

АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ УРОВНЯ БИОЛОГИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДНА ВОДОЕМА

Лисютин В.А., Ластовенко О.Р., Петренко Н.В.

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, РФ; e-mail: vlisiutin@mail.ru

Поступила в редакцию: 29.06.2018

Аннотация. Наличие газовых пузырьков в дне мелководных морских и пресноводных водоемов существенно снижает скорость звука. Количество газа в дне зависит от микробиологической активности, и поэтому уровень загрязнения является индикатором экологического баланса. В работе предлагается контролировать уровень загрязнения дна методом измерения коэффициента отражения звука или измерения входного импеданса дна. Вычисляются частотно-угловые зависимости коэффициента отражения и частотные зависимости входного импеданса дна. Показывается, что принципиальным моментом верной интерпретации результатов является учет межгранулярного трения и дисперсии скорости звука в морских осадках.

Ключевые слова: морские осадки, дисперсия фазовой скорости, межгранулярное трение, газонасыщенные осадки, коэффициент затухания, коэффициент отражения, импеданс дна.

ВВЕДЕНИЕ

Акустические волны в области шельфа распространяются в естественном волноводе, образованном слоем воды, ограниченным сверху абсолютно отражающей свободной поверхностью, снизу – частично отражающим дном. Волноводные условия распространения звука, когда дно является главным фактором, определяющим пространственную и временную структуру звукового поля, получили название «условия мелкого моря», а раздел акустики океана, решающий задачи о распространении звука преимущественно волновыми методами – акустика мелкого моря. В объекты исследования акустики мелкого моря входит акустика морского дна и морских осадков; донная морфология – объемные неоднородности, шероховатость поверхности дна (рябь); слоистая структура дна; акустические характеристики морских осадков. От этих параметров зависят коэффициенты отражения, прямого и обратного рассеяния, времена реверберации, результирующее поглощение звука дном [1, 2].

Дно мелководной части Черного моря не только вмещает немалые природные и культурные ресурсы, но и является накопителем антропогенных биологических и иных видов загрязнений. Основной природный ресурс дна мелкого моря – песок, хищническая добыча которого наносит непоправимый вред пляжам Крыма, культурный – археологические артефакты, ожидающие своего обнаружения, а мониторинг экологического состояния дна перед началом курортного сезона должен быть так же обязателен, как и его водолазное обследование. Практически, дистанционный метод исследования ресурсов, структуры и состояния дна можно реализовать с помощью акустического профилирования и одновременного измерения частотных зависимостей коэффициента отражения [3, 4]. Необходимое условие адекватного истолкования результатов такого исследования – знание связи между акустическими и физическими характеристиками морских осадков.

Наибольший интерес представляет переходный слой дна толщиной несколько десятков метров, состоящий из неконсолидированных морских осадков типа песка, ила, глины, смеси разнообразных обломочных материалов. Неконсолидированные морские осадки состоят из частиц несферической формы, гранулометрический состав которых может изменяться в весьма широком диапазоне – от самых тонкодисперсных глин до крупнозернистых песков и гравия. Вследствие пористости, слой осадков является водонасыщенным, а в загрязненных органикой, заиленных грунтах еще и газонасыщенным. В переходном слое будут оседать и всевозможные загрязнения, и располагаться полезные либо вредные артефакты. Газонасыщенный слой обычно имеет толщину несколько метров, его природа связана с активностью метано и сероводородобразующих бактерий. Степень газонасыщенности может служить индикатором экологического баланса водоема. Экспериментально были отмечены скорости звука в дне Балтийского моря 70-90 м/с, в дне Ивановского водохранилища – 200-250 м/с [4]. Пузырьки газа в дне устойчивы благодаря покрывающим их пленкам и имеют средние размеры 0,01-0,1 мм.

В такой среде могут распространяться упругие волны двух типов: продольная (компрессионная) и поперечная (сдвиговая) [1, 2]. Акустическими характеристиками этих волн являются фазовые скорости, коэффициенты затухания и их частотные зависимости.

Используемый гидроакустическими системами профилирования дна частотный диапазон звуковых волн заключается в границах от десятков герц до 50 кГц с хорошим запасом. Внутри этого диапазона оказывается «переходная» область, в которой регистрируется наибольшая дисперсия скорости звука в осадках.

Простейшие модели морских осадков. Формула Вуда. В самой верхней части переходного слоя морские осадки представляют собой практически суспензию – самые верхние частицы прижаты к нижележащим только собственным весом. Волновое число и скорость звука в суспензии с пористостью P описывается формулой Вуда:

$$k_0^2 = \omega^2 \frac{\rho_m}{K_m}, \quad c_0 = \sqrt{\frac{K_m}{\rho_m}}, \quad (1)$$

где K_m – объемный модуль упругости среды (суспензии),

$$\frac{1}{K_{m(ean)}} = \frac{P}{K_f} + \frac{1-P}{K_g}, \quad (2)$$

$\rho_{f,g}$, $K_{f,g} = \rho_{f,g} c_{f,g}^2$ – плотности и модули упругости флюида и твердой фазы соответственно; $\rho_m = P\rho_f + (1-P)\rho_g$ – аддитивная плотность среды.

В случае присутствия пузырьков газа или иных примесей состав отложений можно описать многокомпонентной моделью среды. Скорость распространения продольных волн c_0 в многокомпонентной среде будет выражаться через равновесные по объему значения плотности ρ_m и сжимаемости K_m^{-1} в соответствии с (2), только плотность и сжимаемость следует вычислять суммированием соответствующих парциальных компонент среды:

$$\rho_m = \phi_1\rho_1 + \phi_2\rho_2 + \phi_3\rho_3 + \dots, \quad \frac{1}{K_m} = \frac{\phi_1}{K_1} + \frac{\phi_2}{K_2} + \frac{\phi_3}{K_3} + \dots, \quad (3)$$

где $\phi_{1,2,3} = V_{1,2,3}/V$ – относительный объем составляющих, причем $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 1$; V – полный объем среды.

Таким образом, скорость звука в трехкомпонентной среде будет равна

$$c_0 = \left[\left((1-P)\rho_g + (P-\phi)\rho_f + \phi\rho_a \right) \left((1-P)K_g^{-1} + (P-\phi)K_f^{-1} + \phi K_a^{-1} \right) \right]^{-1/2}, \quad (4)$$

где обозначения такие, как и в (2), кроме ϕ , ρ_a , K_a – объемная доля, плотность и давление газа.

Если известны плотности и скорости звука для парциальных сред, то можно из (4) исключить сжимаемости и получить итоговое выражение для скорости в следующем виде:

$$c_0 = \left[\left((1-P)\rho_g + (P-\phi)\rho_f + \phi\rho_a \right) \left(\frac{1-P}{\rho_g c_g^2} + \frac{(P-\phi)}{\rho_f c_f^2} + \frac{\phi}{\rho_a c_a^2} \right) \right]^{-1/2}. \quad (5)$$

На рис.1 показаны графики зависимости скорости звука в трехкомпонентной воде и газо-содержащей среде от относительного содержания газа. Физические параметры среды, для которых выполнен расчет будут приведены ниже.

Приведенные результаты расчетов, которые подтверждаются также и опытными данными, показывают, что даже небольшое содержание газа в грунте приводит к существенному уменьшению скорости звука. Объемная плотность же при этом сохраняется соответствующей основной компоненте – среда в целом проявляет свойства газа необычайно высокой плотности.

Метод оценки уровня биологического загрязнения.

Газонасыщенность дна метаном, сероводородом, свидетельствует либо о газоносности слоя, либо о его загрязнении продуктами распада органики. В случае газоносности слоя, он обычно «прикрыт» сверху осадочным слоем, эта ситуация рассматриваться не будет, в случае загрязненности – этот слой граничит с водным. Пузырьки газа могут быть и не видны невооруженным взглядом, однако достаточно выкопать песок детской лопаткой с глубины 10 – 20 см, например на пляже «Омега», и его понюхать – результат не оставляет сомнений. Тот же опыт можно проделать на пляже «Учкуевка» – там чисто. Нюхать и копать песок на значительной глубине затруднительно.

Дистанционный акустический метод оценки газонасыщенности дна можно реализовать при измерении частотных и угловых коэффициентов отражения [2-4].

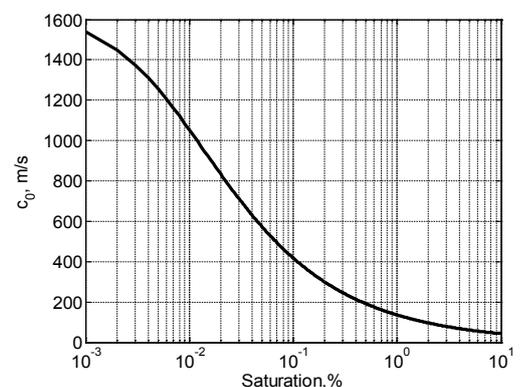


Рисунок 1. Зависимость скорости звука в среде вода+песок+газ от содержания газа

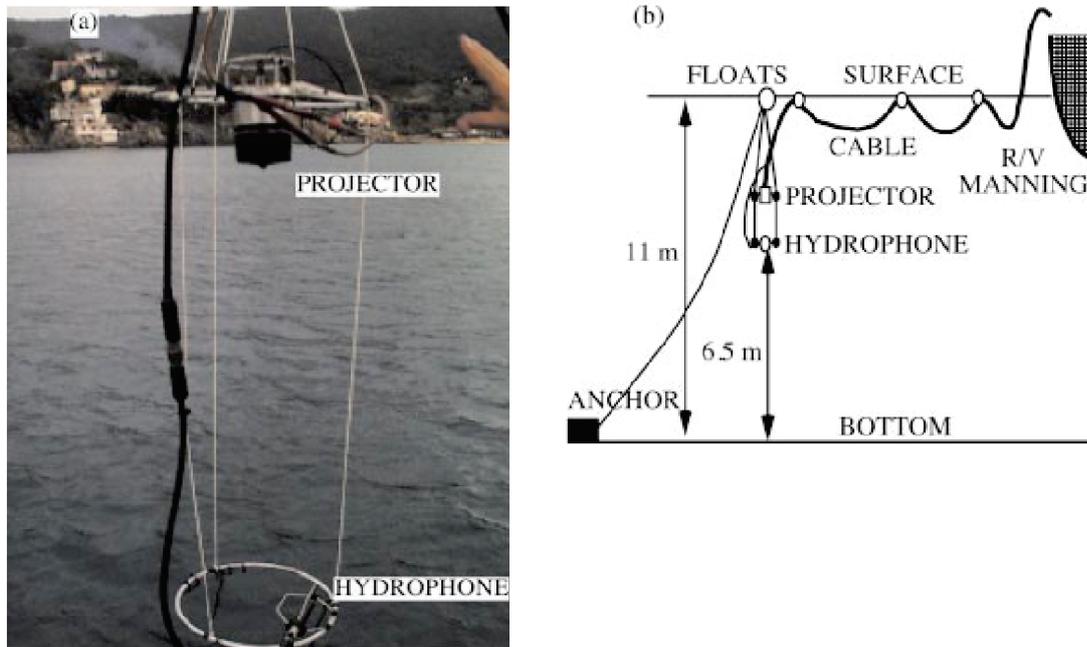


Рисунок 2. Внешний вид простейшего прибора для измерения коэффициента отражения (а) и схема его применения (b). Заимствовано из [5]

Наиболее подходящими гидроакустическими средствами для измерения коэффициентов отражения зарекомендовали себя узколучевые параметрические или ЛЧМ профилографы. Эти приборы используют вертикальное зондирование, что исключает эффект искривления звуковых лучей вследствие вертикальной изменчивости профиля скорости звука, а также обладают узкой (единицы градусов) диаграммой направленности [4]. Рабочие частоты этих приборов позволяют «озвучивать» площадки размером до десятка сантиметров. Кроме того, профилографы позволяют визуализировать внутреннюю структуру морского дна и расположенные в нем объекты культурного наследия [3]. А сгруппированные в линейку, могут и обеспечивать повышенную площадную производительность. На рис.2 показано, как может выглядеть простейший вариант кустарного прибора – измерителя коэффициента отражения [5].

Однако, чтобы количественно охарактеризовать или даже измерить уровень загрязнения дна, необходима адекватная теория, связывающая величину коэффициента отражения с акустическими и физическими характеристиками дна.

Акустическая модель морских осадков. Дно мелкого моря имеет сложную горизонтально-слоистую структуру, в которой переходный слой неконсолидированных газонасыщенных осадков располагается на слоях полуконсолидированных осадков и на фундаменте – упругом полупространстве [1]. В акустике мелкого моря, в первом приближении, сдвиговую волну считают не распространяющейся (жидкое дно), а скорость звука не зависящей от частоты, и представляют волновое число в каждом из слоев дна в виде Ж

$$k_p = \frac{\omega}{c_p} - i\alpha_p = \frac{\omega}{c_p} (1 - i\beta_p), \tag{6}$$

где c_p – скорость звука; α_p – коэффициент затухания, Нп/м; β_p – тангенс угла потерь, $\beta_p = \frac{\alpha_p c_p}{\omega}$. Поскольку

вычисление коэффициентов отражения будет производиться в основном при условии «нормального» падения, возможность распространения сдвиговой волны здесь мы учитывать не будем. Однако, как показано в [6], и будет показано снова ниже, принципиально важным моментом в широкополосных расчетах, когда ставится задача инверсии акустических и физических характеристик дна, является правильное отображение частотных зависимостей фазовой скорости $c_p(f)$ и затухания $\alpha(f)$.

Для вычисления дисперсионно-диссипативных характеристик морских осадков здесь будет использоваться упрощенная модель «GS+F» теории [7,8], называемая «GS+ED» (Effective Density), в которой комплексная

фазовая скорость $\tilde{c}_p^2 = \frac{\omega^2}{k_p^2}$ или волновое число даются выражениями:

$$\tilde{c}_p = \sqrt{\frac{K_m + \gamma(i\omega)^n}{\rho_{eff}}}, \quad k_p^2 = \omega^2 \frac{\rho_{eff}}{K_m + \gamma(i\omega t_0)^n}, \quad \rho_{eff} = \rho_m - \frac{\phi \rho_f}{\xi} F_C(w), \tag{7}$$

где γ , Па – модуль межгранулярной жесткости; n – показатель стресс-релаксации; $\phi = \frac{s\xi\kappa}{\chi a^2}$ – перколяционная пористость; ξ – извилистость; η – динамическая вязкость жидкости, Па·с; κ – проницаемость среды, м²; a – радиус цилиндрической поры; s – структурный коэффициент, зависящий от геометрии порового пространства; $\chi = \exp(\sigma^2)$, σ – среднеквадратичное отклонение размера пор в случае нормального закона распределения;

$F_C(w) = 1 - \frac{2J_1(i^{3/2}w)}{i^{3/2}wJ_0(i^{3/2}w)}$ – функция частотной коррекции, отражающая отличия характера течений в порах

от течения Пуазейля; $w = \sqrt{\frac{a^2 \rho_f}{\eta}} \omega$, $J_{0,1}$ – функции Бесселя.

Вещественные фазовые скорости $c_{p,s}$ и коэффициенты затухания $\alpha_{p,s}$ могут быть получены из комплексных фазовых скоростей как $c_{p,s} = \text{Re}(\tilde{c}_{p,s})$, $\alpha_{p,s} = -\omega \text{Im}(\tilde{c}_{p,s}^{-1})$, Нп/м.

Коэффициент отражения и «Bottom Loss». Комплексный коэффициент отражения определяется как $R = p_r / p_i$, где p_r , p_i – комплексные амплитуды давления в отраженной и падающей волне соответственно. Величина потерь при отражении от дна «Bottom Loss», BL, определяется как $BL = -20 \log_{10} R = 10 \log_{10} \langle |p_r|^2 \rangle / |p_i|^2$, где квадрат амплитуды отраженной волны осредняется по нескольким акустическим путям [2].

В рамках акустической модели пористого дна коэффициент отражения проще и эффективней всего вычислить через посредство нормальных импедансов как [9]

$$R = \frac{Z_{in} - Z_w}{Z_{in} + Z_w}, \quad (8)$$

где $Z_w = \rho_w / b_w$, $\rho_w = 1023 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды, $b_w = k_w \sqrt{1 - (\sin \theta)^2}$ – вертикальное волновое число в воде, $k_w = \omega / c_w$, $\xi = k_w \sin(\theta)$ – горизонтальное волновое число, которое, как следует из граничных условий, везде одинаково, и в воде, и в донных слоях, $c_w = 1530 \text{ м/с}$ – скорость звука в водном слое, θ – угол падения плоской волны, Z_{in} – входной импеданс дна, зависящий от модели дна.

Модель дна и результаты инверсии физических характеристик. Для проведения расчетов принята модель дна в виде слоя газонасыщенного песка толщиной d , лежащего на полупространстве, состоящим из такого же, но чистого песка. Акустические и физические характеристики чистого песка принимались такими же, как и измеренные в ходе эксперимента SAX-99 (Sediment Acoustics eXperiment). Гранулометрические и физические параметры этого песка близки к соответствующим параметрам песка, собранного на пляже г. Феодосии (117 км). Согласно нашим представлениям, в этом случае должны совпадать и акустические характеристики. В ходе эксперимента SAX-99 были измерены различными системами и способами акустические характеристики среды – частотные зависимости фазовой скорости и затухания, что в рамках модели GS+ED позволило восстановить модуль межгранулярной жесткости, показатель стресс-релаксации и перколяционную пористость. Структурный коэффициент s был определен по сопоставлению пористости и проницаемости, параметр χ подбирался по наилучшему соответствию дисперсионной кривой с экспериментальными точками.

Входные параметры для инверсии следующие [10]: $d_0 = 0.379 \text{ мм}$ – диаметр гранул; $\rho_g = 2690 \text{ кг/м}^3$; $K_g = 3.2 \cdot 10^{10} \text{ Па}$; $\rho_f = 1023 \text{ кг/м}^3$; $K_f = 2.395 \cdot 10^9 \text{ Па}$; $\eta = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Па·с}$; $P = 0.385$; $\kappa = 2.5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$; $\xi = 1.35$; $a_0 = 2.65 \cdot 10^{-5} \text{ м}$. Дисперсионные кривые и экспериментальные точка показаны на рисунке 3.

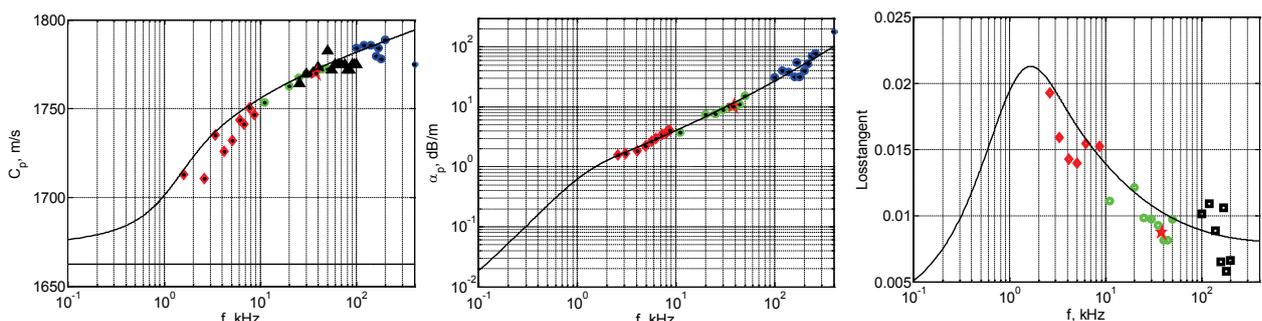


Рисунок 3. Результаты измерений эксперимента SAX-99 и дисперсионные кривые, восстановленные согласно модели GS+ED

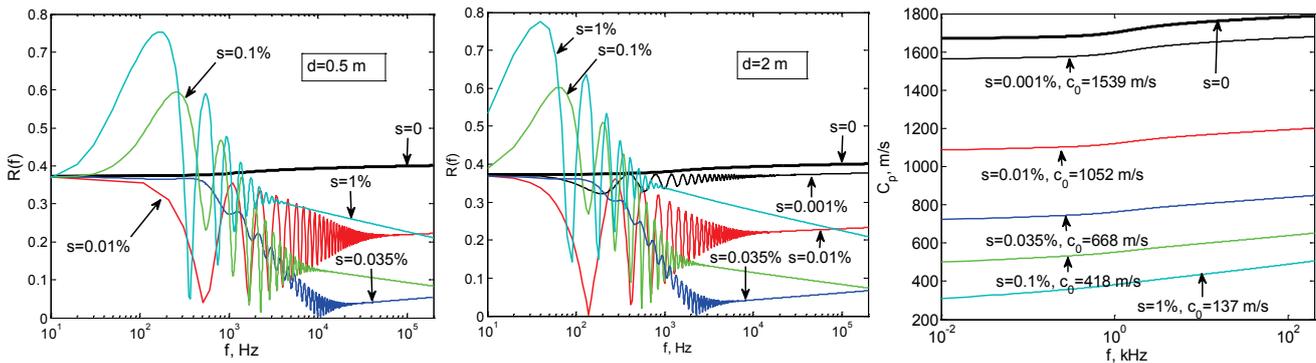


Рисунок 4. Частотные зависимости коэффициента отражения от дна и скорости звука в промежуточном слое при различных содержаниях газа

Результаты инверсии следующие: $a = 2,5 \cdot 10^{-5}$ м, $\gamma = 1,01 \cdot 10^8$ Па, $n = 0,104$, $s = 15$, $\chi = 3,3$, $\phi = 0,24$.

Для принятой здесь модели дна входной импеданс определялся по формуле [9]:

$$Z_{in} = \frac{Z_3 - iZ_2 \tan(-b_2 d)}{Z_2 - iZ_3 \tan(-b_2 d)} Z_2, \text{ где } Z_2 = \rho_m/b_2, \quad b_2 = \sqrt{k_{psat}^2 - \xi^2}, \quad Z_3 = \rho_m/b_3, \quad b_3 = \sqrt{k_p^2 - \xi^2}.$$

Здесь k_p и k_{psat} рассчитывались по (7.2), где K_m брались разные – в случае чистого песка – по (2), в случае газонасыщенного – по (3), (5).

Вычисление коэффициента отражения. Результаты расчетов. Коэффициент отражения вычислялся по формуле (8). Хотя волна, излучаемая источником – сферическая, диаграмма направленности приемника такова, что площадь отражающей озвученной поверхности составляет не более чем площадь первой зона Френеля.

Модель GS+ED учитывает два вида потерь: внутреннее (межгранулярное) и вязкое трение. При сатурации среды газом к перечисленным потерям добавляются специфичные: $\beta_r = A \cdot \text{Re}(k_p)$ – потери на дипольное излучение при пульсации, A – сечение рассеяния; $\beta_h = B \cdot (\omega_0/\omega)^2$ – тепловые потери при совпадении частоты акустической волны с резонансной частотой пузыря; $\beta_s = 4 \sin(m\pi/2) / (\rho_m \omega^2 A^2)$ – сдвиговые потери в окружающей пузырек среде при его пульсации. Согласно [2] $\beta_r \approx 0,04$, $\beta_s = 0,07$, β_h возрастают с частотой, увеличиваясь в диапазоне от 10 Гц до 10 кГц от 0 до 0.03. По этой причине, учитывая аддитивность потерь, для восстановления k_p , в (1) должна быть сделана добавка специфичных потерь. Однако, пока эти дополнительные потери не учитывались. Результирующие графики частотных зависимостей модуля коэффициента отражения и фазовой скорости звука в промежуточном трехкомпонентном слое показаны на рисунке 4.

Рассмотрим графики $c_p(f)$, вычисленные при различных уровнях сатурации слоя газом. Рядом с каждым графиком показаны соответствующие скорости, вычисленные в «бездисперсионном» приближении, по формуле (1.2), (4) или (5). Как видно, они **не совпадают**, даже на низких частотах. Это и понятно. Формулы (1.2), (4), (5), которыми обычно пользуются при аналогичных расчетах [4], дают скорость звука в суспензии, без внутреннего трения между частицами. Правильное выражение для $c_p(f)$ можно получить только из (7.1) с учетом межгранулярного трения. Нетрудно видеть, сравнивая графики $c_p(f)$ при различных уровнях насыщения слоя газом, что с ростом насыщения – т.е. при уменьшении K_m вклад межгранулярного трения возрастает (плотность то среды практически не меняется) и дисперсия скорости звука увеличивается. Этот первый важный сделанный здесь вывод показывает неадекватность расчетов коэффициента отражения от газонасыщенного дна [4] в рамках бездисперсионного приближения. Как следствие, и выполненные по какому бы то ни было алгоритму инверсии газонасыщенности возвратят неверный (заниженный) результат.

Рассмотрим теперь частотные зависимости коэффициента отражения (нормальное падение). Здесь можно выделить три частотные области: низкочастотная область, где нет осцилляций, область осцилляций и область затухания. В НЧ области длина волны в слое в сравнении с его толщиной велика, однако для каких-то измерений эта область непригодна по причине технической нереализуемости измерительной установки – излучатель должен иметь солидные размеры. Область осцилляций. Если набег фазы на толщине слоя равен целому числу полупериодов, т.е. $b_2 d = l\pi$, $l = 1, 2, \dots$, что при нормальном падении означает $d = l\lambda_2/2$, где $\lambda_2 = 2\pi/k_{psat}$ – длина звуковой волны в материале слоя, оказывается, что $Z_{in} = Z_3$. Следовательно, коэффициент отражения (8) равен $R = (Z_{in} - Z_w) / (Z_{in} + Z_w)$. Таким образом, полуволновой слой не оказывает никакого действия на падающую волну, коэффициент отражения такой же, как если бы его и не было. Если же $b_2 d = l\pi + \pi/2$, $l = 0, 1, 2, \dots$, то при нормальном падении и $l = 0$ это означает $d = l\lambda_2/4$, и $Z_{in} = Z_2^2 / Z_w$. Следовательно, коэффициент отражения (8) будет равен $R = (Z_2^2 - Z_3 Z_w) / (Z_2^2 + Z_3 Z_w)$. Полное прохождение ($R = 0$) будет при $Z_2 = (Z_3 Z_w)^{1/2}$ [9], и при $Z_{in} = Z_w$, чем и объясняется нетипичное поведение $R(f)$ при сатурации $s = 0,035\%$. Какие-либо измерения в этой области осцилляций невозможны.

С ростом частоты, длина волны, распространяющейся в промежуточном слое, уменьшается, акустическая длина пути растёт. Уменьшение амплитуды волны вследствие затухания приводит к тому, что

интерференционная картина вырождается. Промежуточный слой становится подобен полупространству. Здесь, вероятно, и стоит поискать возможности для измерений газонасыщенности.

Рассмотрим предварительно частотно-угловые зависимости коэффициента отражения при различных уровнях сатурации, показанные на рисунке 5. На верхней панели, слева – отсутствие газа в слое. Фазовая скорость изменяется в пределах от 1670 м/с до 1780 м/с (рис. 3), что дает изменение предельного угла падения θ в диапазоне частот «снизу-вверх» ($c_w = 1530$ м/с) от 67° до 59° . В этом диапазоне R резко возрастает от 0,4 (нормальное падение) до ~ 1 (скользящее падение). При сатурации газом зависимость $R(f)$ становится близкой к периодической с периодом $\Delta f \approx c_{psat}/2d$, что при $d = 0,5$ м дает $\Delta f \approx c_{psat}$, где c_{psat} ($s, \%$) можно видеть на рисунке 4. Случай $s = 0,0018 \%$ интересен следующим. При таком уровне насыщения слоя газом фазовая скорость c_{psat} на низких (до 2 кГц) частотах $c_{psat} < c_w$ – в этой ситуации не существует угла полного внутреннего отражения, наоборот, $c_{psat} > c_w$ – полное внутреннее отражение возможно. Следствием этой коллизии, возникающей за счет дисперсии скорости звука, является резкий «изгиб желобков», т.е. изменение частотного периода Δf осцилляций $R(f)$ при приближении угла падения к предельному. При остальных, больших уровнях насыщения газом, $c_{psat} < c_w$, и предельного угла падения не существует, частотный период осцилляций определяется только дисперсией, т.е. $c_{psat}(f)$ и все «желобки» прямые, «перпендикулярные» оси частот. Частота f_m , соответствующая m – минимуму модуля коэффициента отражения и равная [4]

$$f_m = \frac{mc_{psat}}{2d} / \sqrt{1 - \left(\frac{c_{psat}}{c_w} \sin \theta \right)^2}$$

практически не зависит от угла падения волны θ . Как и на рисунке 4, здесь

видно, что с ростом частоты осцилляции вырождаются, газонасыщенный слой становится подобен полупространству.

Обратимся теперь к области, где осцилляции $R(f)$ отсутствуют. На рисунке 6 показаны зависимости коэффициента отражения и входного импеданса дна от уровня насыщения осадков газом на фиксированных частотах.

Коэффициент отражения в зависимости от насыщения изменяется немонотонно, а имеет минимум при уровне сатурации $s \approx 0,035 \%$, что, как видно из рис.6 объясняется равенством импеданса воды и дна, $Z_{in} = Z_w$. При других насыщениях разность $Z_{in} - Z_w$ увеличивается.

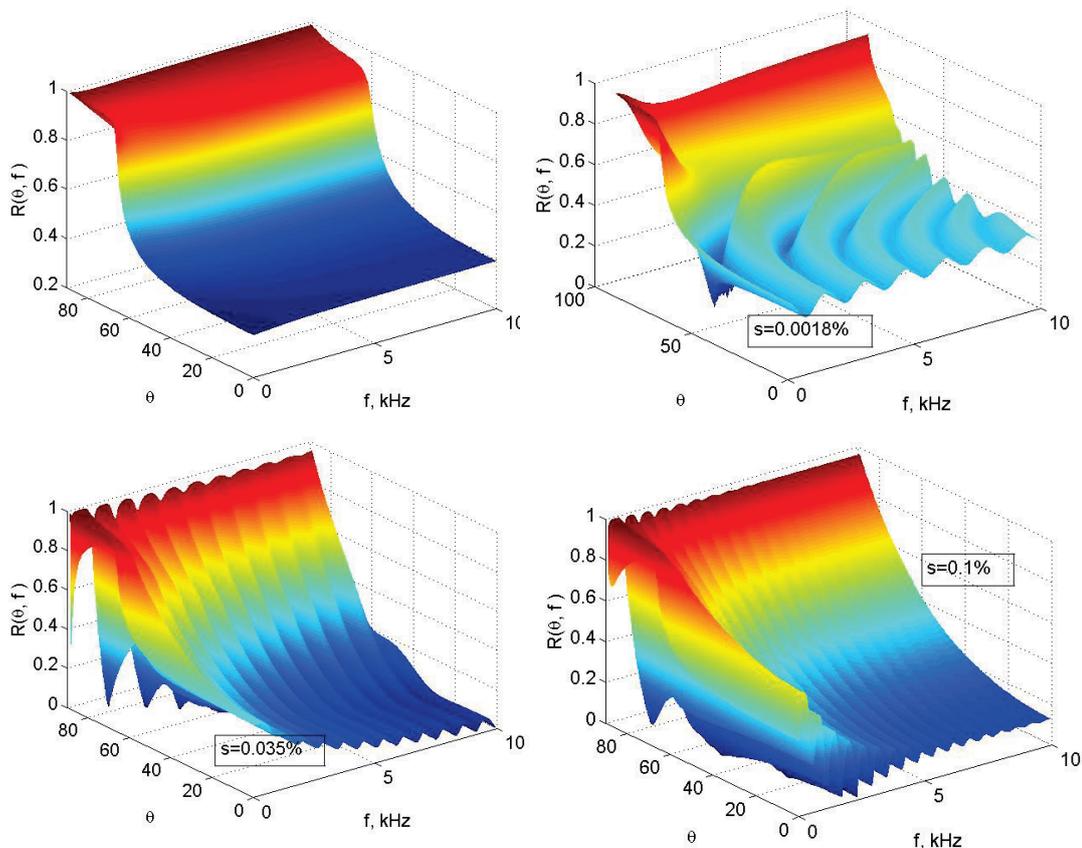


Рисунок 5. Частотно-угловые зависимости коэффициента отражения

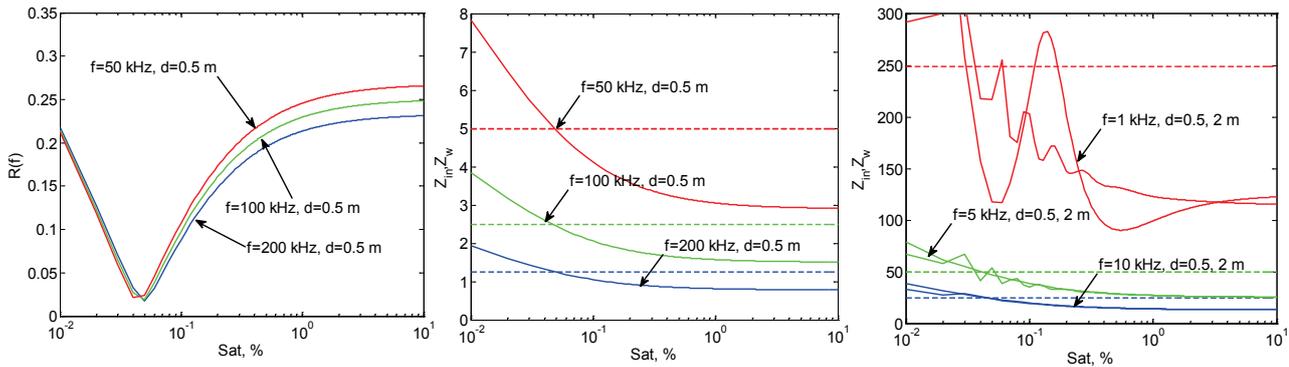


Рисунок 6. Зависимость модуля коэффициента отражения и входного импеданса дна от насыщения газом

Теоретически, с помощью двух трансиверов, работающих на двух частотах, например, 200 кГц и 50 кГц, по абсолютной величине и разности коэффициента отражения, возможно различить насыщение осадков, если $s > 0,035 \%$. При $s < 0,035 \%$ уловить различие, даже теоретически, маловероятно. Отметим, что кривые $R(s, \%)$ практически не зависят от толщины слоя газонасыщенных осадков – т.е. отражение на этих частотах происходит от достаточно тонкого слоя с толщиной порядка длины волны.

Альтернативой является регистрация не коэффициента отражения, а входного импеданса дна. Входной импеданс дна, по определению $Z_{in} = p / v_z$ - отношение акустического давления к вертикальной компоненте колебательной скорости. Колебательная скорость (КС) может быть измерена непосредственно. Датчик КС представляет собой соколеблющуюся с водой сферу с нейтральной плавучестью. Размер сферы, во избежание эффектов дифракции должен быть меньше длины волны, поэтому такие измерения можно выполнить только на низких частотах. На правой панели рис.6 – входной импеданс дна, но уже на низких, звуковых частотах. Видно, что, несмотря на осцилляции Z_{in} при малой толщине слоя, измерения на двух частотах могут дать необходимую для проведения инверсии информацию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный математический эксперимент показал практическую необходимость учета межгранулярного трения и дисперсии фазовой скорости звука при проведении широкополосных акустических расчетов.

Список литературы / References:

1. Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J. *Fundamentals of shallow water acoustics*. New York: Springer, 2012.
2. Jackson D.R., Richardson M.D. *High-Frequency Seafloor Acoustics*. New York: Springer, 2007.
3. Schock S.G. A Method for estimating the physical and acoustic properties of the sea bed using chirp sonar data. *IEEE J. of Ocean. Eng.*, 2004, vol. 29, no. 4, pp. 1200-1217.
4. Комиссарова Н.Н., Фурдуев А.В. Акустический метод измерения газосодержания в донных осадках. *Акуст. журн.*, 2004, т. 50, № 5, с. 666 -670. [Komissarova N.N., Furduev A.V. Acoustic method of measuring the gas content in bottom sediments. *Acust. journal*, 2004, vol. 50, no. 5, pp. 666-670. (In Russ.)]
5. Chotiros N. P., Lyons A. P., Osler J., Pace N. G. Normal incidence reflection loss from a sandy sediment. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2002, vol. 112, no. 5, pp. 1831-1841.
6. Лисютин В.А., Ластовенко О.Р., Ярошенко А.А., Сравнение дисперсионно-диссипативных характеристик мод в волноводе Пекериса в случае жидкого и пористого дна. *Доклады IXX школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских*. М: GEOS, 2018, с. 120-124. [Lisyutin V.A., Lastovenko O.R., Yaroshenko A.A. Dispersion-dissipative characteristics comparison of modes in the Pekeris waveguide in the case of a liquid and porous bottom. *Reports of the IXX School Seminar. acad. L.M. Brekhovskiy*. М: GEOS, 2018, pp.120-124. (In Russ.)]
7. Лисютин В.А. Ластовенко О.Р. Ярошенко А.А. Решение обобщенного уравнения Навье-Стокса для микронеоднородной двухфазной среды. *Прикладные задачи математики: материалы XXV междунар. научн.-техн. конф. Севастополь, 18-22 сентября 2017, г. Севастоп. гос. ун-т., Севастополь, 2017, с. 222*. [Lisyutin V.A., Lastovenko O.R., Yaroshenko A. A. Solution of the generalized Navier-Stokes equation for a micro-inhomogeneous two-phase medium. *Applied Mathematics Problems: Materials XXV International. scientific-techn. Conf. Sevastopol, September 18-22, 2017. Sevastopol state university. Sevastopol, 2017, p. 222. (In Russ.)]*
8. Лисютин В.А. О акустических характеристиках морских осадков. Подключение течений к GS теории межгранулярного трения. *Доклады IXX школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских*. М: GEOS., 2018, с. 156-160. [Lisyutin V.A. On the acoustic characteristics of marine sediments. Connection of flows to the GS theory of intergranular friction. *Reports of IXX School-Seminar named after acad. L.M. Brekhovskih*, М: GEOS. 2018, pp. 156-160. (In Russ.)]
9. Бреховских Л.М. Годин О.А. *Акустика неоднородных сред. В 2 т. Т. 1. Основы теории отражения и распространения звука*, М.: Наука, 2007, 442 с. [Brekhovskikh L.M., Godin O.A. *Acoustics of inhomogeneous*

media. In 2 volumes. vol. 1. *Fundamentals of the theory of sound reflection and propagation*, Moscow: Nauka, 2007, 442 p. (In Russ.)]

10. Buckingham M.J. On pore-fluid viscosity and the wave properties of saturated granular materials including marine sediments. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2007, vol. 122, no. 3, pp. 1486-1501.

ACOUSTICAL METHOD FOR ESTIMATING WATER BED BIOLOGICAL CONTAMINATION LEVEL

Lisyutin V.A., Lastovenko O.R., Petrenko N.V.

“Sevastopol state university”

Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russia; e-mail: vlisiutin@mail.ru

Abstract. The presence of gas bubbles in the bottom of shallow marine and freshwater reservoirs significantly reduces the speed of sound. The amount of gas in the bottom depends on microbiological activity, and therefore pollution level is an indicator of the ecological balance. It is proposed to control the level of bottom contamination by measuring sound reflection coefficient or measuring the input bottom impedance. The frequency-angular reflection coefficient dependences and frequency dependences of the input bottom impedance are calculated. It is shown that the principal point of the results correct interpretation is the inclusion of intergranular friction and sound velocity dispersion in marine sediments.

Key words: *marine sediments, phase-velocity dispersion, intergranular friction, gas-saturated sediments, rate of decay, reflection coefficient, bottom impedance.*