

Научная статья
УДК 550.834, 519.6
doi: 10.17223/19988605/73/7

Вычислительная кинематическая диагностика сред с возможностью линеаризации скорости зондирующего сигнала в условиях томографического эксперимента

Николай Владимирович Гервас¹, Сергей Михайлович Зеркаль²

^{1,2} Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

¹ nik.gervas@mail.ru

² zermal@ngs.ru

Аннотация. Рассматривается решение обратной кинематической задачи одной из основных задач теории распространения волн, постановки, сводящейся к классической компьютерной (вычислительной) томографии. Полнота томографических измерительных (проеекционных) данных обеспечивается расположением источников и приемников зондирующего сигнала на окружности, лежащих в плоскости $Z = 0$ евклидова пространства XYZ . Математически такая постановка является «слабо-некорректной» (по отечественной классификации для задач математической физики), что делает решение однозначным и повышает достоверность интерпретации. Излагаются постановка задачи, построение решения и вычислительный алгоритм, а также результаты численного компьютерного моделирования. Применительно к сейсмоакустическим исследованиям определяются возможности и перспективы использования полученных результатов.

Ключевые слова: вычислительный алгоритм; обратная задача; рефрагированные волны; кинематическая диагностика; компьютерная томография.

Для цитирования: Гервас Н.В., Зеркаль С.М. Вычислительная кинематическая диагностика сред с возможностью линеаризации скорости зондирующего сигнала в условиях томографического эксперимента // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2025. № 73. С. 58–64. doi: 10.17223/19988605/73/7

Original article
doi: 10.17223/19988605/73/7

Computational kinematic diagnostics of media with the possibility of linearizing the probing signal velocity in the context of a tomographic experiment

Nikolai V. Gervas¹, Sergey M. Zerkal²

^{1,2} Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

¹ nik.gervas@mail.ru

² zermal@ngs.ru

Abstract. The paper addresses the inverse kinematic problem, which is one of the primary problems of the "Theory of Wave Propagation", formulated in a manner that reduces it to classical computational tomography. The completeness of tomographic (projection) data is ensured by positioning the sources and receivers of the probing signal on a circle lying in the plane $Z = 0$ of the Euclidean space $(X Y Z)$. Mathematically, this formulation is classified as "weakly ill-posed" (according to the domestic classification of mathematical physics problems), which makes the solution unique and enhances the reliability of the interpretation. The paper presents the problem statement, the construction of the solution, the computational algorithm, and the results of numerical simulations. In the context of seismic-acoustic studies, the possibilities and prospects of applying the obtained results are discussed.

Keywords: computational algorithm; inverse problem; refracted waves; kinematic diagnostics; computed tomography.

For citation: Gervas, N.V., Zerkal, S.M. (2025) Computational kinematic diagnostics of media with the possibility of linearizing the probing signal velocity in the context of a tomographic experiment. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 73. pp. 58–64. doi: 10.17223/19988605/73/7

Введение

Обратная кинематическая задача (ОКЗ) представляет собой достаточно крупную научную проблему, имеющую математическую основу как задача математической физики, теории распространения волн. В своей численной реализации она относится к вычислительной диагностике. ОКЗ имеет высокое прикладное значение, возникает в основном в условиях оптики, акустики, сейсмологии как задача кинематической диагностики среды распространения соответствующих рефрагированных волн [1–4]. Впервые эта задача была рассмотрена в 1906–1907 гг. Г. Герглотцем и Э. Вихертом, и в последующее время интерес научной общественности к ней только возрастал [5]. К настоящему времени достижения информатики и искусственного интеллекта (ИИ) открывают обширную перспективу для преодоления трудностей, присущих решению ОКЗ.

Геофизические методы, направленные на исследование структуры земных недр, обычно предполагают создание «изображения» изучаемой среды на основе интерпретации полученных данных. Достижение высокой точности в этом процессе невозможно без применения специализированных компьютерных систем, спроектированных с использованием математического моделирования их ключевых элементов и поддерживаемых математическим обеспечением, основанным на разработке соответствующих алгоритмов для решения поставленных задач. Таким образом, геофизика тесно связана с относительно новой областью знаний – вычислительной диагностикой [6], где ключевые понятия включают «вычислительные технологии» и «информационно-вычислительные технологии». Под вычислительной диагностикой понимается совокупность методов и инструментов, направленных на изучение характеристик объектов исследования на основе обработки косвенной информации с использованием вычислительных средств. В отличие от традиционных методов, вычислительная диагностика оперирует огромными объемами информации об исследуемом объекте, которые обрабатываются с применением эффективных алгоритмов на высокопроизводительных вычислительных системах.

Примером применения вычислительной диагностики являются вычислительная томография и ее специализированный вариант – сейсмическая томография, где ключевую роль в исследованиях играет решение обратной кинематической задачи [7, 8].

Технология кинематической диагностики земных недр, связанная с определением скоростного распределения сейсмической волны по географу, начала развиваться с работ немецкого физика Э. Вихерта. Важно отметить, что на практике при выполнении измерений кинематическая информация является наиболее точной в сравнении, например, с динамической [9]. Данное исследование сосредоточено на совершенствовании теоретических основ, позволяющих предложить новые модификации методов диагностических исследований, основанных на теории распространения волн. При этом учитывается необходимость сочетания теоретических разработок с экспериментальной верификацией физических моделей, применимых к задачам сейсмологии [6–9].

1. Постановка задачи и построение решения

Рассмотрим полупространство $Z \geq 0$ в трехмерном пространстве R^3 , заполненное средой с показателем преломления $n(x, y, z) = V^{-1}(x, y, z)$, где $V(x, y, z)$ представляет собой скорость распространения колебаний в среде. Пусть в точке $S_0 = (x_0, y_0, 0)$ генерируется сигнал, а в точке $S_1 = (x_1, y_1, 0)$ фиксируется время прихода рефрагированной волны – $T(S_0, S_1)$. Обратная кинематическая задача состоит в восстановлении функции $V(x, y, z)$ по известной функции $T(S_0, S_1)$. В общем случае эта задача является переопределенной: по функции четырех переменных $T(x_0, y_0, x_1, y_1)$ требуется определить функцию трех переменных $V(x, y, z)$. Исследования по переопределенной постановке обратной кинематической задачи были проведены В.Г. Романовым и Р.Г. Мухометовым [5].

Организация системы наблюдений в форме окружности радиуса r позволяет устранить переопределенность задачи, поскольку функция T теперь зависит от радиуса r и двух углов φ_1, φ_2 (в полярных координатах), указывающих на источник и приемник соответственно. Предполагается, что исследуемая среда является регулярной, т.е. изменения скорости в ней таковы, что каждой паре точек источник–приемник (S_0 и S_1) соответствует одна геодезическая линия (луч) $\Gamma(S_0, S_1)$. Важным условием также является то, что скорость $V(x, y, z)$ представима в виде $V(x, y, z) = V_0(z) + V_1(x, y, z)$, $V_0 = A + Bz$, $V_0 \gg |V_1|$. Соотношение коэффициентов A и B выбрано так, чтобы обеспечивать достаточную глубину проникновения луча для заданной базы наблюдения (расстояние между источником и приемником). Функция $V_0(z)$ считается известной, а коэффициенты A и B заданы; подлежит определению функция $V_1(x, y, z)$.

В дальнейших рассуждениях используется метод линеаризации обратной кинематической задачи для многомерных сред, который последовательно применяется начиная с работ В.Г. Романова [5]. Это позволяет прийти к формуле, являющейся следствием применения линеаризации к функционалу Ферма [10], который связывает кинематические характеристики распространения сигнала:

$$T_1(S_0, S_1) = \int_{\Gamma_0(S_0, S_1)} n_1 dS, \quad (1)$$

где $T_1 = T - T_0$; $n_1 = V^{-1} - V_0^{-1}$; $\Gamma_0(S_0, S_1)$ – геодезическая линия для среды со скоростным распределением V_0 . Поскольку значения T считаются известными (как результат решения прямой задачи, а в практическом применении это вектор измерений), значения T_0 для $V_0 = A + Bz$ можно вычислить явно, что упрощает вычисление требуемых значений T_1 . На этом этапе задача сводится к определению функции n_1 по функции T_1 с использованием интегрального уравнения (1).

Применение системы наблюдений в форме окружности не только устраняет переопределенность задачи, но и задает томографическую постановку для исследуемой задачи. Лучи Γ_0 , «натянутые» на окружность системы наблюдений, формируют поверхность шарового сегмента. Изменяя радиус r , можно получить систему вложенных шаровых сегментов, которые заполняют объем исследуемой области в пространстве R^3 . Определяя n_1 на поверхности таких сегментов, получаем решение трехмерной задачи. Следует отметить, что послойный подход к изучению объекта и методика сбора проекционных данных делают эту задачу сопоставимой с классическими задачами томографии [1].

Пусть функция $T_1(S_0, S_1)$ известна и выполняется равенство (1), где $n_1(x, z) = 1/V(x, z) - 1/V_0(z)$, $x \in R^2$. Точки S_0 и S_1 располагаются на окружности $x_1^2 + x_2^2 = r^2$ ($x_1 \equiv x, x_2 \equiv y$). Лучевая траектория $\Gamma_0(S_0, S_1)$ определяется из системы уравнений

$$\begin{cases} |x|^2 + \left(z + \frac{A}{B}\right)^2 = \rho^2, \\ p = const, \rho = const, \rho > 0, \\ \langle x, v \rangle - p = 0, v = (\sin\theta, \cos\theta). \end{cases} \quad (2)$$

Последние два уравнения описывают плоскость Q , перпендикулярную к плоскости $Z = 0$ (координатная плоскость x_1, x_2) и пересекающую плоскость по прямой $l(S_0, S_1)$. Геометрический смысл величин p, ρ и θ показан на рис. 1.

Перейдем в выражении (1) от интегрирования по $\Gamma_0(S_0, S_1)$ к интегрированию вдоль $l(S_0, S_1)$. Обозначим

$$z = -\frac{A}{B} \pm \sqrt{\rho^2 - |x|^2} = z^*(x). \quad (3)$$

Будем рассматривать случай $z \geq 0$, тогда перед корнем следует выбрать знак «+». В операторном виде решение задачи дается следующей формулой обращения:

$$n_1(x_1, x_2, z^*) = \left(z^* + \frac{A}{B}\right) R^{-1} f(p, \theta), \quad (4)$$

где R^{-1} – оператор обратного преобразования Радона. Определяя искомую функцию n_1 по формуле обращения (4) в круге $x_1^2 + x_2^2 \leq r^2$, тем самым определяем n_1 на поверхности шарового сегмента, образованного лучами Γ_0 , опирающимися на окружность системы наблюдений [7].

Вывод формулы (4) делает возможным использование численных методов обращения преобразования Радона для решения обратной кинематической задачи. Данная техника, хорошо разработанная для решения других научных задач [6], значительно упрощает работу с данной формулой.

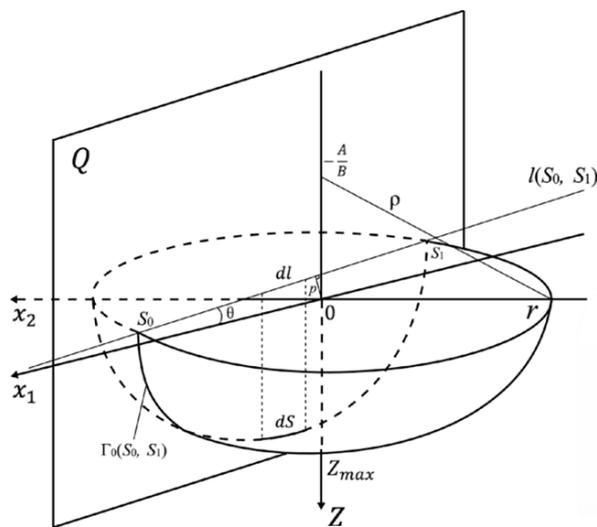


Рис. 1. Иллюстрация геометрических условий линейризованной постановки обратной задачи
 Fig. 1. Illustration of geometric conditions of the linearized formulation of the inverse problem

В результате полного сбора данных формируется проекционная матрица, столбцы которой представляют различные проекции. Таким образом, проекционная матрица имеет размерность $(N \times M)$, где N – количество строк, а M – количество столбцов (элементов в каждой строке). Особенностью данного подхода является то, что первый и последний элементы каждой проекции равны нулю, поскольку в этих случаях источник и приемник совпадают (см. рис. 1). Следовательно, фактически требуется на две пары источник–приемник меньше. В проекционной матрице нулевыми будут первая и последняя строки. Таким образом, формируются проекционные данные $f_{ij} = (p_i, \theta_j)$, $i = 1, N, j = 1, M$, подаваемые на вход программного модуля для решения обратной задачи.

Для решения обратной задачи был применен алгебраический подход, известный в томографии как алгебраическая реконструкция, который реализуется после предварительной алгебраизации преобразования Радона, как указано в формуле (4) [3]. В соответствии с этим подходом были проведены численные эксперименты для восстановления локальной неоднородности скорости в трехмерном пространстве.

Моделировалась локальная неоднородность скорости $V_a(x, y, z) = W \exp(-w_x(x - X_a)^2 - w_y(y - Y_a)^2 - w_z(z - Z_a)^2)$, включенная в среду с линейным законом изменения скорости с глубиной $V = A(1 + \alpha z)$. Здесь $w_x = 3$, $w_y = 3$, $w_z = 20$, $X_a = 0$, $Y_a = 0$, $Z_a = 0,1$, $\alpha = 0,5 \text{ км}^{-1}$, $A = 1 \text{ км/с}$. Система наблюдения представляет собой набор концентрических окружностей с радиусами от 250 до 1 250 м с шагом 250 м. В системе используется 20 источников и приемников, а также 8 проекций. Сетка восстановления имеет размер 20×20 для всех радиусов исследования. Значения восстанавливаемой скорости привязываются к координате погружения луча по глубине в условиях отсутствия неоднородности.

Восстановленная функция локальной неоднородности в проекции на плоскость XU представлена на рис. 2, а, в то время как точные значения скорости на поверхности, составленной лучами при отсутствии неоднородности, показаны на рис. 2, б. Оси координат x и y выполнены в одном масштабе. Пример иллюстрирует случай для радиуса $r = 750 \text{ м}$.

На рис. 3 представлен разрез восстановленной трехмерной аномалии скорости по линии $y = 0$. Глубина z отображается по вертикальной оси, а координата x – по горизонтальной оси. В табл. 1 представлена зависимость скорости зондирующего сигнала от номера изолинии. Точность восстановления можно оценить с помощью среднеквадратичной нормы отклонения Q , которая измеряет различие между найденным решением и известным точным значением (5):

$$Q = \sqrt{\frac{\sum_{i,j} [n_{1r}(x_{1i}, x_{2j}, z^*) - n_{1e}(x_{1i}, x_{2j}, z^*)]^2}{\sum_{i,j} n_{1e}^2(x_{1i}, x_{2j}, z^*)}}, \quad (5)$$

где $z^* = z^*(x_{1i}, x_{2j})$, (i и j – текущие параметры сетки, в узлах которой вычисляются значения n_{1r}).

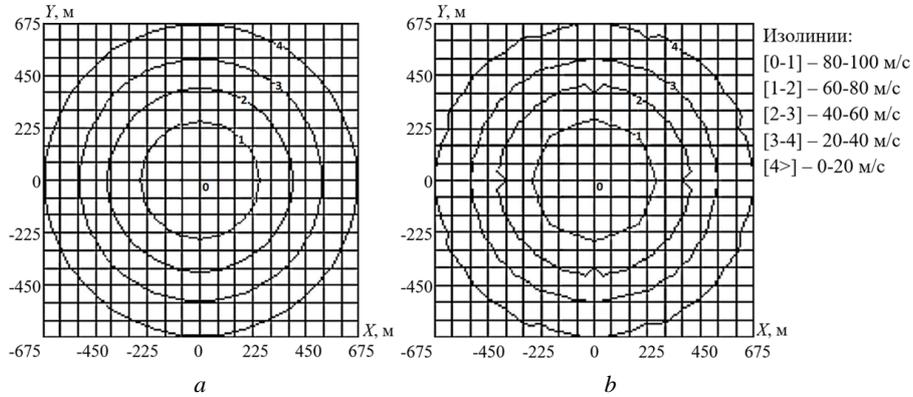


Рис. 2. Восстановленная функция локальной неоднородности в проекции на плоскость XY (a); точные значения скорости на поверхности, составленной лучами при отсутствии неоднородности (b)

Fig. 2. The reconstructed function of local inhomogeneity in projection onto the XY plane – a ; the exact values of velocity on the surface composed of rays in the absence of inhomogeneity – b

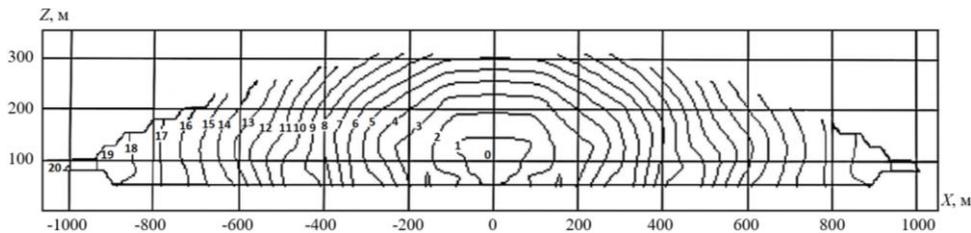


Рис. 3. Разрез восстановленной трехмерной аномалии скорости по линии $y = 0$
Fig. 3. Cross-section of restored three-dimensional speed anomaly along the line $y = 0$

Таблица 1

Зависимость скорости зондирующего сигнала от номера изолинии

Изолинии	0–2	2–4	4–6	6–8	8–10	10–12	12–14	14–16	16–18	18–20
Скорость, м/с	90–100	80–90	70–80	60–70	50–60	40–50	30–40	20–30	10–20	0–10

График зависимости Q от радиуса окружности представлен на рис. 4.

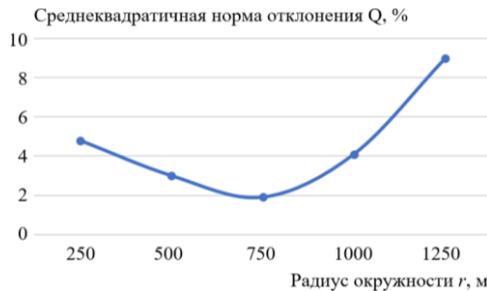


Рис. 4. Зависимость среднеквадратичной нормы отклонения Q от радиуса окружности
Fig. 4. Dependence of the root mean square deviation Q on the radius of the circle

Резкие отклонения при малых и больших радиусах объясняются изменением траектории луча. Моделируемая приповерхностная неоднородность с повышенной скоростью приводит к концентрации лучей в области экстремума, в то время как точное решение вычисляется в точках пространства, свободных от неоднородностей.

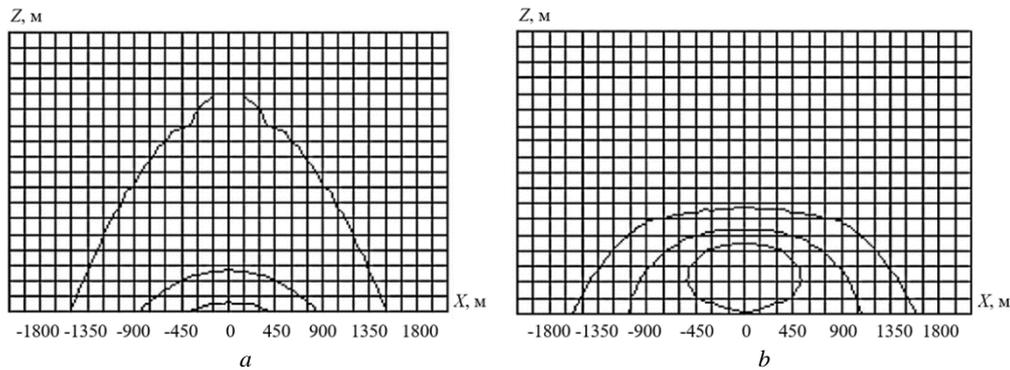


Рис. 5. Относительная насыщенность лучами сетки восстановления, рассчитанная для случая профильных наблюдений при отсутствии неоднородности (а) и при наличии неоднородности (b)
 Fig. 5. Relative saturation of the recovery grid rays, calculated for the case of profile observations in the absence of inhomogeneity a) and in the presence of inhomogeneity b)

На рис. 5, а представлена картина относительной насыщенности лучами сетки восстановления, рассчитанная для случая профильных наблюдений при отсутствии неоднородности, а на рис. 5, б – при наличии неоднородности. По горизонтальной оси отображаются координаты профиля, а по вертикальной – координаты глубины сетки разбиения.

Заключение

Излагаемое решение ОКЗ обеспечивается наличием априорной информации об исследуемом объекте, т.е. о скоростном распределении акустического или сейсмического сигнала. Вывод формулы обращения для функционала Ферма требует знания «пути» выполнения интегрирования, эта информация объективно отсутствует в результате измерения времен прихода рефрагированных волн. Очевидно, что отмеченная информация служит основой для алгебраизации функционала Ферма и сведения решения ОКЗ к решению СЛАУ той или иной степени сложности. Таким образом, следует сделать вывод о доминирующем характере используемой априорной информации, что в терминах ИИ определяет разработанный метод решения ОКЗ как «сильный» метод. Естественно, что алгоритмическое обеспечение открыто для потребления дополнительной информации, в том числе возникающей при реализации итерационного подхода, а именно когда выполняется уточнение, «улучшение» выбора V_0 . То есть происходит организация последовательности V_1^i , где i – номер итерации, выполняющей полный цикл решения ОКЗ, построение $V_0^{i+1} = V_0^i + V_1^i$, численное решение прямой кинематической задачи, т.е. вычисление значений T_0^{i+1} и численное построение лучей Γ_0^{i+1} . Алгоритмическое обеспечение этой методики и его программная реализация составляют перспективу дальнейшей разработки данного подхода к решению ОКЗ.

Следует сказать, что в целом алгебраическая реконструкция [11] позволяет решать задачи с нарушением полноты проекционных данных, делающим невозможным использование формул обращения. Сказанное является актуальным для задач сейсмической диагностики сред, содержащих непрозрачные включения для зондирующего сигнала, в том числе имеющие геометрически избирательную чувствительность к этому излучению [12].

Список источников

1. Папкова Ю.И. Звуковое поле в морском волноводе с неоднородной скоростью звука по глубине и трассе // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2021. № 3. С. 27–35.
2. Греков А.Н., Греков Н.А., Сычев Е.Н. Среднечастотные акустические методы и средства для исследования водной среды. Севастополь : Ин-т природно-технических систем, 2020. 126 с.
3. Микушин И.И. Метрологическое обеспечение измерений скорости звука в воде. СПб. : Изд-во СПбГЭТУ, 2023. 205 с.
4. Добринский В.И., Лаврентьев М.М. Способ определения профиля скорости звука по записи акустического поля в одной точке // Тезисы докладов второй Дальневосточной акустической конференции «Человек и океан». Владивосток : ДВПИ, 1978. С. 12–14.
5. Лаврентьев М.М., Романов В.Г., Шишатский С.П. Некорректные задачи математической физики и анализа. М. : Наука, 1980. 286 с.

6. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я., Тимонов А.А. Математические задачи компьютерной томографии. М. : Наука, 1987. 159 с.
7. Гервас Н.В., Зеркаль С.М. Вычислительная кинематическая диагностика скорости зондирующего сигнала с использованием априорной информации об исследуемой среде // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 69. С. 54–63. doi: 10.17223/19988605/69/6
8. Нолет Г., Чепмен К., Слуйс А. Сейсмическая томография. М. : Мир, 1990. 416 с.
9. Пузырев Н.Н. Метод и объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. 301 с.
10. Смирнов В.И. Курс высшей математики. М. : Наука. 1974. Т. 4, ч. 1. 336 с.
11. Бронников А.В., Воскобойников Ю.Е. Комбинированные алгоритмы нелинейной фильтрации защищенных сигналов и изображений // Автометрия. 1990. № 1. С. 55–66.
12. Peshkov A.V., Zerkal S.M. Computational-heuristic algorithm for tomographic solution of industrial flaw detection problems // Proceedings 16 Int. Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE–2023). Novosibirsk, 10–12 Nov. 2023. P. 910–915. doi: 10.1109/APEIE59731.2023.10347879

References

1. Papkova, Yu.I. (2021) Zvukovoe pole v morskoy volnovode s neodnorodnoy skorost'yu zvuka po glubine i trasse [Sound Field in a Marine Waveguide with Inhomogeneous Sound Speed Along Depth and Path]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 3. Fizika. Astronomiya*. 3. pp. 27–35.
2. Grekov, A.N., Grekov, N.A. & Sychev, E.N. (2020) *Srednechastotnye akusticheskie metody i sredstva dlya issledovaniya vodnoy sredy* [Mid-frequency Acoustic Methods and Means for Studying the Aquatic Environment]. Sevastopol: In-t prirodno-tekhnicheskikh sistem.
3. Mikushin, I.I. (2023) *Metrologicheskoe obespechenie izmereniy skorosti zvuka v vode* [Metrological Support for Measurements of Sound Speed in Water]. St. Petersburg: SPbGETU.
4. Dobrinskiy, V.I. & Lavrentiev, M.M. (1978) Sposob opredeleniya profilya skorosti zvuka po zapisi akusticheskogo polya v odnoy tochke [Method for Determining Sound Speed Profile from Acoustic Field Recording at a Single Point]. *Chelovek i okean* [Human and Ocean]. Proc. of the Conference. Vladivostok: DVPI. pp. 12–14.
5. Lavrentiev, M.M., Romanov, V.G. & Shishatskiy, S.P. (1980) *Nekorrektnye zadachi matematicheskoy fiziki i analiza* [Ill-posed Problems of Mathematical Physics and Analysis]. Moscow: Nauka.
6. Tikhonov, A.N., Arsenin, V.Ya., Timonov, A.A. (1987) *Matematicheskiye zadachi komp'yuternoy tomografii* [Mathematical Problems of Computer Tomography]. Moscow: Nauka.
7. Gervas, N.V. & Zerkal, S.M. (2024) Computational kinematic diagnostics of the probing signal speed using a priori information about the medium under study. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie vychislitel'naya tekhnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 69. pp. 54–63. doi: 10.17223/19988605/69/6
8. Nolet, G., Chapman, K. & Sluis, A. (1990) *Seysmicheskaya tomografiya* [Seismic Tomography]. Translated from English. Moscow: Mir.
9. Puzyrev, N.N. (1997) *Metod i ob'ekty seysmicheskikh issledovaniy. Vvedenie v obshchuyu seysmologiyu* [Method and Objects of Seismic Research. Introduction to General Seismology]. Novosibirsk: SB RAS.
10. Smirnov, V.I. (1974) *Kurs vysshey matematiki* [Course of Higher Mathematics]. Vol. 4(1). Moscow: Nauka.
11. Bronnikov, A.V. & Voskoboynikov, Yu.E. (1990) Kombinirovannyye algoritmy nelineynoy fil'tratsii zashchishchennykh signalov i izobrazheniy [Combined Algorithms for Nonlinear Filtering of Protected Signals and Images]. *Avtometriya*. 1. pp. 55–66.
12. Peshkov, A.V. & Zerkal, S.M. (2023) Computational-heuristic algorithm for tomographic solution of industrial flaw detection problems. In: *Proceedings of the 16th International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE–2023)*. Novosibirsk, November 10–12, 2023. pp. 910–915. doi: 10.1109/APEIE59731.2023.10347879

Информация об авторах:

Гервас Николай Владимирович – аспирант кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета (Новосибирск, Россия). E-mail: nik.gervas@mail.ru

Зеркаль Сергей Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета (Новосибирск, Россия). E-mail: zerkal@ngs.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Gervas Nikolai V. (Post-Graduate Student, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: nik.gervas@mail.ru

Zerkal Sergey M. (Doctor of Technical Sciences, Professor, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: zerkal@ngs.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию 28.04.2025; принята к публикации 02.12.2025

Received 28.04.2025; accepted for publication 02.12.2025