

УДК 543.27, 621.384.3, 681.883

## ОБЗОР ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДНА

© О.С. Голод, А.И. Гончар, С.И. Неверова, А.И. Шундель, 2010

Научно-технический центр панорамных акустических систем НАН Украины, г. Запорожье

У статті проведений огляд і аналіз фізико-геологічних моделей дна. Визначені границі застосовності тієї або іншої моделі.

В статье проведён обзор и анализ физико-геологических моделей дна. Определены границы применимости той или иной модели.

Review and analysis of physiographic bottom models are performed in the paper. Scopes of applicability of one or another model are identified.

ИМПЕДАНС, ГРАНИЦА РАЗДЕЛА, МОДЕЛЬ БИО, УРАВНЕНИЕ ЛАМЕ, МОДЕЛЬ ДНА, ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ОБЪЕМНЫЕ РАССЕИВАТЕЛИ.

В зависимости от специфики решаемой задачи осадочный материал можно рассматривать как жидкую (импедансную), твердую или гетерогенную среду.

В акустически жидких средах существуют только продольные волны  $P_L$ . Локальной характеристикой поверхности и внутренних границ жидкой осадочной толщи является волновое сопротивление (импеданс)  $Z = -P/(\vec{v} \cdot \vec{n})$ , если давление  $P$  на элемент границы с нормалью  $\vec{n}$  вызывает колебания элемента со скоростью  $\vec{v}$  [1-3]. Импеданс однородной среды с плотностью  $\rho$  и скоростью распространения волны  $c$  равен  $\rho c$ . Задание импедансов на границах сред, в том числе импедансов локализованных неоднородностей донной структуры, эквивалентно формулировке смешанной краевой задачи, включающей как частные случаи задачи Дирихле ( $Z=0$ ) и Неймана ( $Z \rightarrow \infty$ ). Обобщение на случай акустически неоднородных поверхностей ( $Z \neq const$ ) составляет суть четвертой краевой задачи. Кроме условий на границах, для определения поля необходимо также использовать условие излучения, позволяющее исключить влияние бесконечно удаленных источников поля.

Основой описания волновых процессов в упругих (акустически твердых) средах являются динамические уравнения теории вязкоупругости (уравнения Ламе) [1, 4-7]

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = \vec{f} + (\lambda + 2\mu)\nabla(\nabla \cdot \vec{u}) - \mu\nabla \times (\nabla \times \vec{u}) \quad (1)$$

для векторного поля  $\vec{u}(\vec{r}, t)$  смещений элементов среды. В компонентах поля  $\vec{u}(\vec{r}, t)$  и возмущения  $\vec{f}(\vec{r}, t)$  уравнения Ламе (1) имеют вид ( $i, j = 1..3$ ):

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = f_i + (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j \partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial^2 x_j}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  и  $\mu$  - коэффициенты Ламе, описывающие линейную связь тензоров деформаций и напряжений среды.

Для решения уравнений (2) используется теорема Ламе [6]. Если поле смещений  $\vec{u}(\vec{r}, t)$  удовлетворяет уравнениям Ламе (2), то существуют скалярный ( $\phi$ ) и векторный ( $\vec{\psi}$ ) упругие потенциалы, обладающие свойствами:

$$\vec{u} = \nabla\phi + \nabla \times \vec{\psi}, \quad \nabla \cdot \vec{\psi} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \frac{\Phi}{\rho} + c_L^2 \nabla^2 \phi, \quad c_L^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{\psi}}{\partial t^2} = \frac{\vec{\Psi}}{\rho} + c_S^2 \nabla^2 \vec{\psi}, \quad c_S^2 = \frac{\mu}{\rho}; \quad (5)$$

где  $\Phi$  и  $\vec{\Psi}$  - потенциалы Гельмгольца [1] для поля возмущений  $\vec{f} = \nabla\Phi + \nabla \times \vec{\Psi}$ , причем  $\nabla \times (\nabla\Phi) \equiv 0$  и  $\nabla \cdot \vec{\Psi} = 0$ .

Теорема Ламе позволяет свести решение для  $\vec{u}$  сложных уравнений вида (1) или (2) к решению волновых уравнений (4) и (5) для потенциалов Ламе  $\phi$  и  $\vec{\psi}$ . Из теоремы Ламе следует, что поле смещений  $\vec{u} = \vec{u}_L + \vec{u}_S$  разделяется на поле продольных  $\vec{u}_L = \nabla\phi(P_L)$  и поперечных  $\vec{u}_S = \nabla \times \psi(P_S)$  волн, независимо распространяющихся в упругой среде со скоростями  $c_L$  и  $c_S$  соответственно.

Как отдельное направление сформировались исследования влияния пористой структуры осадков (модель Био). Различные аспекты моделирования процесса распространения и рассеяния акустических волн в морских осадках и грунтах различного типа можно найти, например, в работах [8-16] и цитируемой в них литературе.

В случае не слишком высоких частот осадки могут рассматриваться как некоторая "эффективная" сплошная среда, жидкая или упругая, с параметрами, которые могут изменяться в пространстве. Для описания акустических свойств жидких (неконсолидированных) осадков достаточно двух параметров, например, плотности и сжимаемости, или плотности и скорости звука. Для упругого дна таких параметров три: плотность и скорости двух разных типов волн, продольных и сдвиговых. При этом для учета поглощения в среде скорости распространения волн, а в некоторых случаях и плотность, считаются комплексными. Многочисленные исследования выявили эмпирические соотношения между этими параметрами, а также их связи с наиболее существенными физико-механическими свойствами осадков, их пористостью, размером частиц и рядом других [8-10, 17-19]. Эти взаимосвязи, естественно, не являются жесткими, а лишь приближенно описывают соотношения между небольшим числом параметров в реально многопараметрической среде. Однако они позволяют, зная величину одного из параметров, предсказывать наиболее вероятные значения и возможные пределы изменений других параметров.

Наиболее точно и полно акустические свойства донных осадков описываются моделями гетерогенных (пористых флюидонасыщенных) сред – моделью Био, суспензионной моделью и другими моделями, которые являются обобщением теории упругости на многофазные среды [4, 8, 20-22].

В модели Био донные осадки представляются в виде двухфазной квазиравновесной системы - насыщенного жидкостью более или менее жесткого скелета, образованного множеством контактирующих твердых частиц.

Соотношения между напряжениями и деформациями гетерогенной среды, описываемой моделью Био, имеют вид:

$$\begin{aligned}\sigma &= Ke - C\xi, \\ p &= Ce - M\xi,\end{aligned}\tag{6}$$

где  $\sigma$  и  $p$  – гидростатическое и поровое давление;

$e = dV/V$  и  $\xi = dV_f/V$  - объемное расширение твердого скелета и жидкости.

Объемный модуль упругости  $K$  гетерогенной среды имеет компоненты  $K_f$  для жидкости,  $K_s$  для твердых частиц и  $K_b$  для скелета. Если модуль сдвига скелета  $\mu$ , пористость породы  $\phi = V_f/V$ , то  $K = K_s(K_b + Q)(K_s + Q)^{-1}$ ,  $C = QK_s(K_s + Q)^{-1}$ ,  $M = CK_s(K_s - K_b)^{-1}$ ,  $Q = \phi^{-1}K_f(K_s - K_b)(K_s - K_f)^{-1}$  и  $H = K + 4\mu/3$ . В такой среде могут существовать волны трех типов: продольная волна  $P_L^1$  в жидкости, продольная волна  $P_L^2$ , возникающая вследствие движения жидкости относительно скелета, и поперечная волна  $P_S$  в скелете. Распространение волн  $P_L^1$  и  $P_L^2$  описывается уравнениями:

$$\nabla^2(He - C\xi) = \frac{\partial}{\partial t^2}(\rho_e e - \rho_f \xi),\tag{7}$$

$$\nabla^2(Ce - M\xi) = \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\rho_f e - \rho_c \xi) - F_\eta \frac{\partial \xi}{\partial t}.\tag{8}$$

Затухание, вызванное вязкими потерями, описывается функцией  $F_\eta$  и эффективной плотностью среды  $\rho_c$ . Теория Био предсказывает существование локального минимума вязкого поглощения гетерогенной среды при определенном соотношении упругих параметров среды -  $K_b + 4\mu/3 \sim K_f(\phi^{-1} - 1)(\rho_s/\rho_f - 1)$ , которое следует из волновых уравнений (7) и (8). Нужно отметить, что модель Био при определении скоростей волн и коэффициентов их поглощения оперирует рядом трудно оцениваемых параметров.

В модели Био учитываются упругие свойства отдельных составляющих осадков и взаимодействие между ними, однако учет реального распределения частиц по диаметру возможен только в суспензионной модели гетерогенной среды. Описание распространения

волновых полей в суспензионной модели основано на теории многократного рассеяния на частицах твердой фазы осадочного материала. Суспензионная модель применима только к высокопористым осадкам, не имеющим жесткой структуры.

Оценки зависимости  $\beta \sim \omega^n$  коэффициента затухания  $\beta$  в осадочной толще от частоты  $f$  дают значения  $0,9 < n < 2$  во всем рабочем диапазоне частот гидроакустики. Зависимость  $\beta \sim \omega$  приводит к выводу о существовании одной или нескольких рабочих частот, оптимальных для обнаружения локализованных (резонирующих) неоднородностей и других элементов донной структуры [23, 24].

Осадочный материал, как поглощающая среда, характеризуется безразмерной степенью неупругости  $Q(\omega)$  [6], определяющей коэффициент затухания  $\beta = \omega/2cQ$  акустической волны. Зависимость  $\beta \sim \omega$  показывает, что  $Q$  практически не зависит от  $\omega$  в широком диапазоне частот. В этом случае анализ распространения волн проводится с помощью дисперсионных соотношений, а волновое число  $k$  представляется в виде  $K = \omega c^{-1}(\omega) + i\beta(\omega)$ . Дисперсия волн  $P_L$  и  $P_S$  в линейной вязкоупругой среде описывается с помощью параметра  $\xi_{L,S} = (1 - \zeta_{L,S}^2)(1 + \zeta_{L,S}^2)^{-2}$ ,  $\zeta_{L,S} = \beta_{c_{L,S}}/2\pi f$  и формальных соотношений  $\lambda + 2\mu = \rho v_L^2 \xi_L$  и  $\mu = \rho v_S^2 \xi_S$ , или условиями  $\text{Im} K_b \neq 0$  и  $\text{Im} \mu \neq 0$  в модели Био [8, 20]. Можно показать [6], что верно соотношение:

$$\omega c^{-1}(\omega) = \omega c^{-1}(\infty) + H[\beta(\omega)],$$

где  $H[\beta(\omega)] = \pi^{-1} \int_{R^1} \beta(\xi)(\xi - \omega)^{-1} d\xi$  является преобразованием Гильберта от коэффициента затухания.

Поэтому фазовая задержка волны на конкретной частоте  $\omega$  определяется интегралом от спектра поглощения  $\beta(\omega)$  на всех частотах. Таким образом, задача распространения волн, решенная для идеально упругой среды, может быть обобщена на поглощающие среды заменой  $k \in R \rightarrow K \in C$ . Такой подход также позволяет формально вводить неоднородные волны при описании прохождения волн с криволинейным фронтом через границы раздела сред.

Теоретический анализ и экспериментальные данные [8, 20] показывают, что волна  $P_L^1$  практически не диспергирует, а ее коэффициент затухания  $\beta$  составляет порядка 0,1÷1,0 дБ на длине волны  $\lambda$ . Волна  $P_L^2$  сильно диспергирует и чрезвычайно быстро затухает; волны  $P_L^2$  могут быть существенны только для газонасыщенных осадков. Волна  $P_S$  имеет коэффициент затухания на порядок больший  $\beta$  для  $P_L^1$  и скорость распространения  $c_S \ll c_L$ , что приводит к поздним и более слабым вступлениям эхо-сигналов, переносимых волной  $P_S$ . Таким образом, среди описываемых моделью Био волн  $P_L^1$ ,  $P_L^2$  и  $P_S$  наиболее устойчивым и информативным переносчиком эхо-сигналов от находящихся в гетерогенной среде локализованных неоднородностей является волна  $P_L^1$ , эквивалентная волне  $P_L$  жидкой (импедансной) среды.

Гетерогенной среде, содержащей локализованные неоднородности, могут быть присущи сильно нелинейные резонансные эффекты [25, 4]. При конструировании любой (импедансной, упругой или гетерогенной) акустической модели среды, содержащей какую-либо локализованную неоднородность, также должны учитываться упругие свойства и, возможно, внутренняя структура этой неоднородности. Эти особенности, отраженные в граничных условиях, могут формировать тонкую структуру амплитудно-частотной характеристики системы "дно - неоднородность" и влиять на обнаружение неоднородностей и других структурных возмущений.

В осадках, как сплошной среде, существует два основных типа нерегулярностей (возмущений), которые могут быть причиной рассеяния звука: объёмные неоднородности и неровности границ. Объёмными неоднородностями являются пространственные флуктуации различных параметров среды относительно их средних значений (усредненных по горизонтальным координатам), как правило, зависящих от глубины вследствие общей стратификации осадков. Неровности могут относиться к разным границам - поверхности дна (границе вода - осадки) и внутренним границам раздела в толще осадков.

Статистическая модель возмущений донной среды включает в себя пространственные спектры неровностей и объёмных неоднородностей осадочной толщи с учетом возможных взаимных корреляций между неровностями разных границ, а также между флуктуациями различных параметров среды. Необходимые данные уже имеются для неровностей поверхности дна [26-29], однако они практически отсутствуют для внутренних границ раздела. Недостаточно данных и для статистического описания объёмных неоднородностей толщи осадков. Могут быть использованы спектральные характеристики неоднородностей, основанные на данных глубоководного бурения [30], а также колонок верхнего слоя грунта [31-32], однако они позволяют дать только одномерное описание реально трёхмерного случайного процесса. Это приводит к необходимости введения в модель неоднородностей некоторого свободного параметра, "коэффициента анизотропии", связывающего горизонтальный и вертикальный масштабы неоднородностей [33-37].

Рассеивающие свойства дна могут существенно различаться для разных типов стратификации осадков, а также для разных частотных диапазонов зондирующего сигнала. На достаточно высоких частотах существенными являются параметры только приповерхностного слоя осадков, так как мала глубина проникновения звука в грунт, и донная среда может рассматриваться как однородное в среднем полупространство. Рассеивателями при этом являются неровности поверхности дна и приповерхностные объёмные неоднородности. Исследованию двух различных механизмов высокочастотного рассеяния, объёмного и поверхностного, посвящено большое количество работ [38-44]. В этих работах осадки рассматривались акустически жидкими, то есть в пренебрежении их способностью поддерживать сдвиговые напряжения. В рамках этой модели удалось объяснить многие закономерности, наблюдаемые при рассеянии звука дном океана [42-48].

Среди остающихся пока недостаточно изученными отметим эффекты, связанные с проникновением звука в осадки и его рассеянием при малых (меньших критического) углах скольжения, наблюдаемые, например, в районах с песчаным дном [49, 50]. Частично усиление проникновения звука в осадки удастся объяснить влиянием неровностей поверхности дна, как крупных [40], так и мелкомасштабных [51, 49]. Усиление рассеяния при малых углах скольжения может быть обусловлено влиянием крупных неровностей на

рассеяние объемными неоднородностями [52, 40] и мелкими неровностями [43]. Такое усиление рассеяния может наблюдаться и в районах с выровненным дном. В некоторых случаях это может быть вызвано присутствием в осадках газовых пузырьков [29, 53]. Существуют также попытки объяснить этот эффект в рамках модели Био - на качественном уровне он объясняется возбуждением в осадках второго типа продольных волн - медленных волн Био [21]. Однако надежных измерений этих волн и их основных параметров в реальных осадках пока недостаточно для количественного объяснения наблюдаемого эффекта.

Влияние сдвиговой упругости дна изучалось в ряде работ [54-58]. Исследовались характеристики рассеяния для различных типов дна, от песка до базальта. Было показано, что сдвиговыми эффектами в песках можно пренебречь. Для консолидированных и скальных грунтов эти эффекты являются определяющими и приводят, в частности, к усилению роли объемного рассеяния. Это объясняется "смягчением" границы раздела, увеличивающим проникновение первичного поля в грунт, а также появлением трех новых каналов объемного рассеяния, включающих сдвиговые волны: наряду с рассеянием продольных волн в продольные, появляется рассеяние продольных волн в сдвиговые, а также сдвиговых в продольные и сдвиговые.

С понижением частоты проникновения звука в грунт растёт и влияние стратификации (зависимости средних параметров дна от глубины) вследствие регулярной рефракции, отражения внутренними границами раздела, рассеяния неровностями и объёмными неоднородностями глубоких слоёв дна. Случай объёмного низкочастотного рассеяния звука флуктуациями скорости звука был рассмотрен в работах [59-61]. В работе [59], в частности, было получено выражение для коэффициента рассеяния от произвольной слоистой жидкой среды, а в работе [61] изучалось влияние приповерхностных градиентов скорости звука на объёмное рассеяние в осадках. Случай рассеяния неровной поверхностью стратифицированных жидких осадков рассматривался в работах [55, 62]. В работах [63-70] изучались различные модели слоистых сред с неровными внутренними границами раздела. Модели в [67-70] включают также объёмное рассеяние флуктуациями плотности и скорости звука. Причем в работах [69, 70] они обобщены на случай жидкой слоистой среды, лежащей на упругом рассеивающем полупространстве. Общим эффектом в низкочастотном рассеянии от слоистых осадков является осциллирующий характер частотно-угловых зависимостей коэффициента рассеяния, причем масштабы осцилляций определяются интерференционными соотношениями и зависят от параметров слоистой структуры осадков.

Недавно предложен единый подход к объёмному и поверхностному рассеянию [71]. Этот подход рассматривает неровности как частный случай объёмных возмущений среды, примыкающей к плоской (невозмущённой) границе раздела. Это позволяет дать общее описание задачи рассеяния на основе единого интегрального уравнения, включающего оба типа возмущений среды.

Рассмотренные математические модели донных осадков довольно сложные и трудоёмки в математическом плане и не оправданы для конкретных целей гидроакустики (например, профилирование донных структур).

Задача определения амплитудной и фазовой характеристик эхо-сигнала может быть решена строго при умеренной сложности акустической модели системы "источник / приемник – среды распространения". Задача определения поля отклика реального дна математически выражается через задание нетривиальных нерегулярных граничных условий

для акустического поля и часто решается статистически. Локальное (одномерное в случае профилирования) описание распространения акустического поля в донной структуре достаточно вести в приближении импедансной слоистой среды с множеством компланарных границ и мелких структурных неоднородностей. Представление о толще донных грунтов как импедансной среде позволяет строить достаточно общие акустико-структурные модели дна с объектом без привлечения сложного и часто неоправданного в прикладном отношении математического аппарата для анализа упругих и гетерогенных сред.

Таким образом, для задач профилирования целесообразнее использовать модель дна, состоящую из импедансной слоистой среды с множеством компланарных границ и мелких структурных неоднородностей, что нами и было сделано в других работах.

### Литература

1. Исакович М.А. Общая акустика. – М.: Наука, 1973. – 496 с.
2. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. – Л.: Судостроение, 1972. – 352с.
3. Шендеров Е.Л. Излучение и рассеяние звука. – Л.: Судостроение, 1989. – 304 с.
4. Ляпин А.А., Селезнев М.Г., Собисевич Л.Е. Механико-математические модели в задачах активной сейсмологии. Под общей редакцией Собисевича Л.Е. – М.: ГНИЦ ПГК (МФ) при Куб ГУ Минобразования России, 1999. – 294 с.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.. Теория упругости. Теоретическая физика, т.VII. – М.: Наука, 1965. – 204 с.
6. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. – М.: Мир, т.1,2. 1983
7. Математическое моделирование слоистых неоднородных сред с полостями простой и сложной формы: Отчет по НИР/ НТЦ ПАС НАН Украины; № ГР 01040008326. Запорожье, 2004. – 151 с.
8. Акустика морских осадков / Пер. с англ., М.: Мир, 1977. – 533 с.
9. Buckingham M.J.. Theory of acoustic attenuation, dispersion, and pulse propagation in unconsolidated granular materials including marine sediments // J. Acoust. Soc. Am. – 1997. – 102(5). – P. 2579-2596
10. Buckingham M.J.. Theory of compressional and shear waves in fluidlike marine sediments // J. Acoust. Soc. Am. – 1998. – 103(1). – P. 288-299
11. Geerits T.W.. Acoustic wave propagation through porous media revisited // J. Acoust. Soc. Am. – 1994. – 100(5). – P. 2949-2959
12. Chotiros N.P.. Biot model of sound propagation in water-saturated sand // J. Acoust. Soc. Am. – 1995. – 97(1). – P. 199-214
13. Kargl S.G. and Lim R.. A transition-matrix formulation of the scattering in inhomogeneous, saturated porous media // J. Acoust. Soc. Am. – 1993. – 94. – P. 1527-1550
14. Nihei K.T., Myer L.R. and Cook N.G.W.. Numerical simulation of elastic wave propagation in granular rock with the boundary integral equation method // J. Acoust. Soc. Am. – 1995. – 97(3). – P. 1423-1434
15. Stephen R.A. and Swift S.A.. Finite difference modeling of geoaoustic interaction at anelastic seafloor // J. Acoust. Soc. Am. – 1994. – 95(1). – P 60-70
16. Kargl S.G. and Williams K.L.. Double monopole resonance of a gas-filled, spherical cavity in a sediment // J. Acoust. Soc. Am. – 1998. – 103(1). – P. 265-274
17. Hamilton E.L.. Geoaoustic modeling of the sea floor // J. Acoust. Soc. Am. – 1980. – 68(5). – P. 1313-1340
18. Milholland P., Manghnani M.H., Schlanger S.O. and Sutton G.H.. Geoaoustic modelling of deep-sea carbonate sediments // J. Acoust. Soc. Am. – 1980. – 68(5). – P. 1351-1360
19. Андерсон Р.С. Статистическая корреляция между физическими свойствами и скоростью звука в осадках, в кн: Акустика морских осадков, пер. с англ., М.: Мир, 1977, С. 438-480
20. Акустика дна океана. Под ред. У. Купермана и Ф. Енсена. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
21. Био М.А. Обобщенная теория распространения акустических волн в диссипативных пористых средах // Механика, 1963. № 6. – С.135-155

22. Николаевский В.Н. Механика насыщенных пористых сред. – М.: Наука, 1970. – 336 с.
23. Бурдик В.С. Анализ гидроакустических систем. – Л.: Судостроение, 1988. – 392 с.
24. Gonchar A.I., Pisanko I.M. Optimization of long low-sized silted objects search at parametric survey of sea bottom // Proc. of 16<sup>th</sup> Intern. Symp. of Nonlinear Acoustics. – М. 2002.
25. Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л. Волновые процессы и резонансы в геофизике. – М.:ОИФЗ РАН, ГНИЦ ПГК (МФ) при Куб ГУ Минобразования России, 2001. – 299 с.
26. Briggs K.B.. Microtopographical roughness of shallow-water continental shelves // IEEE J. Oceanic Eng. – 1989. – № 14. – P. 360-367
27. Jackson D.R., Baird A.M., Crisp J.J. and Thomson P.A.G.. High-frequency bottom backscatter measurements in shallow water // J. Acoust. Soc. Am. – 1986. – 80(4). – P. 1188-1199
28. Jackson D.R. and Briggs K.B.. High-frequency bottom backscattering: roughness versus sediment volume scattering // J. Acoust. Soc. Am. – 1997. – 92(2). – P. 962-977
29. Jackson D.R., Briggs K.B., Williams K.L. and Richardson M.D.. Tests of models for high-frequency sea-floor backscatter // IEEE J. Oceanic Eng. – 1996. – 21(4). – P. 458-470
30. Ефимов А.В., Ивакин А.Н., Лысанов Ю.П.. Геоакустическая модель рассеяния звука дном океана, основанная на данных глубоководного бурения // Океанология. – 1998. – №28(3). – С. 371-375
31. Crowther P. A.. Some statistics of the sea-bed and acoustic scattering therefrom // in Acoustics and Sea-Bed, ed. by N.G. Pace (Bath University, Bath, England). – 1983. – P. 921-929
32. Lyons A.P., Anderson A.L. and Dwan F.S. Acoustic scattering from the seafloor: Modeling and data comparison // J. Acoust. Soc. Am. – 1994. – 95. – P. 2441-2451
33. Ивакин А.Н. О рассеянии звука многомасштабными неоднородностями грунта // Океанология. – 1981. – 21(1). – С. 42-44
34. Бунчук А.В., Ивакин А.Н. Азимутальная анизотропия обратного рассеяния звука дном в мелководных районах // Тез. V семинара "Акуст. статист. модели океана", М., 1985, С. 47-51
35. Yamamoto T. Velocity variabilities and other physical properties of marine sediments measured by crosswell acoustic tomography // J. Acoust. Soc. Am. – 1995. – 98. – P. 2235-2248
36. Yamamoto T. Acoustic scattering in the ocean from velocity and density fluctuations in the sediments // J. Acoust. Soc. Am. – 1996. – 99(2). – P. 866-879
37. Turgut A. Inversion of bottom/subbottom statistical parameters from acoustic backscatter data // J. Acoust. Soc. Am. – 1997. – 102(2). – P. 833-852
38. Kuo E.Y.T. Wave scattering and transmission at irregular surfaces // J. Acoust. Soc. Am. – 1964. – 36(11). – P. 2135-2142
39. Kuo E.Y. Joint perturbation scattering characterization of a littoral ocean bottom reverberation: Theory, scattering strength predictions, and data comparisons // IEEE J. Ocean. Engr. – 1995. – 20(3). – P. 198-210
40. Ивакин А.Н., Лысанов Ю.П. Рассеяние звука объемными неоднородностями подводного грунта, ограниченного неровной поверхностью // Акуст. журн. – 1981. – 27(3). – С. 384-390
41. Ивакин А.Н. Рассеяние звука случайными неоднородностями подводного грунта и малыми неровностями его поверхности // Вопросы судостроения, сер. Акустика. – 1983. – №17. – С. 20-25
42. Ивакин А.Н. Акустические статистические модели дна для мелководных районов океана // Судостроительная промышленность, сер. Акустика. – 1986. – №1. – С. 3-10
43. Jackson D.R., Winebrenner D.P. and Ishimaru A. Application of the composite roughness model to high-frequency bottom backscattering // J. Acoust. Soc. Am. – 1986. – 79(5). – P. 1410-1422
44. Jackson D.R. Models for scattering from the sea bed // Proc. Inst. Acoust. – 1994. – 16. – P. 161-169
45. Бунчук А.В., Житковский Ю.Ю. Рассеяние звука дном океана в мелководных районах (обзор) // Акуст. журн. – 1980. – 26(5). – С. 641-654
46. Gensane M. A statistical study of acoustic signals backscattered from the sea bottom // IEEE J. Ocean. Engr. – 1989. – 14. – P. 84-93
47. Rogers A.K. An experimental investigation of the contribution of sediment volume scattering to acoustic backscatter measured on the shallow waters of the Florida Strait // in High Frequency Acoustics in Shallow Water, SACLANTCEN, LaSpezia, Italy, 1997, P. 459-466



48. Williams K.L. and Jackson D.R. Bistatic bottom scattering: Model, experiments, and model/data comparison // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1998. – 103(1) . – P. 169-181
49. Thorsos E.I, Jackson D.R., Moe J.E., and Williams K.L. Modeling of Subcritical Penetration into Sediments Due to Interface Roughness // in *High Frequency Acoustics in Shallow Water*, SACLANTCEN, LaSpezia, Italy, 1997, P. 563-569
50. Clarke J.E.H., Danforth B.W. and Valentine P. Areal seabed classification using backscattering angular response at 95 kHz // in *High Frequency Acoustics in Shallow Water*, SACLANTCEN, LaSpezia, Italy, 1997, P. 243-250
51. Moe J.E. and Jackson D.R. Near-field scattering through and from a two-dimensional fluid-fluid rough interface // *Acoust. Soc. Am.* – 1998. – 103(1) . – P 275-287
52. Ивакин А.Н. Обратное рассеяние звука дном океана. Теория и эксперимент.: Акустика океанской среды / Под ред. Л.М. Бреховских и И.Б. Андреевой, М.: Наука, 1989, с.160-169
53. Chu D., Williams K.L., Tang D. and Jackson D.R. High-frequency bistatic scattering by sub- bottom gas bubbles // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1997. – 102(2) . – P. 806-814
54. Ивакин А.Н. Рассеяние звука неоднородностями упругого полупространства // *Акуст. журн.* – 1990. – 36(4). – С. 670-675
55. Essen H.H. Scattering from a rough sedimental seafloor containing shear and layering // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1994. – 95(3) . – P. 1299-1310
56. Yang T. and Broschat S.L. Acoustic scattering from a fluid-elastic-solid interface using the small-slope approximation // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1994. – 96. – P. 1796-1803
57. Jackson D.R. and Ivakin A.N. Scattering from elastic sea beds: First-order theory // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1998. – 103(1) . – P. 336-345
58. Ivakin A.N. and Jackson D.R. Effects of shear elasticity on sea bed scattering: Numerical examples // *J. Acoust. Soc. Am.* – 103(1). – P. 346-354
59. Ивакин А.Н. Рассеяние звука неоднородностями стратифицированных осадков // *Акуст. журн.* – 1986. – 32(6). – С. 791-798
60. Tang D. and Frisk G.V. Spectral parameterization of scattering from a random ocean bottom // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1992. – 92(5). – P. 2792-2799
61. Mourad P.D. and Jackson D.R. A model/data comparison for low-frequency bottom backscatter // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1993. – 94(1). – P. 344-358
62. Moe J.E. and Jackson D.R. First-order perturbation solution for rough surface scattering cross section including the effects of gradients // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1994. – 96(3). – P. 1748-1754
63. McDaniel S.T. Effect of surficial sediment layering on high-frequency seafloor reverberation // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1992. – 91(3) . – P. 1353-1356
64. Kuperman W.A. and Schmidt H. Rough surface elastic wave scattering in a horizontally stratified ocean // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1986. – 79. – P. 1767-1777
65. Tang D. A note on scattering by a stack of rough interfaces // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1996. – 99. – P. 1414-1418
66. Ivakin A.N. Sound scattering by rough interfaces of layered media // in *Third International Congress on Air-& Structure- Borne Sound and Vibration*, Montreal, Canada. – 1994. – v.3. – P. 1563-1570
67. Ивакин А.Н. Реверберация в плоском случайно-неоднородном волноводе при узкополосном акустическом зондировании // *Акуст. журн.* – 1994. – 40(3). – С. 476-477
68. Ivakin A.N. Modelling of sound scattering by the sea floor // *J. de Physique IV.* – 1994. – 4. – C1095-1098
69. Ivakin A.N. First-order model for bottom volume and roughness scattering // in *International Conference on Shallow Water Acoustics.* – Beijing. – 1997. – P. 85-89
70. Ivakin A.N. A unified model for seabed volume and roughness scattering // in *High Frequency Acoustics in Shallow Water*, SACLANTCEN, LaSpezia, Italy. – 1997. – P. 267-273
71. Ivakin A.N. A unified approach to volume and roughness scattering // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1998. – 103(2). – P. 827-837