1.

В качестве примера на рис.2 приведены модули частотных характеристик, рассчитанные по формуле (4) при $\alpha_1 = 0$ (нормальное падение) и разных значениях коэффициента отражения для двух значений глубины моря: а) $H = 2.5$ м, глубина источника $h = 2.0$ м и б) $H = 5.0$ м, глубина источника $h = 3.0$ м. Кривые, полученные при $k_{отр} = 0$, соответствуют случаю, когда граница дна отсутствует – источник находится в жидком пространстве на глубине h от поверхности "вода-воздух" – и иллюстрируют лишь влияние глубины его погружения, (т.е. влияние поверхности "вода-воздух"). Приведенные на рис.3 частотные характеристики, также полученные при $\alpha_1 = 0$, показывают влияние расположения источника относительно границ водного слоя при тех же значениях его глубины ($H = 2.5$ м – (а) и $H = 5.0$ м – (б)), но при фиксированном значении коэффициента отражения от дна равном 0.3. При этом кривые, полученные при $h = H$ соответствуют случаю, когда источник находится на дне моря.

Кроме того, рассматривались и частотные характеристики, иллюстрирующие влияние удаления источника от дна при фиксированных удалениях его от поверх-



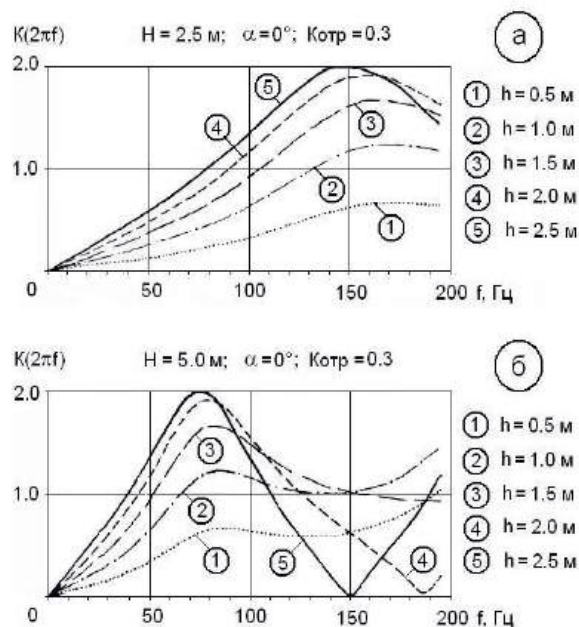
▲ Рис. 1. К выводу интерференционной частотной характеристики точечного излучателя в водном слое.



▲ Рис. 2. Модули частотных характеристик водного слоя при $\alpha = 0$ (нормальное падение) и разных коэффициентах отражения от дна: а) глубина моря $H = 2.5$ м, глубина источника $h = 2.0$ м; б) глубина моря $H = 5.0$ м, глубина источника $h = 3.0$ м.

хности "вода-воздух" $h = 2.5$ м и $h = 5$ м, и полученные при тех же значениях $\alpha_1 = 0$ и $k_{отр} = 0.3$, но при разных значениях глубины моря.

Как видно из рис. 2 – 3, частотные характеристики излучателя в водном слое представляют собой осциллирующие периодические функции, в колебаниях которых явно проявляются два периода. Первый – основной период частотных характеристик – обусловлен влиянием поверхности "вода-воздух" и равен периоду модуля синуса в функции $K_1(\omega, \alpha_1, h)$. При этом максимумы огибаю-



▲ Рис. 3. Модули частотных характеристик водного слоя при $\alpha=0$ (нормальное падение), $k_{отр}=0.3$ и разных глубинах погружения источника: а) глубина моря $H=2.5$ м; б) глубина моря $H=5.0$ м.

щих лепестков характеристик пропорциональны $k_{пр}$ и соответствуют частотам: $f_{n\max} = (n-0.5) \cdot C / (2h \cos \alpha_1)$; минимумы характеристик, равные нулю, достигаются в точках: $f_{n\min} = (n-1) \cdot C / (2h \cos \alpha_1)$, где $n = 1, 2, 3, \dots$. Ниже, в табл.1, приведены граничные частоты (определяемые по уровню 0.707 от максимума) первого лепестка интерференционной характеристики заглупления источника $K_1(\omega, \alpha_1, h)$, полученные при $\alpha_1 = 0$ и разных глубинах погружения.

Более высокочастотные осцилляции кривых $K(\omega, \alpha_1, h, H)$ обусловлены влиянием дна моря, при этом они связаны с периодичностью косинуса в функции $K_2(\omega, \alpha_1, H)$ и имеют период равный

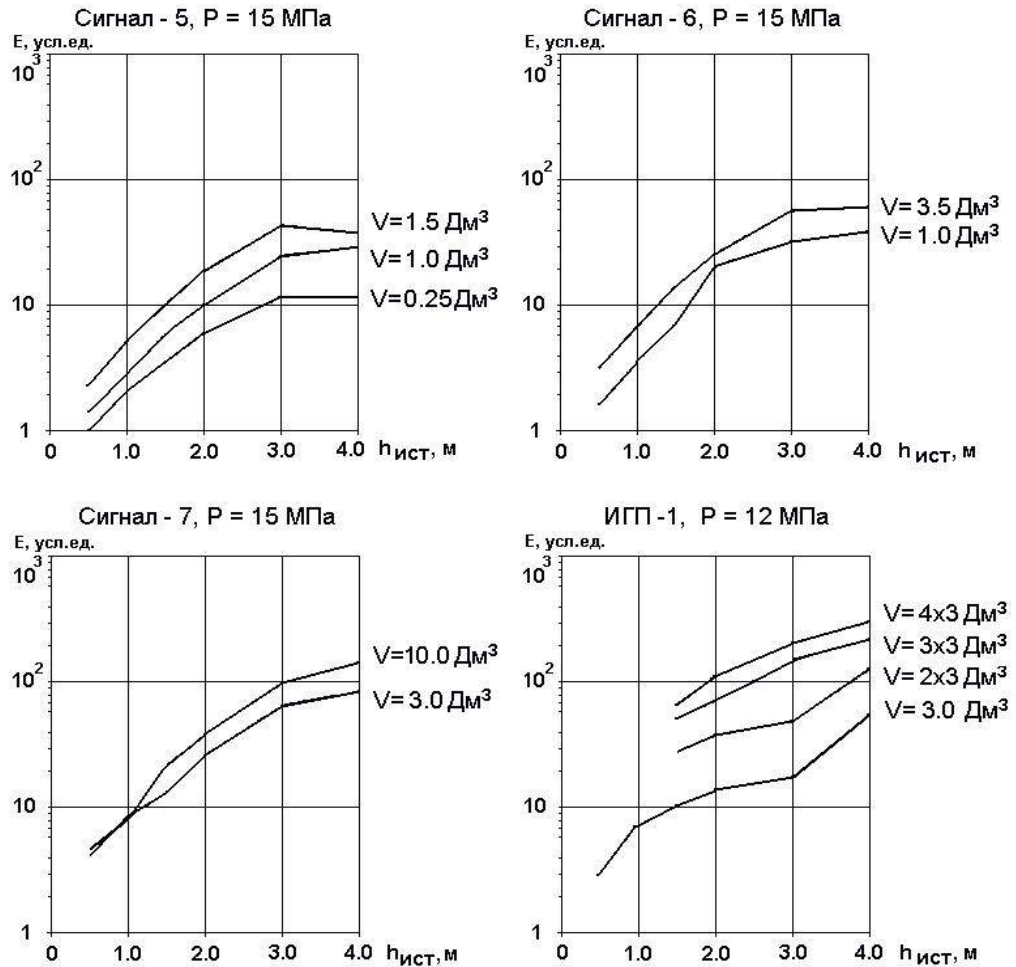
$C / (2H \cos \alpha_1)$, тем меньший, чем больше глубина моря. Величина коэффициента отражения от дна моря, так же, как и на глубокой воде определяет характер перераспределения упругой энергии на границе: с увеличением жесткости дна (т.е. $k_{отр}$) амплитуда проходящих волн в дальней зоне падает, в той же степени возрастает интенсивность реверберации, т.е. уровень донно-кратных волн-помех в водном слое.

Как видно из приведенных в табл.1 и на рис.2–3 данных, общим отрицательным свойством частотных характеристик $K(\omega, \alpha_1, h, H)$ на мелководье является то, что полоса их пропускания смещена в область высоких частот и при малых глубинах погружения источника выходит за пределы сейсмического диапазона частот. При этом низкочастотные компоненты спектра излучения источников всех типов – от первых герц до 40–60 Гц, где обычно содержится основная энергия собственного излучения источника – оказывается в полосе гашения. В качестве иллюстрации этого эффекта на рис.4 приведены зависимости энергии прямой волны, распространяющейся вдоль приемной расстановки и зарегистрированной на удалении в несколько десятков метров от пункта взрыва ($X_{\min} = 27$ м, $X_{\max} = 74$ м), от глубины погружения источника. Указанные зависимости получены по результатам обработки материалов полевых экспериментов, проведенных на полигоне в опытном бассейне ($H = 4.5$ м) с пневматическими источниками ряда

▼ Табл. 1. Граничные частоты интерференционной характеристики заглупления источника $K_1(\omega, \alpha_1, h)$ при $\alpha_1 = 0$

Глубина источника, h	0.5 м	1 м	2 м	3 м	4 м	5 м	6 м
Нижняя граничная частота, Гц	375	187.5	93.8	62.5	46.9	37.5	31.3
Верхняя граничная частота, Гц	1125	562.5	281	187.5	140.6	112.5	93.8

Рис. 4.
 Зависимости
 энергии прямой
 волны от
 глубины
 погружения
 источников
 разных типов.
 Глубина
 бассейна
 4.5 м.



"Сигнал" с объемами рабочих камер от 0.25 дм³ до 10.0 дм³ при рабочем давлении воздуха 15 МПа и разных параметрах группирования [17].

2. Влияние границ на динамику пульсации полости

Для всех источников типа "пульсирующая полость" – пневматических, газовых, электроискровых и др. – характерна зависимость периода пульсации полости T (и, соответственно, преобладающей частоты возбуждаемых колебаний) от гидростатического давления P_0 вида $T \sim P_0^{-5/6}$ [2, 6, 9]. При пульсации полости вблизи жестких границ водного слоя эта зависимость нарушается, так как давление в окрестности полости, кроме постоянной составляющей, равной весу столба жидкости на данной глубине, будет иметь и переменную составляющую, в

любой момент времени равную мгновенному значению собственного реверберационного фона, т.е. сумме волн давления, излучаемых бесконечной цепочкой "мнимых" источников, координаты которых могут быть получены последовательными зеркальными отображениями реального излучателя в границах водного слоя. Так же, как и в предыдущем разделе, принимая коэффициенты отражения от границы "вода-воздух" равными -1 , а от границы дна равным k_{omp} , выражение, описывающее внешнее давление в окрестности источника, получим в виде [7, 8, 9]:

$$\begin{aligned}
 P_0(t) = P_0 + \sum_{l=1}^{\infty} (-k_{omp})^l \cdot \frac{f(t - r_{l1}/C)}{r_{l1}} + \\
 + \sum_{l=0}^{\infty} (-k_{omp})^l \cdot \left[\frac{-f(t - r_{l2}/C)}{r_{l2}} + k_{omp} \cdot \right. \\
 \left. \cdot \frac{f(t - r_{l3}/C)}{r_{l3}} - k_{omp} \cdot \frac{f(t - r_{l4}/C)}{r_{l4}} \right], \quad (5)
 \end{aligned}$$

где $r_{l1} = 2 \cdot l \cdot H$; $r_{l2} = 2 \cdot l \cdot H + 2h$; $r_{l3} = 2 \cdot (l+1) \cdot H - 2h$; $r_{l4} = 2 \cdot (l+1) \cdot H$; $l = 0, 1, 2, \dots$;
 h – глубина погружения источника;
 $f(t)$ – профиль волны давления, возбуждаемой источником в "безграничной" среде.

Анализируя выражение (5) можно показать, что вклад реверберационного фона в функцию $P_0(t)$ тем больше, чем меньше глубина водного слоя и чем ближе реальный источник к его границам, при этом полное давление $P_0(t)$ в окрестности источника при $H = 2 \div 5$ м и удалении его от границ на 0.5–1.0 м может отличаться от величины гидростатического давления P_0 на 20–30%, приводя к заметному изменению периода пульсации полости и, соответственно, частотного состава возбуждаемых колебаний.

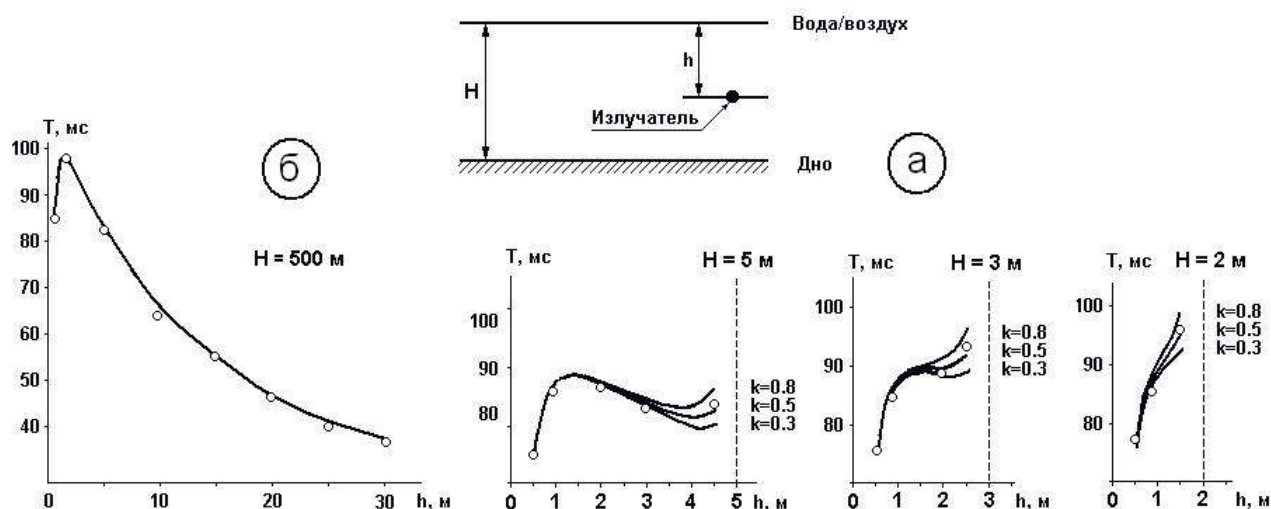
Численное решение этой задачи применительно к пневматическому излучателю было рассмотрено в работах [7–9], где получена система дифференциальных уравнений, позволяющая рассчитать акустические характеристики источника типа "пульсирующая полость" с учетом влияния границ водного слоя. В качестве примера на рис.5 (а) приведены расчетные и экспериментальные зависи-

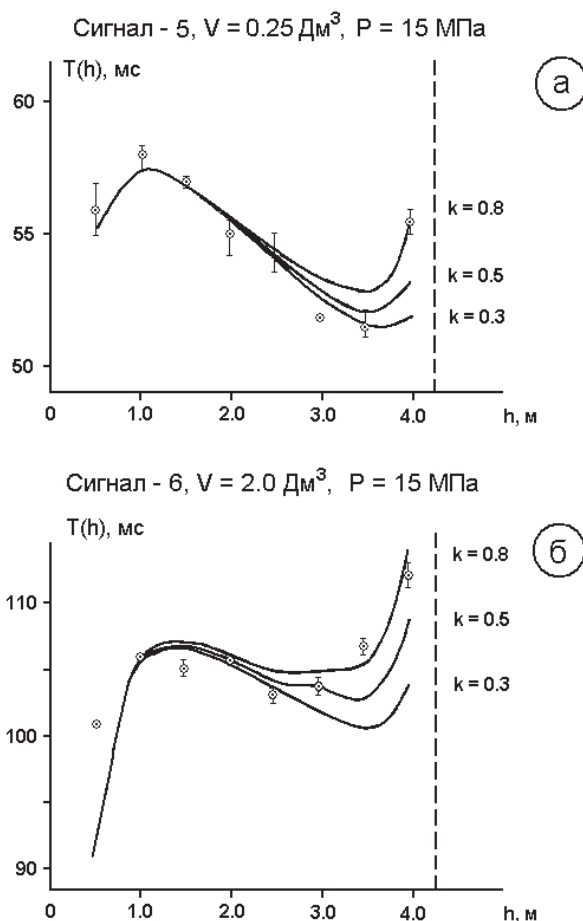
мости, иллюстрирующие влияние глубины погружения пневматического излучателя ИГП-1 на период пульсации полости при разных глубинах моря ($H = 2.0$; 3.0 ; 5.0 м) и разных коэффициентах отражения от дна ($k_{\text{отр}} = 0.3$; 0.5 ; 0.8). Для сравнения на рис.5 (б) приведены расчетная и экспериментальная зависимости $T(h)$, полученные при $H = 500$ м, т.е. на глубокой воде, когда влиянием донных отражений можно пренебречь (результаты экспериментальных измерений на рис.5 показаны кружочками).

Аналогичные расчетные зависимости $T(h)$ для слоя, а также результаты эксперимента, выполненного в опытном бассейне глубиной $H = 4.3$ м с излучателями "Сигнал-5" объемом 0.25 дм^3 – (а) и "Сигнал-6" объемом 2.0 дм^3 при рабочем давлении 15 МПа, представлены на рис.6.

Как видно из этих данных, вблизи границ водного слоя зависимость $T(h)$ заметно отличается от вида $P_0^{-5/6}$: приближение источника к границе "вода-воздух" сопровождается резким уменьшением периода пульсации, в то время как вблизи дна наблюдается увеличение периода, и тем большее, чем выше коэффициент отражения от дна моря.

▼ Рис. 5. Влияние глубины погружения пневматического излучателя ИГП-1 ($V = 3 \text{ дм}^3$, $P = 12 \text{ МПа}$), на период пульсации полости при разных глубинах моря: а) $H = 2.0$ м; $H = 3.0$ м; $H = 5.0$ м; б) $H = 500$ м (кружочками показаны экспериментальные значения).





▲ Рис. 6. Влияние глубины погружения пневматических излучателей "Сигнал" на период пульсации полости при разных глубинах погружения (теория и эксперимент): а) излучатель "Сигнал-5", $V = 0.25 \text{ дм}^3$, $P = 15 \text{ МПа}$; б) излучатель "Сигнал-6", $V = 2.0 \text{ дм}^3$, $P = 15 \text{ МПа}$.

3. Влияние близости дна

Близость к источнику дна при возбуждении упругих волн на мелководье рассматривалась выше с точки зрения его влияния на интерференционные процессы и на динамику пульсации полости, как одной из границ, участвующих в формировании многократно-отраженных (донно-кратных) волн, возникающих в водном слое. Вместе с тем, с близостью дна могут быть связаны и другие эффекты, роль которых на мелководье заметно возрастает.

1). Так, верхняя часть разреза на мелководье, особенно придонные отложения, часто характеризуется значительной

неоднородностью физических свойств по горизонтали, связанной как с изменчивостью литологического состава отложений, наличием литологических разностей, например, в виде загазованных илов, имеющих пониженные скорости распространения упругих волн, так и с вариациями мощностей слоев, значительной распространенностью рыхлых отложений, залегающих в виде линзовидных тел, зон выклинивания реликтовых многолетне-мерзлых пород и т.п. [4, 19]. В этой связи, при возбуждении упругих волн в непосредственной близости от дна, отмеченные неоднородности, даже при сравнительно небольших размерах, из-за близости к источнику, становятся сопоставимыми с размерами первой зоны Френеля и оказывают существенное влияние на характеристики волны в дальней зоне, значительно ухудшая стабильность ее параметров.

2). Другим источником нестабильности параметров возбуждаемых сигналов вдоль мелководного профиля является характерная для этих условий изменчивость рельефа дна моря, что вследствие причин, изложенных выше в разделах 1 – 2, может приводить к соответствующим вариациям характеристик, зависящих от величины H .

3). Процесс распространения волн сравнительно большой амплитуды в слабо консолидированных рыхлых грунтах в ближней зоне излучателя является уже существенно нелинейным, вследствие чего потери энергии на неупругие деформации среды в окрестности излучателя на мелководье, особенно предельном, значительно возрастают. Вероятно, именно этим фактором и объясняется, например, характер экспериментальных зависимостей на рис. 4, где по мере приближения источника к границе дна, кривые $E(h)$, полученные

для излучателей ряда "Сигнал", заметно выпадаются.

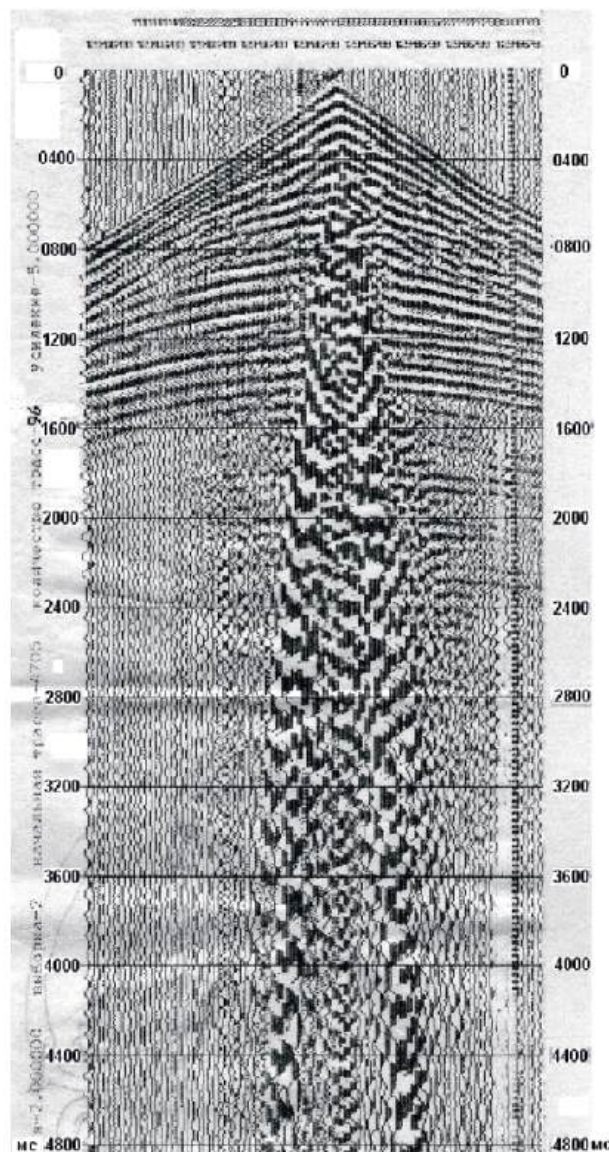
При размещении излучателя вблизи дна практически всегда наблюдается появление более или менее интенсивных (в зависимости от строения верхней части разреза) низкочастотных и низкоскоростных волн-помех поверхностного типа. Для сосредоточенных низкочастотных источников это приводит к тому, что волны-помехи на ближних каналах приемного устройства нередко доминируют почти во всем интервале записи и подавление их известными средствами часто оказывается недостаточно эффективным.

В качестве примера на рис.7 приведена типичная сейсмограмма, полученная в ОАО "Южморгеология" на предельном мелководье Курчанского лимана с пневматическими источниками "ПУЛЬС". Как видно из этой сейсмограммы самыми интенсивными волнами являются связанные с верхней частью разреза низкочастотные (основная энергия в полосе частот до 10–12 Гц) и низкоскоростные ($V \sim 240 \div 260$ м/с) волны-помехи, доминирующие на ближних к пункту возбуждения каналах во всем интервале записи (до 6 с).

4. Влияние других факторов

К дополнительным факторам, осложняющим проведение на мелководье морских сейсморазведочных работ, в том числе и возбуждение сейсмических сигналов, можно отнести следующее:

1). Небольшая глубина моря, особенно в районах предельного мелководья, налагает существенное ограничение на осадку и водоизмещение геофизического судна (или др. плавсредства), что, в свою очередь, ограничивает численность обслуживающего персонала, габариты и вес устанавливаемого на



▲ Рис. 7. Типичная сейсмограмма, полученная на предельном мелководье Курчанского лимана с пневматическими источниками "ПУЛЬС".

борту геофизического и др. оборудования, а также максимальную мощность судовой энергоустановки и, соответственно, мощность, потребляемую источником. В этой связи использование на предельном мелководье громоздких и мощных излучающих систем, требующих применения, например, мощных компрессорных станций, тяжелого спускоподъемного и др. оборудования, является весьма проблематичным.

2). Другое ограничение на мощность источника связано с известным риском вредного воздействия упругих колеба-

ний на флору и фауну акваторий, особенно в зоне предельного мелководья. Так, для газовых и пневматических источников с рабочим давлением 10–15 МПа предел по суммарному объему рабочих камер одиночных и групповых источников, установленный "Межведомственной комиссией по вопросам проведения сейсморазведочных работ на рыбохозяйственных водоемах" составляет до 30 дм³, что соответствует максимальной допустимой энергии возбуждения не более 1.13 МДж на одно воздействие. При этом в каждом конкретном случае сроки проведения любых геофизических работ на мелководных акваториях требуют обязательного согласования в региональных управлениях охраны водных биологических ресурсов и могут быть изменены или ограничены в связи с нерестом или сезонной миграцией рыб и др. гидробионтов [1].

3). Проведение работ с буксируемыми заборными устройствами сопряжено с особыми сложностями для судовождения, так как на всем мелководье имеют место значительные колебания уровня моря вследствие приливо-отливных и сгонно-нагонных течений, скорость которых достигает 3–4 узлов, при этом на большей части мелководных акваторий отсутствует детальный промер глубин. Еще более сложным по условиям мореплавания является обширное мелководье арктического бассейна, где сроки навигации не превышают 3–4 месяцев, а проведение работ даже в летнее время может сдерживаться неблагоприятной ледовой обстановкой [4].

4). Важным фактором, нередко предъявляющим особые требования как к конструкции буксиремых заборных устройств, так и к технологии работ, особенно на предельном мелководье, является характер дна: наличие на дне

скальных обломков, коралловых рифов, остатков металлоконструкций, обломков затонувших кораблей, тросов и т.п., при отсутствии специальных средств защиты может привести к серьезному повреждению или даже потере буксируемых устройств.

5). Еще большими сложностями характеризуются условия работ в плавнях, где нередко в пределах одного объекта, или даже профиля, имеет место чередование открытых мелководных водоемов и участков, покрытых труднопроходимой болотной растительностью. Такое разнообразие поверхностных условий требует применения и различных технических средств для возбуждения и приема упругих колебаний, при этом для проведения работ в таких условиях необходимо применение транспортных средств амфибийного класса, имеющих повышенную проходимость: плавающие транспортеры, вездеходы-амфибии и т.п.

5. Основные требования, предъявляемые к источникам для сейсморазведки в условиях мелководья

Анализ рассмотренных выше факторов, определяющих особенности возбуждения упругих волн в условиях мелкого моря, позволяет, в принципе, сформулировать и основные требования к источнику. При этом наряду с общими требованиями, предъявляемыми ко всем источникам для морской сейсморазведки [6], есть и ряд дополнительных, определяемых как спецификой сейсмогеологических условий, так и особенностями применяемой на мелководье технологии работ. Основными из этих требований являются следующие.

1). Источник должен быть безвредным для окружающей среды и безопасным для обслуживающего персонала и судна (или др. носителя). При этом для газовых

и пневматических источников с рабочим давлением до 15 МПа суммарный объем рабочих камер должен быть ограничен пределом до 30 дм³ [1]. Установленные на судне арматура высокого давления, электрические кабельные линии и установки, спускоподъемные устройства и другое оборудование, входящее в состав системы возбуждения и предназначенное для эксплуатации источника, должно удовлетворять требованиям Госгортехнадзора и Морского Регистра РФ.

2). Источник должен иметь достаточно широкополосный сигнал, спектр которого должен быть оптимально согласован как с характеристикой среды, так и с частотной характеристикой водного слоя. Так как при этом основная энергия зондирующего сигнала в дальней зоне должна оставаться в сейсмическом диапазоне частот, энергия собственного акустического излучения источника в полосе частот 2080 Гц, с учетом фактора подавления его низкочастотных компонент характеристикой водного слоя, для достижения той же эффективности на мелководье должна быть выше, чем для источников, работающих на глубокой воде.

3). Для снижения влияния латеральной неоднородности свойств придонного грунта на характеристики стабильности сигнала в дальней зоне, а также для снижения потерь энергии на неупругие деформации при работах на мелководье предпочтительнее применять площадные группы с большим количеством излучателей (от 20 до 60 и более), имеющих сравнительно небольшие амплитуды возбуждаемых сигналов [до $(1 \div 3) \cdot 10^5$ Па·м] и группируемых на достаточно большой площади с размерами, например, около $(20 \div 50) \times (50 \div 100)$ м².

В том случае, когда источник создается на основе группирования сравнительно

компактных излучающих модулей (подгрупп), количество их должно быть четным, а расстояние между ними вдоль линии наблюдения следует выбирать с шагом, равным половине длины волны наиболее интенсивных составляющих излучающих волн поверхностного типа, что позволит обеспечить относительное их ослабление.

При использовании на мелководье линейных источников, располагаемых вдоль линии наблюдения, при шаге группирования излучателей не более 2–4 м, общую базу линейной группы следует выбирать равной целому числу длин наиболее интенсивных волн-помех поверхностного типа. Заметному ослаблению этих волн способствует также и применение на мелководье более высокочастотных излучателей с максимумами спектральной плотности собственного излучения на частотах свыше 50 Гц.

В любом случае выбор конкретной геометрии площадной или линейной группы должен производиться по результатам опытно-методических работ, в зависимости от конкретных сейсмогеологических условий изучаемого района. В этой связи конструкция источника для мелководья должна обеспечивать возможность гибкой перестройки его конфигурации: изменение в достаточно широких пределах геометрии взаимного расположения излучающих модулей (подгрупп) и расстояний между ними, шага группирования излучателей и их объемов, временных диаграмм запуска излучателей и т.п.

В работе [5] приведено сопоставление сейсмограмм, полученных на мелководье залива Сиваш ($H = 2\text{--}2.5$ м) в одних и тех же точках профиля и при одинаковых параметрах регистрации с двумя разными источниками, отличающимися геометрией и спектральным составом

возбуждаемых колебаний: с высокочастотным линейным газовым источником ИГЛ (длина эластичной взрывной камеры 60 м, объем около 90 дм³, запасаемая энергия газовой смеси водород-кислород около 450 кДж на одно воздействие, $h = 2$ м), имеющим максимум спектральной плотности на частоте 50–70 Гц, и с низкочастотным пневматическим источником "Импульс-1" (суммарный объем группы 4×3 дм³, $P_{\text{раб}} = 12$ МПа, запасаемая энергия около 360 кДж, база группирования 3×3 м, $h = 2$ м), с максимумом спектра собственного излучения на частоте 10–12 Гц.

Из сопоставления этих сейсмограмм можно было видеть, что записи, полученные практически сосредоточенным источником "Импульс-1", на первых 6–8 каналах даже после фильтрации были осложнены интенсивными низкочастотными поверхностными волнами со скоростью 220–240 м/с. В то же время на записях, полученных с более высокочастотным и распределенным в пространстве линейным источником ИГЛ, на фоне более интенсивных отражений поверхностные волны практически не наблюдались.

4). Глубину погружения источника при работах на мелководье следует выбирать в зависимости от глубины моря: при глубине моря менее 2–3 м предпочтительнее буксировать источник по дну; в диапазоне глубин моря H от 2–3 м до 5–7 м глубина погружения источника должна составлять приблизительно $(2/3) \cdot H$; при больших глубинах моря глубина погружения источника выбирается в соответствии с известными критериями [2, 5, 9, 10 и др.]. При этом выбор конкретной глубины погружения для той или иной излучающей системы в условиях мелководья также уточняется по результатам опытно-методических работ, в зависи-

мости от конкретных сейсмогеологических условий изучаемого района.

С учетом приведенных выше требований конструкция излучающей системы должна обеспечивать возможность сравнительно быстрого изменения глубины ее погружения и быть работоспособной при длительной эксплуатации источника в условиях буксировки его по дну, при этом все излучатели группы должны быть конструктивно защищены от попадания внутрь грязи и абразивных частиц грунта.

5). Источник для мелководья по своим весогабаритным характеристикам, энергопотреблению, трудоемкости обслуживания и ремонта, используемому спускоподъемному и другому вспомогательному оборудованию должен "вписываться" в возможности применяемых на мелководье, обычно, малотоннажных плавсредств, имеющих слабую энерговооруженность, небольшую автономность плавания (до нескольких суток) и рассчитанных на размещение сравнительно небольшого обслуживающего персонала. При этом лучшие условия для размещения источника имеют место при работе в двухсудовом варианте, когда источник устанавливается на отдельном судне-взрывпункте, все свободные ресурсы которого могут быть использованы только для его обеспечения.

Учитывая то, что мелководье, и особенно предельное мелководье, является одним из самых сложных видов сейсмогеологических условий, требующим использования мощных излучающих систем с громоздким забортным оборудованием, его серьезное освоение возможно лишь при комплексном решении проблемы, предполагающем, в том числе, и проектирование специализированных геофизических судов и носителей

амфибийного класса, ориентированных на конкретный аппаратурно-методический комплекс и обеспечивающих его максимальную эффективность¹.

Из специализированных судов для мелководья в настоящее время имеется серия НИС типа "Искатель" (катамаран проекта 3870 постройки ПНР с осадкой около 1.5 м), предназначенных для работ на мелководье с глубиной не менее 2 м. В начале 90-х годов в ЦКБ "Нептун" разрабатывалось геофизическое судно на воздушной подушке (ГСВП) амфибийного класса, проект 15300, предназначенное для работ на предельном мелководье и в переходных зонах "суша-море", однако серийный выпуск его по известным причинам не состоялся [4, 14].

б). Источник для мелководья должен соответствовать применяемой технологии сейсморазведочных работ, не ограничивая их производительность. В первую очередь это касается такой характеристики источника, как "скорострельность" (т.е. минимальный интервал времени между двумя последовательными срабатываниями - $\tau_{ср\text{аб}}$), которая определяется, в основном, мощностью энергетической установки источника и, соответственно, ее производительностью по рабочему телу. Наиболее жесткие требования по этому параметру ($\tau_{ср\text{аб}} \sim 6 \div 10$ с) предъявляются к источнику при работе в режиме свободной буксировки с плавающей косой (при глубине моря более 5-7 м), а также при работе на предельном мелководье с автономным взрывпунктом и донной косой в стационарном режиме (способ описан в [10]).

При работе в режиме "старт-стопной" технологии (называемой за рубежом "yo-yo") интервал между срабатываниями, по опыту ОАО "Севморнефтегеофизика"

[4], составляет 15–30 с (хотя, согласно [18], может достигать также 810 с). При наименее производительной работе с буксируемой по дну косой и остановками в каждом пункте возбуждения (за рубежом такая технология называется "Drag Bottom") интервал между срабатываниями определяется темпом перемещения расстановки и может достигать 1–2 мин.

При работе в транзитной зоне "суша-море", в плавнях, или при необходимости возбуждать сейсмические сигналы вблизи береговой линии на суше нередко применяются так называемые "погружные" пневматические источники, работающие в мелких взрывных скважинах. Как правило, технология работ в таких условиях предполагает накапливание от первых единиц до первых десятков циклов, в результате чего время отработки на одном пункте взрыва, с учетом времени на перемещение взрывпункта и бурение скважины может составлять до 15÷20 минут, а иногда и более.

При этом в рамках той или иной технологии работ экономическая целесообразность применения источника на мелководье, так же, как и при работе на глубоком море, в значительной мере определяется его надежностью и общим ресурсом работы. По предварительным оценкам, наработка на отказ источника должна составлять не менее 10 тысяч срабатываний при общем ресурсе до 150 тысяч срабатываний.

Как следует из приведенных выше п.п.1–6, задача создания эффективного источника для сейсморазведки на мелководье имеет особую сложность, так как предъявляемые к нему основные требования в совокупности своей противоречивы и вряд ли могут быть в полной мере

¹ В условиях болот и плавней могут представлять интерес и снегоболотоходные машины, например, снегоболотоходное шасси ШСГ-51 [14].

реализованы в рамках одной конструкции. Так, например, требования, предъявляемые к конфигурации групп (по количеству излучателей, базе их группирования), к энергии излучения и "скорострельности" источника, находятся в противоречии с явно ограниченными возможностями как имеющихся, так и создаваемых в обозримой перспективе геофизических судов и амфибийных носителей, особенно для предельного мелководья. В этой связи совершенно очевидной становится и необходимость поиска в разработке разумных компромиссов, из которых модульный принцип построения излучающей системы представляется наиболее удачным, так как позволяет на основе идентичных излучающих модулей (подгрупп) создавать излучающие системы с разнообразными характеристиками: от наиболее простых, ориентированных на самые легкие суда и амфибийные носители (один-два модуля), до более сложных линейных и площадных групп (4–6 модулей с произвольной геометрией их взаимного расположения в пространстве), для размещения которых необходимы специализированные суда, оснащенные мощной энергетической установкой и соответствующим спускоподъемным и др. оборудованием.

С точки зрения рассматриваемых требований в последние десятилетия весьма эффективный аппаратный комплекс был разработан, опробован и успешно применялся в практике сейсморазведочных работ на предельном мелководье и в транзитной зоне ОАО «ЮЖМОРГЕОЛОГИЯ».

Так, в условиях предельного мелководья для возбуждения упругих волн использовался мелкоосидающий понтон-взрывпункт, оборудованный дизель-компрессором, пневмораспределительным пультом и контроллером, а также

буксируемым за ним на цилиндрических пластмассовых поплавках плотом, с установленными на нем сварными металлическими траверсами, деревянным помостом, ручными лебедками и излучателями «ПУЛЬС-5» или «МАЛЫШ» [10, 11].

В условиях транзитной зоны наряду с наземными источниками (вибрационными, взрывными и др.), возбуждение сигналов осуществляется скважинными пневматическими источниками ПИК-3 или «ПУЛЬС-6С», обычно работающими в мелких, заполненных водой скважинах в режиме накопления [11, 12]. Бурение скважин глубиной до 23 м при этом осуществляется шнековой буровой установкой, смонтированной в кузове вездехода или транспортера.

Сопоставление небольших линейных пневматических групп, буксируемых в водном слое, и погружных (скважинных) пневмоисточников более подробно рассмотрено в

Литература

1. Балашканд М.И., Векилов Э.Х. и др. Новые источники сейсморазведки, безопасные для ихтиофауны. — М.: Наука, 1980, 78 с.
2. Балашканд М.И., Ловля С.А. Источники возбуждения упругих волн при сейсморазведке на акваториях. — М.: Недра, 1977, 128 с.
3. Бяков Ю.А., Димза А.Я, Иванов Н.А. Особенности морской сейсморазведки в условиях мелководья на примере модельных исследований // Морская геофизика. Сборник научных трудов. — Рига: ВНИИМоргео, 1984, с.59-63.
4. Гагельганц 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.
5. Гуленко В.И. Теоретическое и экспериментальное исследование некоторых типов источников упругих волн на основе водородо-кислородной газовой смеси. Дисс. на соискание ученой степени канд. геол.-мин.

наук. – М.: МГУ, 1982, 218 с.

6. Гуленко В.И. и др. Невзрывные источники упругих волн для морской сейсморастворки. Обзорная информация, вып.4. Серия: Геология и разведка морских нефтяных и газовых месторождений. – М.: ВНИИЭГазпром, 1983, 44 с.

7. 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.

8. Гуленко В.И., Карпенко В.Д., Шлыков В.А. Теоретическое и экспериментальное исследование пневматических излучателей для морской сейсморастворки // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион., Техн. науки. 2002. №3. с.50-58.

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

10. Гуленко В.И., Шумский Б.В. Технологии морской сейсморастворки на предельном мелководье и в транзитной зоне: монография / Краснодар: КубГУ, 2007 – 111 с.

11. Гуленко В.И., Захарченко Е.И., Бадиков А.Н. Группирование пневматических источников для морской сейсморастворки: монография / Краснодар: КубГУ, 2022. – 143 с.

12. Земцова Д.П., Наконечная Л.В., Кравченко Н.И., Трофимов В.В. Способ морской сейсмической разведки мелководного шельфа. – А.с. № 1241877. Опубликовано в бюлл. № 24, 1986 г.

13. Пекерис К. Теория распространения звука в мелкой воде. – В кн.: Распространение звука в океане. – М.: ИЛ, 1967, с.48-157.

14. Романов Е.И., Вацман А.Д. Новые транспортные средства для геофизических работ: Геофизика, 1996, №4, с.56-57.

15. Рудаков А.В., Гуленко В.И. Эффективность морских источников сейсмических сигналов в условиях предельно малых глубин // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. Т.59. №1. с. 42-49.

16. Тяхалов В.И., Гуленко В.И., Ежов В.А., Романенко Ю.Л., Шестаков С.Н. Отчет по теме 8-81: Опытнo-методические работы по оценке эффективности применения группо-

вых источников различной мощности в морской сейсморастворке (в 2-х томах). – г. Краснодар, НИИМоргеофизики ВМНПО "Союзморгео", 1983, 352 с.

17. Тяхалов В.И., Гуленко В.И., Ежов В.А., Якуш Е.Ю. Отчет по теме 58-84: Разработка системы возбуждения на базе излучателей нормального ряда "Сигнал" для морской нефтегазовой сейсморастворки. – г. Краснодар, КФНИИМоргеофизики, 1986, 286 с.

18. Хофф Б.Д., Шмелик Ф.Б. Усовершенствованная система регистрации сейсмических данных на мелководье // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом, 1982, №6, с.58-60.

19. Щербаков В.В., Беляев Н.В., Карпова Т.В. Геологическая интерпретация зон аномальной сейсмической записи на морских акваториях // Геология, нефтегазоносность и геофизические методы изучения шельфа. Сборник научных трудов. – М.: ВНИИЭГазпром, 1981, с.17-30.

Подробнее об авторах



Гуленко
Владимир Иванович

профессор кафедры геологии и геофизики ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», доктор технических наук, профессор.



Захарченко
Евгения Ивановна

зав. кафедрой геологии и геофизики ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», кандидат технических наук, доцент.



Бадиков
Александр Николаевич

директор
ООО «Пульс».