

УДК 534.2:551.463.284

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ОСАДКОВ МЕЛКОВОДНОЙ АКВАТОРИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕКТОРНОГО ПРИЕМНИКА

© 2024 г. М. А. Иванов¹, П. Ю. Муханов¹, А. С. Шуруп^{1, 2, 3, *}

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова”,
физический факультет, кафедра акустики, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт океанологии имени П. П. Ширикова Российской академии наук”, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта Российской академии наук”, Москва, Россия

*E-mail: shurup@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 29.08.2023 г.

После доработки 15.09.2023 г.

Принята к публикации 29.09.2023 г.

Предложена и апробирована на экспериментальных данных схема оценки параметров газонасыщенных осадков мелководных акваторий по данным от движущегося шумового источника. Показаны преимущества совместного использования информации о давлении и вертикальной компоненте колебательной скорости при решении рассматриваемой задачи.

DOI: 10.31857/S0367676524010216, EDN: RZLJYZ

ВВЕДЕНИЕ

Восстановление скорости звука в дне водоема является важной задачей как для акустического мониторинга акваторий [1], так и для построения моделей распространения акустических волн в волноводе, например, для экологического контроля уровней звука при изучении воздействия антропогенного шума на морские живые организмы [2]. Известно [3], что в мелководных пресноводных акваториях скорость звука в дне существенно меньше, чем скорость звука в воде. Это связано с тем, что донный грунт пресноводных водоемов, а также ряда шельфовых районов морей часто содержит газонасыщенные осадочные породы с некоторым количеством нерастворимых газов [4]. При наличии газовых пузырьков средняя плотность уменьшается незначительно, а сжимаемость увеличивается многократно, что и приводит к уменьшению скорости [3]. От изменения значений скорости звука в дне в существенной степени зависит величина пространственного затухания звукового поля [5]. Этот факт может быть использован для восстановления параметров волновода по данным в виде пространственного затухания различных составляющих акустического поля. Ранее такая возможность была продемонстрирована на основе рассмотрения пространственного затухания давления как в рамках

численного моделирования, так и при обработке экспериментальных данных с цепочки гидрофонов [6]. В настоящей работе для решения этой задачи используются данные с одиночного комбинированного приемного модуля (КПМ), позволяющего проводить одновременные измерения давления и ортогональных компонент колебательной скорости [7, 8]. Следует отметить, что в настоящее время наблюдается повышенный интерес к использованию подобных модулей для решения задач геоинверсии [9].

Работа имеет следующую структуру. Вначале рассматривается помехоустойчивость оценок скорости звука в дне при использовании информации о пространственном затухании различных составляющих акустического поля. Далее описывается схема решения обратной задачи и приводятся результаты ее применения для восстановления параметров волновода при обработке экспериментальных данных, измеренных на гидроакустическом полигоне МГУ [5, 8]. Этот полигон достаточно хорошо изучен [6, 8, 10], характеризуется присутствием газонасыщенного дна, возможности восстановления параметров которого рассматриваются в настоящей работе. В заключении приводятся основные результаты и выводы работы.

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ЗВУКА В ГАЗОНАСЫЩЕННОМ ДНЕ ПО ДАННЫМ О ПРОСТРАНСТВЕННОМ ЗАТУХАНИИ

При численном моделировании использовалась упрощенная модель волновода в виде изоскоростного водного слоя, лежащего на жидком однородном полупространстве со скоростью звука c_b , меньшей, чем в водном слое c . В случае $c_b \leq (0.1-0.4)c_0$ выражение для потенциала скорости φ на горизонтальном удалении r между точками излучения и приема при временной зависимости $\sim \exp(i 2\pi f t)$, f – частота в Гц, может быть записано в виде [10]:

$$\varphi = -\frac{2\pi i}{H} \sum H_0^{(2)}(x_l r) \times \sin(y_l z_s) \sin(y_l z_r), \quad (1)$$

$$\text{где } y_l = \frac{\pi l}{H} \left(1 + i \frac{\rho_b c_b}{2\pi f \rho_0 H} \right), \quad x_l = \sqrt{k_0^2 - \left(\frac{\pi l}{H} \right)^2} + \left(\frac{\rho_b c_b l}{2\rho_0 f H^2} \right)^2 - i \frac{\pi \rho_b c_b l^2}{\rho f H^3} - \text{комплексные вер-}$$

тикальная и горизонтальная компоненты волнового вектора для заданного номера моды l соответственно; суммирование проводится по номерам l распространяющихся мод; H – глубина водного слоя; $H_0^{(2)}$ – функция Ханкеля нулевого порядка второго рода; z_s, z_r – глубины погружения излучателя и приемника; ρ_b, c_b – плотность и скорость звука в подстилающей среде; ρ_0, c_0 – плотность и скорость звука в воде; $k_0 = 2\pi f/c_0$; i – мнимая единица.

В качестве исходных данных для решения обратной задачи используется пространственное затухание давления P , вертикальной компоненты колебательной скорости V_z (P и V_z могут быть вычислены на основе φ стандартными методами [3]) и вертикальной составляющей потока акустической мощности $W_z = \frac{1}{4}(PV_z^* + P^*V_z)$, “*” означает комплексное сопряжение. В качестве величины, характеризующей пространственное затухание, рассчитывается относительный уровень $L(r)$:

$$L(r) = 10 \lg \left[\frac{\langle g^2(r, f) \rangle_{\Delta f}}{\langle g^2(r_0, f) \rangle_{\Delta f}} \right], \text{ где } \langle \dots \rangle_{\Delta f} \text{ обозначает}$$

усреднение по рассматриваемой полосе частот Δf , а в качестве функции $g(r, f)$ используются значения $|P(r, f)|$, $|V_z(r, f)|$ или $\sqrt{|W_z(r, f)|}$, вычисленные для заданных r и f на основе (1); r_0 – минимальное из рассматриваемых расстояний между источником и приемником. Выбор исходных данных для

решения обратной задачи в виде пространственного затухания связан с тем, что зачастую в ходе экспериментальных работ регистрируются не абсолютные значения составляющих акустического поля, а их относительные уровни, как правило, в децибелах (дБ). Тем самым информация о фазе теряется, однако сохраняется зависимость относительных уровней от расстояния до источника, то есть информация о пространственном затухании. Такая ситуация характерна, например, для проведения экологических измерений уровней антропогенных шумов с использованием сертифицированного оборудования [2].

Рассматриваемая обратная задача сводится к минимизации многомерной невязки $\varepsilon(\vec{m}) = \|L_{\text{obs}} - L(\vec{m})\| / \|L_{\text{obs}}\|$ между экспериментальными L_{obs} и модельными $L(\vec{m})$ данными, численно рассчитанными для волновода с параметрами $\vec{m}$; при вычислении $\varepsilon(\vec{m})$ используется L_2 норма. Вектор параметров $\vec{m}$ в общем случае может содержать произвольный набор характеристик как среды распространения (глубина волновода, скорость звука и плотность дна и др.), так и характеристик источника (глубина погружения, дальность, скорость перемещения и др.). За оценку $\vec{m}^{\text{est}}$ параметров $\vec{m}$ принимается тот вектор, который обеспечивает

минимум невязки $\varepsilon(\vec{m})$: $\varepsilon(\vec{m}^{\text{est}}) = \min_{\vec{m}} \varepsilon(\vec{m})$. В текущем разделе рассматривается простейший случай, когда неизвестной является только скорость звука в дне c_b .

При численном моделировании использовались следующие параметры задачи, близкие к условиям эксперимента [5, 8]: $H = 8$ м, $z_s = 0.3$ м (приповерхностный источник), $z_r = 7.5$ м (приемный модуль располагается вблизи дна), $\rho_b = 1700$ кг/м³, $\rho_0 = 1000$ кг/м³, $c_0 = 1500$ м/с. Расстояние между источником и приемником k изменялось от 26 м до 52 м с шагом 0.5 м ($r_0 = 26$ м). Вычислялись уровни $L(r)$ для давления P и вертикальных компонент $V_z, W_z - L_P(r), L_{V_z}(r), L_W(r)$ соответственно. При восстановлении использовались исходные данные отдельно в виде $L_P(r), L_{V_z}(r)$ и $L_W(r)$. Дополнительно рассматривался одновременный учет пространственных затуханий $L_P(r)$ и $L_{V_z}(r)$ (в этом случае суммарная невязка вычислялась как среднеарифметическое невязок ε_P и ε_{V_z} , полученных отдельно для $L_P(r)$ и $L_{V_z}(r)$ соответственно: $\varepsilon_{P+V_z} = (\varepsilon_P + \varepsilon_{V_z})/2$), а также объединенная оценка для всех трех функций $L_P(r), L_{V_z}(r), L_W(r)$ (в этом случае итоговая невязка $\varepsilon_{P+V_z+W_z} = (\varepsilon_P + \varepsilon_{V_z} + \varepsilon_W)/3$). Для анализа помехоустойчивости получаемых оценок c_b к модельным данным $P(r, f)$ и $V_z(r, f)$ независимо на разных частотах f и дальностях r добавлялась нормально распределенная случайная шумовая помеха с нулевым средним и среднеквадратичным

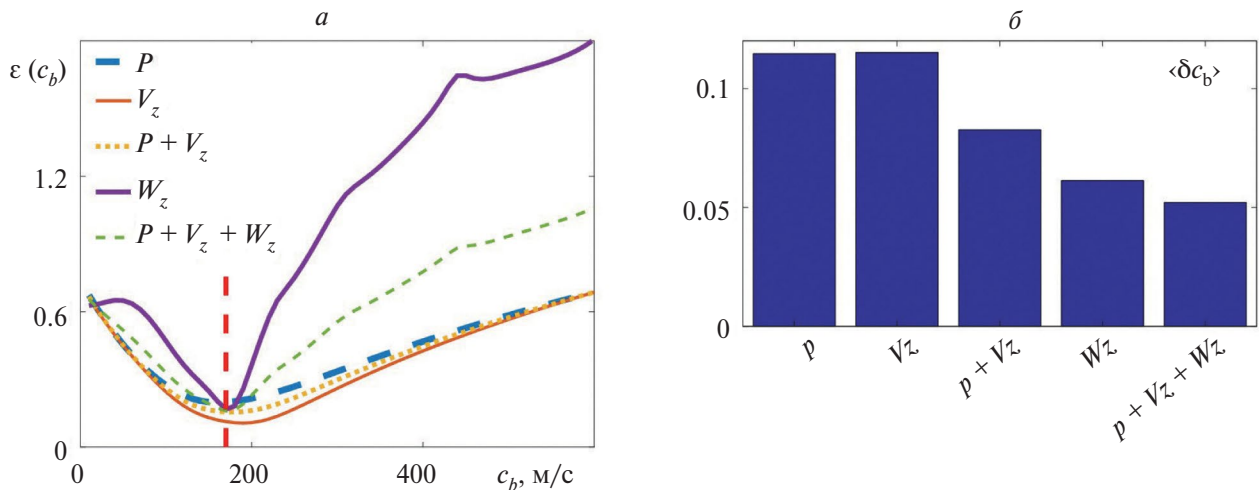


Рис. 1. Пример зависимостей $\varepsilon(c_b)$, полученных в присутствии шумов (задавался уровень шума 30%), при использовании различных комбинаций исходных данных (а); усредненные по 500 реализациям шума значения относительных отклонений $\langle \delta c_b \rangle$ восстановленных и истинных значений скорости звука в дне (б).

амплитудным отклонением, составляющим 30% от значений $P(r, f)$ и $V_z(r, f)$. В реальной ситуации отношение сигнал/помеха зависит от дальности и частотного диапазона, шумы могут быть коррелированными, то есть рассматриваемая модель шумов весьма упрощенная. Детальное рассмотрение возможных моделей шумов выходит за рамки настоящей работы. Примеры расчетов зависимостей $\varepsilon(c_b)$ при использовании различных комбинаций исходных данных представлены на рис. 1а. Как видно на рис. 1а, невязка $\varepsilon(c_b)$ имеет минимум вблизи истинного значения $c_b = 170$ м/с. Однако оценка скорости c_b^{est} , соответствующая этому минимуму, не совпадает с истинным значением c_b , причем величина этого отличия разная при использовании различных исходных данных. Наиболее точные результаты удастся получить при совместном использовании информации о пространственном затухании P , V_z , W_z . Были последовательно произведены вычисления невязок для 500 различных реализаций шума при постоянном его уровне в 30%. Усреднен-

ные по множеству реализаций шума значения не-

вязок $\langle \delta c_b \rangle \equiv \left\langle \frac{|c_b - c_b^{\text{est}}|}{c_b} \right\rangle$ представлены на рис. 1б.

Как видно на рис. 1б, минимальное значение $\langle \delta c_b \rangle$ достигается при совместном использовании информации о пространственном затухании P , V_z , W_z . При этом пространственное затухание только давления P дает ошибку оценки скорости, более чем в два раза превышающую аналогичное значение, полученное при совместном рассмотрении P ,

V_z , W_z . Второе по возрастанию значение ошибки $\langle \delta c_b \rangle$ дает способ расчета невязки с использованием вертикальной компоненты потока акустической мощности W_z . Следует отметить, что зависимость $\varepsilon(c_b)$, полученная для W_z , имеет большие градиенты вблизи минимума (рис. 1а), по сравнению с одновременным использованием P , V_z , W_z , когда минимум невязки $\varepsilon(c_b)$ оказывается более пологим. Это является преимуществом при поиске глобального минимума многомерной невязки $\varepsilon(\vec{m})$ методами типа градиентного спуска по зашумленным данным. В следующем разделе при обращении экспериментальных данных будет использоваться информация о пространственном затухании W_z .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ АКВАТОРИИ

Экспериментальные работы проводились на гидроакустическом полигоне МГУ, в акватории Клязьминского водохранилища [5, 8]. Комбинированный приемный модуль (рис. 2а) располагался в металлической рамке вблизи дна, а регистрируемые им сигналы передавались по кабелю на борт лодки, которая была заякорена вблизи места постановки (рис. 2б). Рассматривался отрезок записи, в котором присутствует сигнал от одиночного катера, проходящего мимо места постановки КПМ. Горизонтальное расстояние r между катером и КПМ определялось с помощью лазерного дальнометра. По экспериментально зарегистрированным данным $P(r, t)$, $V_z(r, t)$ рассчитывались значения $W_z(r, t)$ и вычислялся относительный уровень

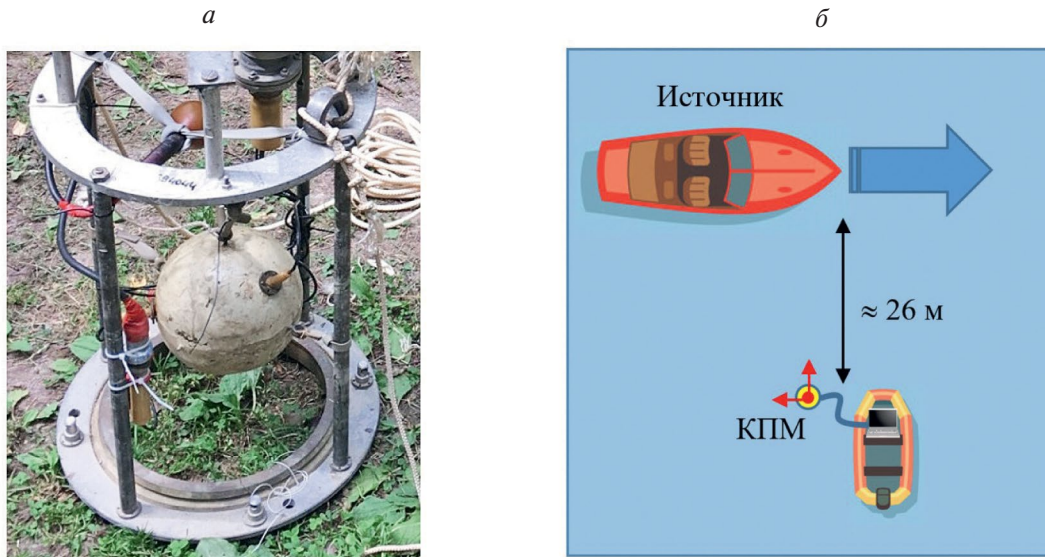


Рис. 2. Используемый в эксперименте комбинированный приемный модуль (КПМ) (а); условная схема проведенных измерений на гидроакустическом полигоне МГУ с движущимся катером (б).

$$L_{\text{obs}}(r) : L_{\text{obs}}(r) = 10 \lg \left[\frac{\langle W_z(r, t) \rangle_{\Delta t}}{\langle W_z(r_0, t) \rangle_{\Delta t_0}} \right], \text{ где } \langle \dots \rangle_{\Delta t}$$

обозначает усреднение по временному интервалу Δt , соответствующему дальности r ; r_0 — траверзное расстояние, проходимое источником за время Δt_0 .

При решении обратной задачи рассматривался следующий набор неизвестных параметров, входящих в (1): $\vec{m} = \{c_b, \rho_b, H, z_s, z_r\}$. Характеристики водного слоя полагались известными $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$, $c_0 = 1500 \text{ м/с}$; использовался частотный диапазон от 900 до 1000 Гц, в котором преобладал сигнал источника. Важным этапом решения обратной задачи является задание области поиска минимума невязки $\varepsilon(\vec{m})$, т.е. априорное задание областей определения искомых параметров c_b, ρ_b, H, z_s, z_r . Исходя из известных данных о полигоне, а также с учетом условий эксперимента были выбраны следующие интервалы значений: $c_b \in [50, 500] \text{ м/с}$, $\rho_b \in [1.1, 1.8] \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $H \in [7, 9] \text{ м}$, $z_s \in [0.1, 1] \text{ м}$, $z_r \in [7, 7.9] \text{ м}$. Для поиска минимума невязки $\varepsilon(\vec{m})$ использовался алгоритм “имитации отжига” (simulated annealing – SA) [11], зарекомендовавший себя при решении задачи геоинверсии [12]. Отличительной особенностью этого алгоритма является вероятностный характер поиска решения [11], что позволяет получать различные реализации значений параметров $\vec{m}^{\text{est}}$. В рассматриваемой работе алгоритм “имитации отжига” запускался 1000 раз при фиксированных экспериментальных данных L_{obs} . При каждом запуске достигалась сходимость итерационной процедуры алгоритма. В результате

был получен ансамбль из 1000 различных реализаций параметров $\vec{m}^{\text{est}}$, каждый из которых описывает экспериментальные данные L_{obs} с точностью не хуже 9%: $\varepsilon(\vec{m}^{\text{est}}) < 0.09$. При этом минимальное значение невязки в полученном ансамбле оказалось равным $\varepsilon_{\min} \approx 0.05$, а среднее арифметическое по ансамблю значение $\langle \varepsilon \rangle \approx 0.06$. Эта точность приближенно характеризует ошибку, с которой были оценены L_{obs} , а также говорит о неидеальности используемой модели волновода, что не позволяет описать экспериментальные данные точно. При численном моделировании использовалась программная реализация алгоритма “имитации отжига” [13], параметры которой выбирались по умолчанию. Изменения параметров алгоритма практически не влияли на значения итоговых оценок. Используя полученный набор из 1000 реализаций параметров $\vec{m}^{\text{est}}$, можно рассчитать средние

значения $\bar{x} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_k$ и средние квадратические

отклонения $\bar{\sigma}_x = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (x_k - \bar{x})^2}$, $K = 1000$ по

полученному ансамблю (здесь x обозначает c_b, ρ_b, H, z_s, z_r). Результаты этих вычислений представлены в таблице 1. Дальнейшее увеличение количества рассматриваемых реализаций $\vec{m}^{\text{est}}$ практически не влияло на значения получаемых оценок. Следует отметить, что детальное исследование статистических характеристик параметров $\vec{m}$ требует более аккуратного выбора элементов ансамбля их реализаций, что может быть выполнено алгоритмами

Таблица 1. Результаты восстановления по экспериментальным данным: средние значения $\bar{x}$ и средние квадратические отклонения $\bar{\sigma}_x$, здесь x обозначает c_b , ρ_b , H , z_s , z_r , полученные для ансамбля из 2500 реализаций искоемых параметров $\vec{m} = \{c_b, \rho_b, H, z_s, z_r\}$, а также значения $\vec{m}_{\min}^{\text{est}}$, соответствующие минимальной в рассматриваемом ансамбле невязке $\varepsilon(\vec{m}_{\min}^{\text{est}}) \approx 0.05$.

	$\bar{x}$	$\bar{\sigma}_x$	$\vec{m}_{\min}^{\text{est}}$
Скорость звука в дне, c_b , м/с	$1.5 \cdot 10^2$	$0.5 \cdot 10^2$	$1.7 \cdot 10^2$
Плотность дна, ρ_b , кг/м ³	$1.4 \cdot 10^3$	$0.2 \cdot 10^3$	$1.2 \cdot 10^3$
Толщина водного слоя, H , м	8.8	0.1	8.8
Глубина КПМ, z_r , м	7.6	0.2	7.7
Глубина источника, z_s , м	0.6	0.2	0.7

типа МСМС (Monte Carlo Markov Chain) [12], но выходит за рамки настоящей работы. Если в качестве решения обратной задачи рассматривать те параметры $\vec{m}_{\min}^{\text{est}}$, которые обеспечивают наименьшее значение невязки $\varepsilon_{\min} = \varepsilon(\vec{m}_{\min}^{\text{est}})$ в полученном ансамбле, то получаются значения, которые также представлены в таблице 1. Как видно из таблицы 1, значения $\vec{m}_{\min}^{\text{est}}$ близки к значениям $\bar{x}$ с учетом оцененных отклонений $\bar{\sigma}_x$. Восстановленные параметры волновода, представленные в таблице 1, соответствуют физически реализуемым для рассматриваемого полигона [6, 8, 10], что указывает на достоверность полученных оценок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена новая схема экспериментальной оценки параметров мелководной акватории, отличительной особенностью которой является использование в качестве исходных данных для решения обратной задачи информации о пространственном затухании различных составляющих акустического поля. При обработке экспериментальных данных использовалось затухание вертикальной компоненты потока акустической мощности. Для практической реализации удобно, что в качестве источника может рассматриваться проходящее мимо судно, а не специальный контролируемый излучатель. Однако в предложенной схеме требуется дополнительно измерять дальность r до судна-источника, что не всегда удобно в эксперименте. Локализация шумового источника может быть осуществлена независимыми методами [14], что позволит еще более упростить обсуждаемый подход. Также представляет интерес рассмотрение различных частотных диапазонов при решении обратной задачи. Увеличение объема исходных данных в этом случае может благоприятно влиять на точность и помехоустойчивость получаемых оценок. Отмеченные аспекты относятся к перспективам дальнейших

исследований. Полученные на текущем этапе исследований результаты обработки экспериментальных данных указывают на практическую реализуемость рассматриваемого подхода.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00271, <https://rscf.ru/project/23-27-00271/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончаренко Б.И., Дмитриев К.В., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 6. С. 777.
2. Vedenev A.I., Kochetov O.Yu., Lunkov A.A. et al. // J. Mar. Sci. Eng. 2023. V. 11. Art. No. 1079.
3. Рожин Ф.В., Тонаканов О.С. Общая гидроакустика. М.: МГУ, 1988. 160 с.
4. Petnikov V.G., Grigorev V.A., Lunkov A.A., Sidorov D.D. // J. Acoust. Soc. Amer. 2022. V. 151. No. 4. P. 2297.
5. Гончаренко Б.И., Веденев А.И., Медведева Е.В., Шуруп А.С. Докл. XVII школы-семина. им. акад. Л.М. Бреховских, совмещенной с XXXIII сессией Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2020. С. 85.
6. Луньков А.А., Петников В.Г., Черноусов А.Д. // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 6. С. 745; Lun'kov A.A., Petnikov V.G., Chernousov A.D. // Acoust. Phys. 2015. V. 61. No. 6. P. 707.
7. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007.
8. Медведева Е.В., Гончаренко Б.И., Шуруп А.С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 2. С. 278; Medvedeva E.V., Goncharenko B.I., Shurup A.S. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 2. P. 220.
9. Guarino A. G. L. Geoacoustic inversion techniques utilizing acoustic vector sensors and results from the Monterey bay shelf. PhD diss. Monterey, 2022.

10. Гончаренко Б.И., Захаров Л.Н. // Акуст. журн. 1974. Т. 25. № 4. С. 531.
11. Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P. // Science. 1983. V. 220. P. 671.
12. Sambridge M., Mosegaard K. et al. // Rev. Geophys. 2002. V. 40. Art No. 1009.
13. Ingber L. // Control. Cybern. 1996. V. 25. No. 1. P. 33.
14. Pereselkov S.A., Kuz'kin V.M. // J. Acoust. Soc. Amer. 2022. V. 151. No. 2. P. 666.

Estimation of gas saturated sediments parameters in shallow water using vector receiver

M. A. Ivanov^a, P. Yu. Mukhanov^a, A. S. Shurup^{a, b, c, *}

^a Department of acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

^b Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow 117218 Russia

^c The Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 123995 Russia

*e-mail: shurup@physics.msu.ru

A scheme for estimating parameters of gas-saturated sediments in shallow waters based on signals from moving noise source is proposed and tested on experimental data. Advantages of joint use of information about pressure and vertical component of particle velocity in solving the considered problem are discussed.