

DOI [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.19\(1\)-6](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.19(1)-6)

EDN <https://elibrary.ru/rjcvet>

УДК 551.466.8:519.237



© Т. К. Шарафутдинова^{1*}, А. М. Астапкович², Е. И. Свергун^{1,3}, А. В. Зимин^{1,4}, 2026

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36

²ГК «ГЕОСКАН», 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 22, литер Л

³Российский государственный гидрометеорологический университет, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79

⁴Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9

*sharafutdinova.taya@yandex.ru

Определение характеристик короткопериодных внутренних волн методом взаимно корреляционной обработки

Статья поступила в редакцию 31.10.2025, после доработки 16.02.2026, принята в печать 25.02.2026

Аннотация

В работе предложен подход для автоматической оценки параметров короткопериодных внутренних волн, использующий сочетание корреляционной обработки и численных методов. Рассмотрено применение метода взаимно корреляционной обработки для определения задержки распространения короткопериодных внутренних волн между буями, описано применение численных методов для оценки направления распространения короткопериодных внутренних волн. Выполнена оценка чувствительности метода взаимно корреляционной обработки к шуму с использованием имитационного моделирования, показавшая, что данный метод обеспечивает оценку задержки распространения с точностью не хуже 10 % для отношения сигнал/шум не ниже 1,75. Описано два варианта численного решения задачи определения направления распространения короткопериодных внутренних волн. Подход протестирован при обработке данных натурных измерений, полученных с дрейфующих термопрофилирующих буйев. Произведено сравнение результатов оценки параметров скорости и направления распространения короткопериодных внутренних волн, полученных аналитическим методом, численным методом и методом сжимающихся интервалов, показавшее их хорошую сходимость. Отмечено, что описанный подход перспективен для внедрения в системы мониторинга, работающие в режиме реального времени.

Ключевые слова: короткопериодные внутренние волны, обработка сигналов полигонных измерений, корреляционная обработка, методика определения скорости и направления, мониторинг в реальном времени

© Т. К. Sharafutdinova^{1*}, А. М. Astapkovich², Е. И. Svergun^{1,3}, А. В. Zimin^{1,4}, 2026

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia

²GEOSCAN Ltd, 22, letter L Politechnicheskaya Str., St. Petersburg, Russia

³Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaya Str., St. Petersburg, 192007, Russia

⁴St. Petersburg State University, 7–9 Universitetskaya Emb., St. Petersburg, 199034, Russia

*sharafutdinova.taya@yandex.ru

Determination of characteristics of short-period internal waves by the cross-correlation method

Received 31.10.2025, Revised 16.02.2026, Accepted 25.02.2026

Abstract

The paper proposes an approach for automatic estimation of the parameters of short-period internal waves using a combination of correlation processing and numerical methods. The application of the method of cross-correlation processing to determine the propagation delay of short-period internal waves is considered, and the application of numerical methods to estimate the

Ссылка для цитирования: Шарафутдинова Т.К., Астапкович А.М., Свергун Е.И., Зимин А.В. Определение характеристик короткопериодных внутренних волн методом взаимно корреляционной обработки // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2026. Т. 19, № 1. С. 71–86. EDN RJCET. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.19\(1\)-6](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.19(1)-6)

For citation: Sharafutdinova T.K., Astapkovich A.M., Svergun E.I., Zimin A.V. Determination of characteristics of short-period internal waves by the cross-correlation method. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2026;19(1):71–86.

[https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.19\(1\)-6](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.19(1)-6)

direction of propagation of short-period internal waves is described. The sensitivity of the cross-correlation processing method to noise was evaluated using simulation modeling, which showed that this method provides an estimate of the propagation delay with an accuracy of at least 10 % for a signal-to-noise ratio of at least 1.75. Two variants of the numerical solution of the problem of determining the direction of propagation of short-period internal waves are described. The approach has been tested by processing in situ data obtained from drifting thermal profiling buoys. The results of estimating the parameters of the velocity and direction of propagation of short-period internal waves obtained by the analytical method, the numerical method and the method of compressible intervals have been compared, which showed their good convergence. It is noted that the described approach is promising for implementation in real-time monitoring systems.

Keywords: short-period internal waves, signal processing of polygon measurements, correlation processing, methods for determining velocity and direction, real-time monitoring

1. Введение

Короткопериодные внутренние волны (КВВ) являются важным компонентом локальной динамики океана, оказывающим значительное влияние на вертикальный и горизонтальный перенос энергии и вещества. Эти волны с типичными периодами колебаний от десятков секунд до сотен минут тесно связаны с процессами турбулентного перемешивания и формированием мелкомасштабной структуры плотности, что критически важно для понимания обмена тепла, солёности и биогенных элементов. Несмотря на их значимую роль в обменных процессах, количественное определение характеристик КВВ остается затруднительным ввиду высокой пространственной и временной изменчивости, а также наличия шумовых составляющих в измерительных данных.

Создание новых автономных систем регистрации и оценки характеристик КВВ устойчивых к шумам и обладающих возможностью автоматической обработки данных измерений в режиме реального времени является актуальной задачей. Такая система должна обеспечивать возможность обнаружения наличия КВВ и оценки их характеристик.

В предлагаемом подходе для оценки характеристик КВВ используется сочетание корреляционной обработки и численных методов. Метод взаимно корреляционных функций применяется для определения временной задержки между сигналами с разнесенных буюв, что обеспечивает возможность оценки скорости распространения КВВ, а численные методы позволяют оценить направление распространения фронта волны. Такой вариант удобнее и надежнее традиционных аналитических решений: он не требует дополнительных условий для учета знаков углов, проще реализуется в алгоритмах и устойчивее к шумам и неполным данным. Существуют также подходы, где задержка определяется при помощи вычисления скользящей дисперсии или аналогичных статистических методов [1], но они менее надежны для реализации в автоматизированных системах мониторинга. В отличие от существующих работ, где корреляционный анализ используется исключительно в режиме пост-обработки [2–7], предложенная схема ориентирована на применение в системах реального времени. Она сочетает простоту вычислений с гибкостью численных методов и обеспечивает возможность оперативного мониторинга внутренних волн. Дополнительным преимуществом является простота реализации на встраиваемых платформах: вычисление взаимно корреляционных функций эффективно ускоряется за счет применения быстрого преобразования Фурье (БПФ), а этап численного решения сводится к решению системы уравнений, что занимает лишь несколько операций. Такой алгоритм легко исполним даже на дешевых микроконтроллерах или на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС), обеспечивая возможность работы в режиме реального времени.

Практические сценарии применения включают использование системы интеллектуального анализа данных в составе группировки термопрофилирующих буюв, которые могут выполнять обработку данных локально и передавать только результаты вычислений — направление и скорость распространения КВВ. Это снижает нагрузку на каналы связи и энергопотребление. В прибрежных системах мониторинга подобные алгоритмы могут работать на встраиваемых платформах в режиме постоянного контроля, формируя предупреждения о появлении внутренних волн и обеспечивая оценку их характеристик аналогично [8]. В сравнении с традиционными методами, требующими аналитических решений или использующими статистические критерии с ограниченной применимостью, предложенная связка корреляционного анализа и численных подходов обеспечивает баланс между вычислительной простотой, устойчивостью и возможностью внедрения в системы реального времени.

Методика обработки измерений в режиме реального времени состоит из двух ключевых этапов: определение факта наличия пакета КВВ по измерениям; оценка длительности пакета КВВ, скорости и направления распространения КВВ с использованием известных данных о местоположении буюв и периода сбора

данных. Целью работы является разработка методики решения второй из этих задач с использованием метода взаимно корреляционных функций. Особое внимание уделено оценке устойчивости метода при наличии шумов и искажений.

2. Модель плоской волны для системы трех буйев

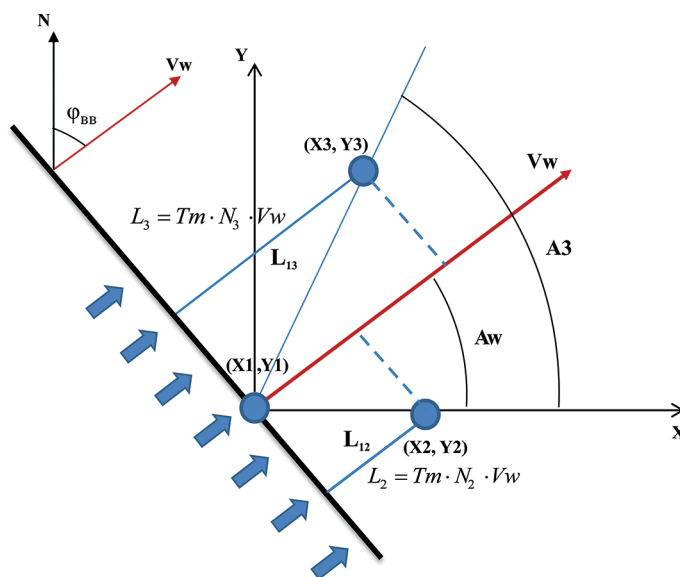
Для оценки скорости и направления параметров используется модель, которую для определенности будем называть «плоская волна» в локальной системе координат. Предполагается, что волна распространяется в виде плоского фронта. При этом форма волны: постоянна по фронту распространения; имеет ограниченную длительность по направлению распространения; протяженность фронта волны существенно больше, чем максимальное расстояние между любыми двумя буйами.

Применимость модели плоской волны определяется соотношением характерных пространственных масштабов. Длина волны КВВ составляет порядка сотен метров, а протяженность их фронта, согласно спутниковым данным, обобщенным за десятилетний период [9], достигает в среднем десятков километров. Расстояния между буйами в рассматриваемой системе также не превышают сотен метров [1]. Таким образом, измерительная база оказывается сопоставима с длиной волны, но на два порядка меньше протяженности фронта, что позволяет аппроксимировать локальный участок фронта плоскостью в пределах измерительной базы. Вместе с тем, при увеличении базы измерений или существенной кривизне фронта отклонения от данного приближения могут становиться значимыми. Расчетная схема для определения скорости и направления волны приведена на рис. 1. Расчетная схема использует локальную систему координат. Положение буйев в этой системе образует треугольник, стороны которого сопоставимы с длиной регистрируемых волн. При этом, точность оценки параметров КВВ существенно снижается при вырожденном взаимном расположении буйев: они находятся почти на одной прямой, два буйа расположены рядом или один существенно удален от двух других. Такая геометрия нарушает соразмерность измерительной базы и, как следствие, определяет плохую обусловленность обратной задачи и снижает достоверность оценок скорости и направления распространения КВВ.

Нумерация буйев в схеме выполняется в порядке регистрации ими фронта волны: первый номер присваивается бую, к которому волна приходит раньше остальных. Под фронтом волны понимается граница волнового пакета, фиксируемая по характерному возмущению глубины залегания изотермы в области слоя скачка. Пример процедуры обнаружения таких событий представлен в [1]. Предполагается, что измерения на каждом бую проводятся синхронизировано с одинаковым шагом дискретизации по времени Tm . На каждом временном шаге производится обработка результатов измерений с целью определения факта прихода фронта волны. Начало системы координат привязано к бую Б1, на котором раньше других зафиксирован фронт волны. В локальной системе координат этот буй используется в качестве центра локальной системы координат.

Рис. 1. Расчетная схема для системы трех буйев: $(X1, Y1)$ — координаты бую № 1; $(X2, Y2)$ — координаты бую № 2; $(X3, Y3)$ — координаты бую № 3; L_{12} — расстояние между буйами № 1 и № 2; L_{13} — расстояние между буйами № 1 и № 3; L_2 — расстояние, которое проходит фронт волны распространяясь от бую № 1 к бую № 2; L_3 — расстояние, которое проходит фронт волны распространяясь от бую № 1 к бую № 3; V_w — скорость волны; A_w — угол между перпендикуляром к фронту волны и осью X; A_3 — угол между буйами № 2 и № 3; Tm — интервал дискретизации измерений

Fig. 1. Calculation scheme for a system of three buoys: $(X1, Y1)$ — coordinates of buoy No. 1; $(X2, Y2)$ — coordinates of buoy No. 2; $(X3, Y3)$ — coordinates of buoy No. 3; L_{12} — distance between buoys No. 1 and No. 2; L_{13} — distance between buoys No. 1 and No. 3; L_2 is the distance that the wave front passes through propagating from buoy No. 1 to buoy No. 2; L_3 is the distance that the wave front passes through propagating from buoy No. 1 to buoy No. 3; V_w is the wave velocity; A_w is the angle between the perpendicular to the wave front and the X axis; A_3 is the angle between buoys No. 2 and No. 3; Tm — sampling interval of measurements



Ось X проходит через буй Б2. Это тот буй, к которому фронт волны приходит вторым. Для определения скорости и направления используются геометрические параметры расчетной схемы: L_{12} , L_{13} , L_2 , L_3 , $A3$.

При этом расстояния L_{12} , L_{13} и угол $A3$ определяются из текущих координат буюв в локальной системе координат. Угол $A3$ рассчитывается с использованием скалярного произведения векторов $(X3, Y3)$ и $(X2, Y2)$:

$$A3 = \arccos \left(\frac{X3 \cdot X2 + Y3 \cdot Y2}{\left((X3^2 + Y3^2)^{1/2} \cdot (X2^2 + Y2^2)^{1/2} \right)} \right). \quad (1)$$

С учетом того, что $Y2 = 0$ получаем:

$$\text{abs}(A3) = \arccos \left(\frac{X3}{\left((X3^2 + Y3^2)^{1/2} \right)} \right). \quad (2)$$

Скалярное произведение, используемое для определения угла $A3$, дает абсолютное значение угла. Для дальнейших вычислений необходимо учитывать знак угла $A3$. Для расчетной схемы с рис. 1 логическое условие, определяющее знак для $A3$:

$$A3 > 0 \text{ if } Y3 \geq 0, A3 < 0 \text{ if } Y3 < 0. \quad (3)$$

При этом значение угла удовлетворяет интервальным ограничениям:

$$\pi > A3 > -\pi. \quad (4)$$

При анализе результатов следует иметь ввиду, что угол $A3$ имеет положительное значение при повороте против часовой стрелки относительно оси X .

В предположении, что два других геометрических параметра расчетной схемы $L2$ и $L3$ могут быть вычислены через известные задержки распространения фронта волны, получаем уравнение для оценки угла распространения КВВ в локальной системе.

Для расчетной схемы должны выполняться следующие уравнения:

$$\cos(Aw) = \frac{Tm \cdot N_2 \cdot Vw}{L_{12}}, \quad (5)$$

$$\cos(A3 - Aw) = \frac{Tm \cdot N_3 \cdot Vw}{L_{13}}. \quad (6)$$

Таким образом, задача оценки параметров плоской волны в локальной системе координат с тремя буюми требует оценки параметров N_2 и N_3 и решения системы (5)–(6). Эта задача может быть решена несколькими способами, каждый из которых имеет собственную ценность с практической точки зрения.

Следует указать, что соотношение (6) универсально и существенным образом использует свойство четности функции косинуса. Из этой системы уравнений получаем трансцендентное уравнение для Aw , разделив (5) на (6), и преобразовав полученное соотношение, получаем трансцендентное уравнение для определения угла Aw :

$$\cos(Aw) = \frac{L_{13} \cdot N_2 \cdot \cos(A3 - Aw)}{L_{12} \cdot N_3}. \quad (7)$$

Соответственно, для определения характеристик КВВ волны требуется решить численным методом всего одно уравнение:

$$Aw = \arccos \left(\frac{L_{13} \cdot N_2 \cdot \cos(A3 - Aw)}{L_{12} \cdot N_3} \right). \quad (8)$$

Скорость распространения КВВ для угла Aw равна:

$$Vw = \frac{\cos(Aw) \cdot L_{12}}{Tm \cdot N_2}. \quad (9)$$

Компоненты вектора Vw в локальной системе координат описываются в виде:

$$Vwx = \frac{\cos^2(Aw) \cdot L_{12}}{Tm \cdot N_2}, \quad Vwy = \frac{\cos(Aw) \cdot \sin(Aw) \cdot L_{12}}{Tm \cdot N_2}. \quad (10)$$

В соответствии с используемой расчетной схемой координаты буев в исходной постановке задаются в используемой глобальной системе координат. Так как динамически меняющиеся текущие координаты буев 1 и 2 используют глобальную систему координат, привязка характеристик КВВ к глобальной системе координат требует пересчета значения угла AgI из локальной системы в глобальную.

Для приведения результатов обработки в глобальную систему координат требуется знание угла AgI между какой-либо координатной осью в локальной системе координат и аналогичной осью (X или Y) в глобальной. На рис. 2 приведена расчетная схема для оценки угла AgI .

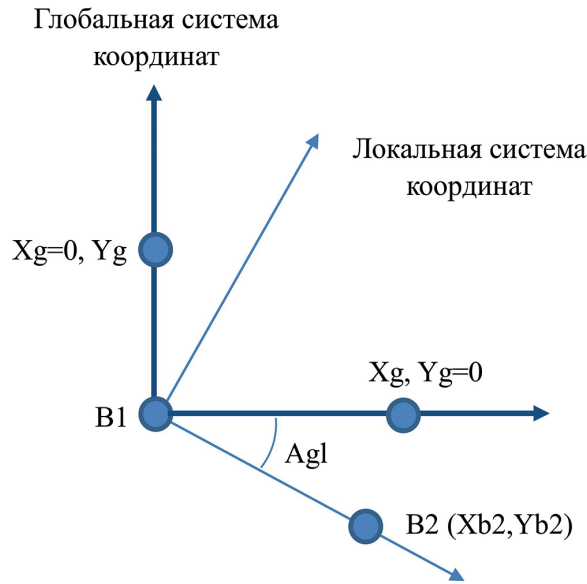


Рис. 2. Расчетная схема для оценки угла AgI

Fig. 2. Calculation scheme for estimating the AgI angle

Общая схема оценки угла аналогична оценке угла $A3$ (1)–(3): для оценки модуля угла используем скалярное произведение; для оценки знака используется соответствующее логическое условие.

Без потери общности и для определенности используем ось X глобальной системы координат, на которой требуется задать координату точки Xg . Модуль угла AgI равен:

$$\text{abs}(AgI) = \arccos \left(\frac{Xb2}{(Xb2^2 + Yb2^2)^{1/2}} \right). \quad (11)$$

Логическое условие для определения знака условия, определяющее знак для $A3$:

$$AgI > 0 \text{ if } Yb2 \geq 0, AgI < 0 \text{ if } Yb2 < 0. \quad (12)$$

Тогда вектор скорости в глобальной системе координат будут равен:

$$\mathbf{Vwgl} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{Vw}, \quad (13)$$

где $\mathbf{Vwgl} = \begin{pmatrix} Vwgx \\ Vwgy \end{pmatrix}$ — вектор скорости в глобальной системе координат; $\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos(AgI) & -\sin(AgI) \\ \sin(AgI) & \cos(AgI) \end{pmatrix}$ — матрица поворота; $\mathbf{Vw} = \begin{pmatrix} \dot{E} \\ \dot{E} \end{pmatrix}$ — вектор скорости в локальной системе.

3. Метод взаимно корреляционных функций

Важной особенностью задачи определения параметров КВВ по результатам натурных измерений является наличие шумов, а также ряда других факторов, существенным образом искажающих форму волны в разнесенных по положению буях. Применение корреляционных функций для обработки сигналов с большим уровнем шумов является стандартным подходом в гидроакустике [10].

Корреляционные функции широко используются в гидроакустических комплексах для обнаружения сигналов известной формы, так как обеспечивают возможность обнаружения таких сигналов при наличии большого уровня шумов [11]. По сравнению с системами гидролокации и гидроакустическими системами передачи данных специфика рассматриваемой задачи заключается в том, что форма КВВ априори неизвестна [12, 13].

Массивы данных, которые подвергаются обработке, представляют собой изотермы на глубине залегания термоклина с трех дрейфующих буев. Исходные данные включают в себя: временные метки (дата и время); географические координаты буев; температурные измерения; гидростатическое давление для пересчета номинальных горизонтов расположения датчиков в реальные. На эти данные накладываются шумы разной природы. Таким образом, проверкой работоспособности предлагаемого подхода является тестирование обработки при различном отношении сигнал/шум (Signal to Noise Ratio SNR).

В рамках данной терминологии сигналами будут являться глубины залегания изотермы, для которых будут вычисляться взаимно корреляционные функции с целью определения наличия КВВ, а также будут определяться положения максимумов взаимно корреляционных функций для вычисления задержек распространения фронта волны.

Дискретная взаимная корреляционная функция описывается следующим выражением:

$$R_{12}[n] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S_1[n] \cdot S_2[n-k], \quad (14)$$

где k — сдвиг исходного сигнала в отсчетах; n — нумерация отсчетов; N — число отсчетов.

Метод взаимно корреляционных функций позволяет вычислять параметры $N2$ и $N3$, описывающие задержку при распространении фронта КВВ от буя Б1, расположенного в начале локальной системы координат до буев Б2 и Б3.

Для детектирования наличия КВВ для каждого временного отсчета производится расчет взаимно корреляционных функций для трех массивов измерений для каждого из буев. При этом для каждой пары сигналов рассчитываются две корреляционные функции с переменной массивов. В терминах формулы для дискретной корреляционной функции это R_{12} , R_{21} , R_{13} , R_{31} , R_{23} , R_{32} .

Характерным признаком наличия КВВ является наличие ярко выраженных максимумов на каждом из шести графиков корреляционных функций. Фиксация наличия КВВ осуществляется при превышении значений корреляционных функций заданного порога, который является параметром метода. При задержке одного из сигналов по отношению к другому положение максимума корреляционной функции дает возможность оценить величину этой задержки.

Алгоритм определения параметров $N2$ и $N3$ и определения длительности КВВ по направлению распространения иллюстрируется рис. 3. Для иллюстрации приведены результаты корреляционной обработки модельной задачи с использованием солитоноподобной волны. Форма волны описывается гауссианом. В первом случае форма модельной волны идеальна и одинакова для каждого из буев. Во втором варианте на модельную волну накладывается гауссов шум с параметрами: математического ожидания $\mu = 0$, дисперсией $\sigma^2 = [0,408-0,707]$. Такое значение дисперсии обеспечивает изменение отношения сигнал/шум в диапазоне $SNR = [1-3]$.

Рассмотрим первую модельную задачу. Даны две модельные солитоноподобные волны: S_1 и S_2 . Задержка распространения фронта волны между буюм № 1 и буюм № 2 соответствует параметр $N2$. Для вычисления $N2$ используется метод взаимно корреляционных функций. Корреляционные функции: R_{12} — взаимно корреляционная функция S_1 и сигнала S_2 и R_{21} — взаимно корреляционная функция S_2 и сигнала S_1 , вычисляются по формулам:

$$R_{12} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S_1 \cdot S_2, \quad R_{21} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S_2 \cdot S_1. \quad (15)$$

Для вычисления задержки распространения фронта волны между буюм № 1 и буюм № 2 определяется положение максимумов корреляционных функций R_{12} , R_{21} , превышающих заданный порог:

$$N_{\max 12} = \arg(\max(R_{12})), \quad N_{\max 21} = \arg(\max(R_{21})). \quad (16)$$

Разность положения максимумов корреляционных функций равна удвоенному значению разности задержек исходных сигналов:

$$N2 = \frac{N_{\max 12} - N_{\max 21}}{2}. \quad (17)$$

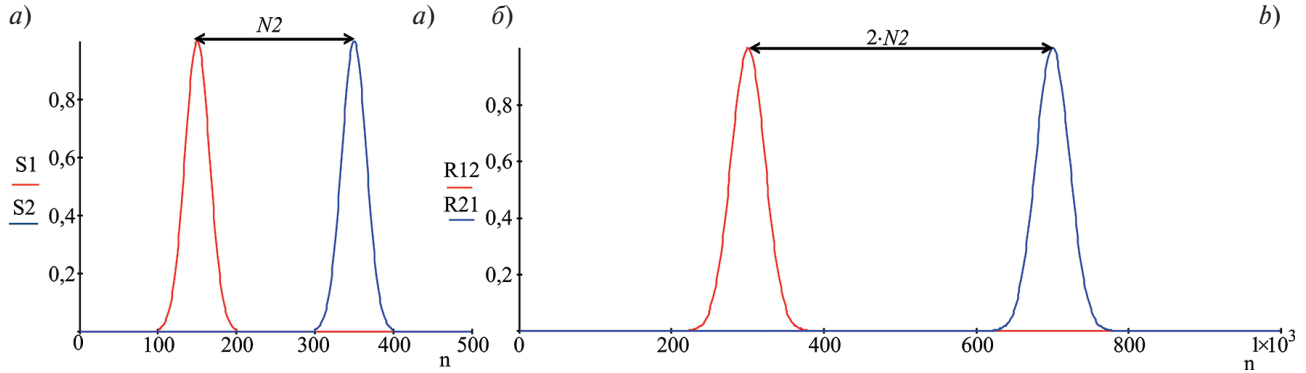


Рис. 3. Модельная задача: *a* — солитоноподобные волны; *б* — взаимно корреляционные функции R_{12} , R_{21}

Fig. 3. The model problem: *a* — soliton-like waves; *b* — cross-correlation functions R_{12} , R_{21}

Аналогичным образом вычисляется задержка распространения фронта волны между бумом № 1 и бумом № 3 N3.

Важным преимуществом подхода является возможность определения длительности волны по направлению распространения. Оценкой является размер усредненной ширины корреляционных функций для заданного порогового значения.

В модельной задаче использовалась методика имитационного моделирования [10], [14]. Были заданы два сигнала типа «гауссиан» сдвинутые относительно друг друга на 200 отсчетов (рис. 4, *a*). К сигналам добавлялся аддитивный гауссов шум с различными значениями SNR. Задержка вычислялась с использованием метода взаимно корреляционных функций. Для каждого уровня шума было выполнено 1000 опытов.

Полученные к настоящему времени результаты продемонстрировали возможность использования взаимно корреляционной функции для оценки задержки распространения КВВ. В таблице 1 представлены результаты имитационного моделирования для различного уровня отношения сигнал/шум в диапазоне $\text{SNR} = [1-3]$.

На рис. 4, *б* представлена зависимость отклонения задержки от заданного значения (200) от отношения сигнал/шум в диапазоне $\text{SNR} = [1-3]$.

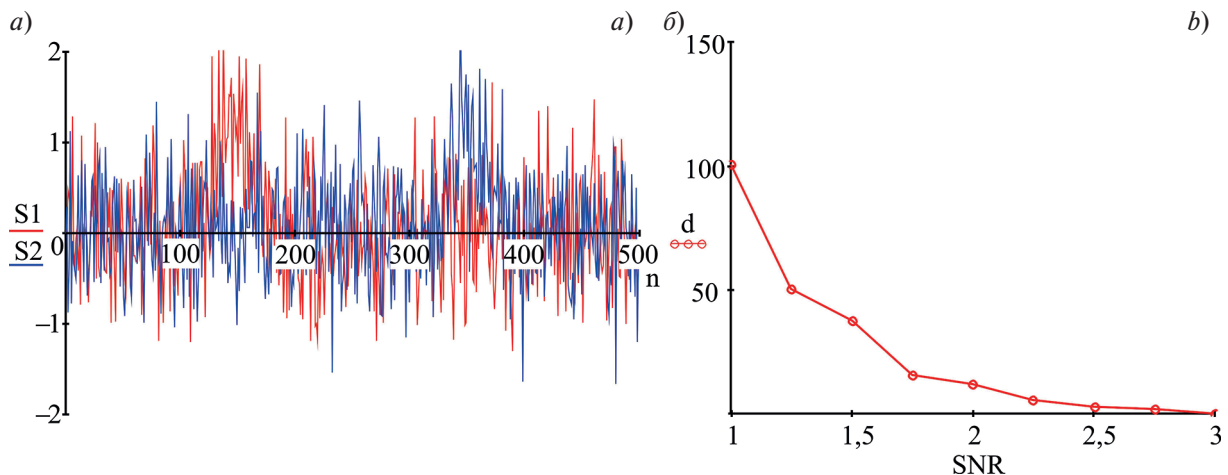


Рис. 4. Результаты имитационного моделирования: *a* — S1 — зашумленный сигнал типа «гауссиан» при $\text{SNR} = 1,75$; S2 — зашумленный сигнал типа «гауссиан» с задержкой 200 отсчетов по отношению к S1 при $\text{SNR} = 1,75$; *б* — зависимость отклонения значений задержки от заданного значения (*d*) от отношения сигнал/шум (SNR)

Fig. 4. Imitation modelling results: *a* — S1 is a noisy “Gaussian” type signal at $\text{SNR} = 1.75$; S2 is a noisy “Gaussian” type signal with a delay of 200 samples relative to S1 at $\text{SNR} = 1.75$; *b* — The dependence of the deviation of the delay values from the set value (*d*) on the SNR

Таблица 1

Table 1

Результаты имитационного моделирования

Imitation modelling results

Количество опытов 1000				
Параметры гауссова шума: мат. ожидание, дисперсия	Отношение сигнал/шум	Известное значение задержки	Вычисленное значение задержки	Отклонение значений по модулю
$\mu = 0; \sigma = 0,707$	1	200	99,561	100,439
$\mu = 0; \sigma = 0,632$	1,25	200	149,537	50,463
$\mu = 0; \sigma = 0,577$	1,5	200	162,707	37,293
$\mu = 0; \sigma = 0,535$	1,75	200	184,304	15,696
$\mu = 0; \sigma = 0,5$	2	200	188,022	11,978
$\mu = 0; \sigma = 0,471$	2,25	200	194,503	5,497
$\mu = 0; \sigma = 0,447$	2,5	200	197,301	2,699
$\mu = 0; \sigma = 0,426$	2,75	200	198,248	1,752
$\mu = 0; \sigma = 0,408$	3	200	199,818	0,182

Очевидно, что при наличии шума и искажений в данных точность определения задержки будет ухудшаться. Из практических соображений представляется целесообразным ввести 10 % порог по точности для отбора соотношения SNR, при котором метод взаимно корреляционных функций хорошо работает для определения задержки КВВ типа «гауссиан». По данным из табл. 1 это $\text{SNR} = 1,75$ (рис. 4, а). Рисунок 4, а иллюстрирует факт того, что метод взаимно корреляционных функций позволяет определить задержку с заданной точностью даже для сильно зашумленных сигналов, тогда как при использовании визуального анализа это уже не представляется возможным. Однако метод имеет ограничения, а именно, предполагается, что волна имеет существенно большие размеры, чем максимальное расстояние между буями и волна распространяется в виде плоского фронта.

4. Численные методы решения

В работе рассматриваются три способа оценки параметров КВВ: аналитический и два численных. Под аналитическим решением понимается получение параметров на основе явных соотношений, вытекающих из модели плоской волны. Первый численный метод — метод поиска минимума на регулярной сетке — представляет собой алгоритм одномерной минимизации целевой функции (квадрата невязки уравнения (8)) на заданном интервале изменения угла $A\omega$ с использованием переборного алгоритма. Второй численный метод — метод сжимающихся интервалов — относится к классу интервальных алгоритмов глобальной оптимизации и основан на последовательном сужении области неопределенности параметров с одновременной оценкой точности решения.

Применение численных методов для оценки параметров КВВ в перспективе открывает возможности использования более сложных моделей КВВ, включая искажение формы волны при распространении, учет дрейфа и т. п. Можно выделить два базовых типа обработки результатов натурных измерений, которые необходимо иметь в составе автоматизированной системы регистрации КВВ средства для: постобработки массива данных натурных измерений; обработки в реальном масштабе времени.

В режиме постобработки выполняется анализ накопленных данных натурных измерений с целью как изучения феномена КВВ, так и для разработки методик, методов и алгоритмов. Этот режим, в принципе, не накладывает жестких ограничений на время обработки.

При обработке в реальном масштабе времени требуется выполнить решение функционально полного комплекса прикладных задач за фиксированный промежуток времени. Конкретные методы обработки данных в реальном времени оказывают существенное влияние как на архитектуру системы в целом, так и используемые аппаратно-программные решения, используемые при разработке архитектуры буев.

Общая схема применения метода взаимно-корреляционных функций для системы с тремя буями включает в себя расчет шести корреляционных функций и определения положения максимума для каждой из них. С использованием (17) далее оцениваются параметры N_2 и N_3 расчетной схемы. Таким образом, ключевой прикладной задачей является нахождения глобального экстремума одномерной функции, которая в общем случае мультимодальна. Иллюстрацией этого утверждения является корреляционные функции с рис. 7, которые получены при обработке данных натурных измерений.

Алгоритмы поиска минимума одномерных унимодальных функции разработаны давно и хорошо известны [15]. При этом представляется важным отметить, что эти алгоритмы во главу угла ставили уменьшение объема вычислений, что было связано со скромными возможностями первых поколений микропроцессоров.

Существенно, что такого рода алгоритмы имеют итерационный характер, что существенно затрудняет оценку времени на реализацию такого рода алгоритмов. Более того потенциально существует опасность зацикливания. В системах обработки реального времени это является ошибкой. На практическом уровне это означает, что КВВ не будет обнаружена.

Оценки параметров КВВ с использованием метода взаимно корреляционных функций в качестве ключевого элемента включает в себя решение трансцендентного уравнения (8) для оценки Aw . Далее с использованием этого параметра производится оценка Iw с последующей трансформацией этих параметров в глобальную систему координат.

Задача решения трансцендентного уравнения (8) также сводится к задаче поиска экстремума, в данном случае речь идет о минимуме. Для этого введем целевую функцию для квадрата невязки уравнения (8) в виде:

$$F(Aw) = \left(\cos(Aw) - \frac{L_{13} \cdot N_2 \cdot \cos(A3 - Aw)}{L_{12} \cdot N_3} \right)^2. \quad (18)$$

Важно отметить, что эта функция на интервале $[-\pi, \pi]$ имеет единственное решение:

$$Aw = \min_{Aw \in [-\pi, \pi]} F(Aw). \quad (19)$$

Для иллюстрации на рис. 5. приведен график целевой функции (18) для параметров из иллюстрирующего примера, который описан в разделе 4.

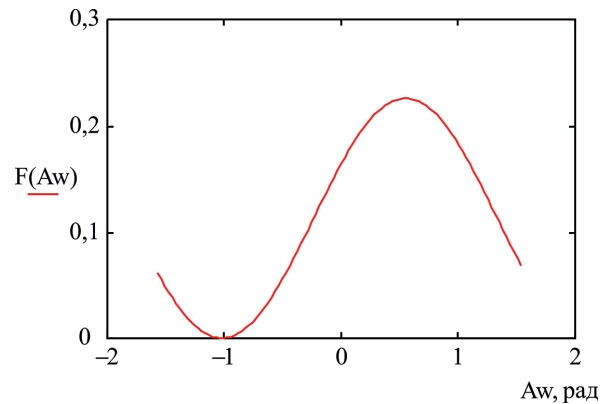


Рис. 5. Значение целевой функции на интервале $[-\pi/2, \pi/2]$ (на примере обработки данных натурных измерений $N_2 = 11$, $N_3 = 9$; $Tm = 10$ с)

Fig. 5. The value of the objective function in the interval $[-\pi/2, \pi/2]$ (using the example of processing field measurement data $N_2 = 11$, $N_3 = 9$; $Tm = 10$ s)

Исходное трансцендентное уравнение имеет множество решений. Однако в этом случае проблема решается путем использования интервальных ограничений на значение угла Aw . Применительно к рассматриваемой задаче речь идет об оценке параметров модели «Плоская волна» по данным натурных измерений. Размерность пространства параметров для этой модели равно двум.

В работе [16] был предложен класс переборных алгоритмов, предназначенных для поиска экстремума функций для относительно небольших размерностей. Это класс методов сжимающихся интервалов, который существенным образом использует интервальное описание области неопределенности. Такая постановка восходит к Канторовичу [17] и положила начало разработки теории интервальных вычислений [18, 19]. Суть подхода заключается в использовании границ значений для переменных.

Как показано в работе [16], для одномерной задачи обеспечивается нахождение глобального экстремума для одномерной мультимодальной функции. Таким образом, его применение обеспечивает решение задачи нахождения глобального максимума для корреляционных функций, которые в общем случае могут быть мультимодальными. Платой за это является существенное увеличение объема вычислений. И с этой точки зрения, это полезный инструмент решения прикладных задач постобработки.

Постановка задачи в интервальной постановке заключается в задании целевой скалярной функции многих переменных, которые являются оцениваемыми параметрами. Для каждого из параметров задаются начальные границы. За значение оцениваемого параметра принимается средняя точка его интервала неопределенности, который описывается двумя значениями. Оценкой точности является половина интервала неопределенности для каждого из параметров.

Методы класса сжимающихся интервалов реализуются как конечная последовательность шагов. На каждом шаге осуществляется уменьшение размера области неопределенности. Для корректировки границ интервалов неопределенности используется скалярная целевая функция многих переменных.

В качестве параметра метода используется число шагов, на каждом из которых исходная область неопределенности сжимается по определенному алгоритму. Существенными преимуществами является то, что уменьшение размера области неопределенности описывается геометрической прогрессией. При этом алгоритм естественным образом распараллеливается, что существенно упрощает его реализацию.

В работе [20] описан опыт применения этого метода для оценки двух параметров винтомоторной группы для летательных аппаратов, использующих BLDC моторы. Целевая функция представляла собой сумму квадратов невязки для таблицы измерений с расчетными значениями, рассчитываемыми по эмпирической формуле с двумя параметрами. В этой же работе рассмотрены практически важные аспекты выбора меры оценки точности.

Аналогичный подход может быть применен к задаче оценки A_w и I_w КВВ по данным натурных измерений. Для этого вводится целевая функция, представляющая сумму квадратов невязок уравнений (8)–(9). Результаты применения метода сжимающихся интервалов применительно к задаче обработки данных измерений приведены в разделе 4.

5. Обработка данных натурных измерений

Предлагаемый подход тестировался для обработки данных, представляющих собой глубины залегания изотерм в области термоклина с трех дрейфующих буев «Волна-ДБ 01». Измерения выполнялись в рамках экспедиции всероссийской образовательной программы «Плавучий университет» в июле 2024 г. на НИС «Профессор Молчанов» в проливе Карские Ворота. Измерительные линии дрейфующих буев охватывали слой от поверхности до глубины 65 метров. Дискретность измерений составляла 10 с, продолжительность 7 ч.

Описанная выше модель не учитывает дрейф буев. Движение КВВ описывается относительно двух систем отсчета: подвижной системы отсчета (ПСО) (массив дрейфующих буев) и неподвижной системы отсчета (НСО). Зная скорость КВВ относительно ПСО (V_w) и скорость движения ПСО (скорость дрейфа буев V_{dr}) относительно НСО, можно вычислить скорость движения КВВ относительно НСО:

$$\mathbf{Vw}' = \mathbf{Vw} + \mathbf{V}_{dr}, \quad (20)$$

где $\mathbf{Vw}'$ — вектор скорости КВВ относительно НСО, $\mathbf{Vw}$ — вектор скорости КВВ относительно ПСО, $\mathbf{V}_{dr}$ — вектор скорости дрейфа буев относительно НСО.

Оценка вектора скорости дрейфа буев относительно НСО получается усреднением скорости дрейфа по трем буям:

$$\mathbf{V}_{dr} = (\mathbf{V}_{dr1} + \mathbf{V}_{dr2} + \mathbf{V}_{dr3}) / 3. \quad (21)$$

Вычисления выполняются с использованием правил сложения векторов. Для этого требуется оценка угла в глобальной системе координат, которая предполагается неподвижной.

Для обработки использован фрагмент записи колебаний изотерм от 24 июля 2024 года (рис. 6, а). Была выбрана изотерма 5 градусов, отражающая положение термоклина. В период примерно с 4:49 по 5:39 на записях отмечался цуг из 6 ранжированных по амплитуде колебаний в виде волн заглубления термоклина. Амплитуда первой зарегистрированной волны составляла 2,5 м, а замыкающей 1,5 м. Период волн варьировался от 10 до 15 мин. Данный цуг регистрировался перед сменой направления дрейфа буев системы (рис. 6, б), что может указывать на приливное происхождение регистрируемых волн. Фрагменты изотерм, содержащие данный цуг были выбраны для последующей обработки.

Задержки при распространении волны между буями вычислялись как сдвиг положений максимумов взаимно корреляционных функций (рис. 7). Задержка распространения фронта волны между буюм № 1 и буюм № 2 $N2=11$, между буюм № 1 и буюм № 3 — $N3=9$. Интервал дискретизации измерений составил $Tm=10$ с. Длительность сигналов составила 300 отсчетов.

Расчет скорости и направления распространения КВВ для обработки данных натурального эксперимента задачи выполнялся тремя способами: аналитическое решение в глобальной системе координат; численное решение в локальной системе координат; численное решение с применением метода сжимающихся интервалов.

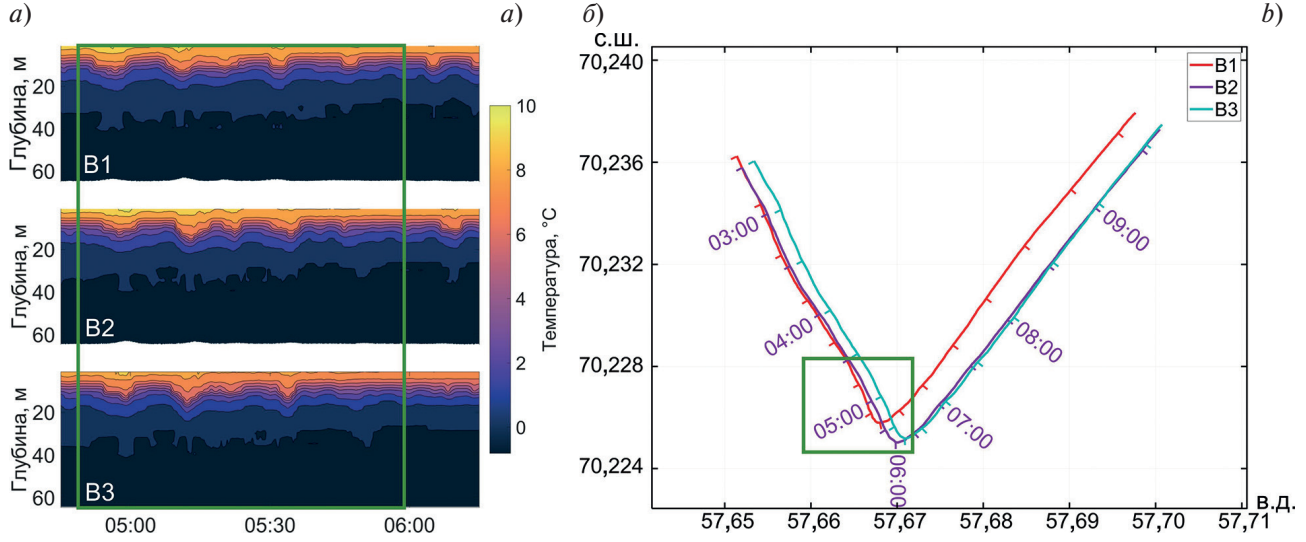


Рис. 6. Результаты измерений дрейфующей системой в проливе Карские Ворота 24 июля 2024 г.: *a* — фрагменты записей колебаний изотерм; *b* — карта траекторий дрейфа буйев системы. Зеленый прямоугольник отмечает выбранные для дальнейшего анализа данные. B1 — буй № 1, B2 — буй № 2, B3 — буй № 3

Fig. 6. The results of measurements by the drifting system in the Kara Gate Strait on July 24, 2024: *a* — fragments of recordings of isotherm oscillations; *b* — a map of the buoy drift trajectories of the system. The green rectangle marks the data selected for further analysis. B1 — buoy No. 1, B2 — buoy No. 2, B3 — buoy No. 3

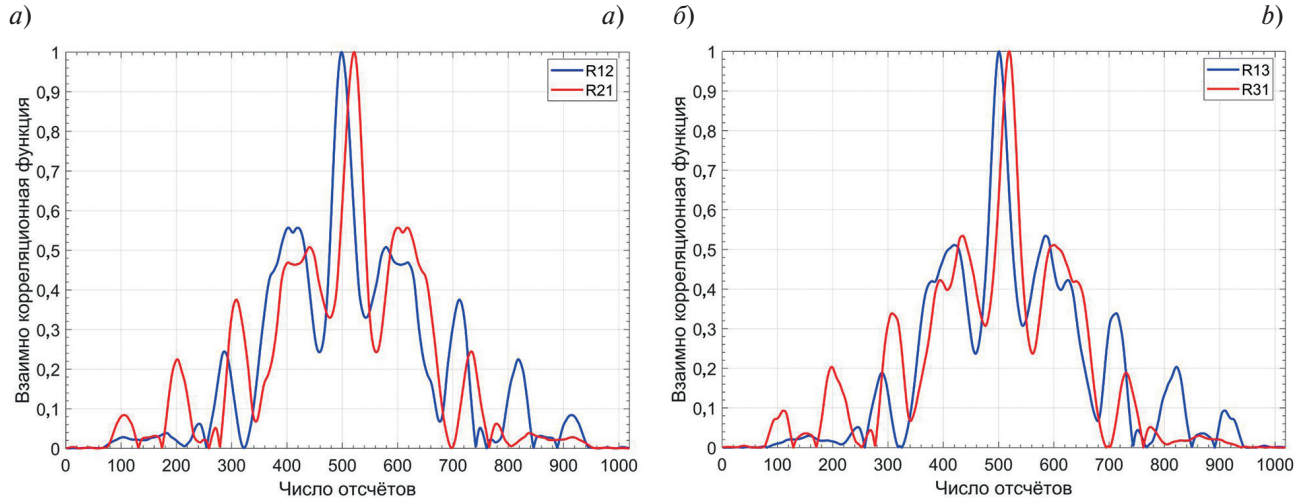


Рис. 7. Взаимно корреляционные функции: *a* — R_{12} , R_{21} ; *b* — R_{13} , R_{31}

Fig. 7. Cross-correlation functions: *a* — R_{12} , R_{21} ; *b* — R_{13} , R_{31}

В работе [1] описано аналитическое решение задачи определения скорости и направления распространения КВВ. Тогда, скорость КВВ можно выразить:

$$V_{\text{БВ}} = \frac{L_{12} \sin \varphi_{2\text{Б}}}{t_2 - t_1} = \frac{L_{13} \sin \varphi_{3\text{Б}}}{t_3 - t_1} = \frac{L_{12} \sin \varphi_{2\text{Б}}}{N_2 \cdot Tm} = \frac{L_{13} \sin \varphi_{3\text{Б}}}{N_3 \cdot Tm}, \quad (22)$$

Угол между прямой волнового фронта, проходящей через точку Б₁ и направлением из точки Б₁ в точку Б₂, определяется по формуле:

$$\varphi_{2\text{Б}} = \pm \arctg \left(\frac{\sin \varphi_{32}}{\frac{L_{12} \cdot (t_3 - t_1)}{L_{13} \cdot (t_2 - t_1)} - \cos \varphi_{32}} \right) = \pm \arctg \left(\frac{\sin \varphi_{32}}{\frac{L_{12} \cdot N_3 \cdot Tm}{L_{13} \cdot N_2 \cdot Tm} - \cos \varphi_{32}} \right), \varphi_{3x} > \varphi_{2x}. \quad (23)$$

Угол между прямой волнового фронта, проходящей через точку B_1 и направлением из точки B_1 в точку B_3 , определяется по формуле:

$$\varphi_{3B} = \varphi_{2B} \pm \varphi_{32}, \varphi_{3X} > \varphi_{2X}. \quad (24)$$

Выше под B_1 и B_2 понимались буи, а точка B_1 и точка B_2 взяты из работы [1].

Угол между направлением распространения волны и направлением на север:

$$\varphi_{\text{RR}} = 2\pi + \varphi_{\gamma_{\text{R}}} - \varphi_{\gamma_{\text{Y}}}. \quad (25)$$

Расчет по выражениям (22) и (25) дает скорость и направление распространения волны в движущейся системе отсчета, связанной с дрейфующей системой.

Аналитические формулы для угла требуют учета квадрантов, коррекции углов по знакам проекций и сложной логики при переходах через $\pm\pi$. Данное решение позволяет определить параметры КВВ, но требует соблюдения ряда условий по выбору знака в формулах для определения углов, что затрудняет применение данного метода в системах регистрации реального времени.

В качестве иллюстрирующего примера рассмотрим применение одного из вариантов метода сжимающихся интервалов к задаче оценки параметров КВВ с использованием данных натурных измерений. Расчетная схема для оценки параметров КВВ с использованием численного решения и локальной системы координат представлена на рис. 8. Для применения метода в рассматриваемой задаче используется целевая скалярная целевая функция от параметров Δw и U_w . Целевая функция представляет собой норму вектора невязки системы уравнений (8)–(9):

$$GOAL_A(Aw, Vw) = \left(\cos(Aw) - \frac{Tm \cdot N2 \cdot Vw}{L_{12}} \right)^2 + \left(\cos(A3 - Aw) - \frac{Tm \cdot N3 \cdot Vw}{L_{13}} \right)^2. \quad (26)$$

Целевая функция в исходной области неопределенности имеет единственный минимум. В такой постановке это корректная по Адамару задача в смысле наличия единственного решения. И ее решение одним из вариантов метода сжимающихся интервалов за конечное число шагов не вызывает затруднений. Для оценки угла и скорости распространения КВВ использовался вариант реализации метода сжимающихся интервалов с наличием ограничений.

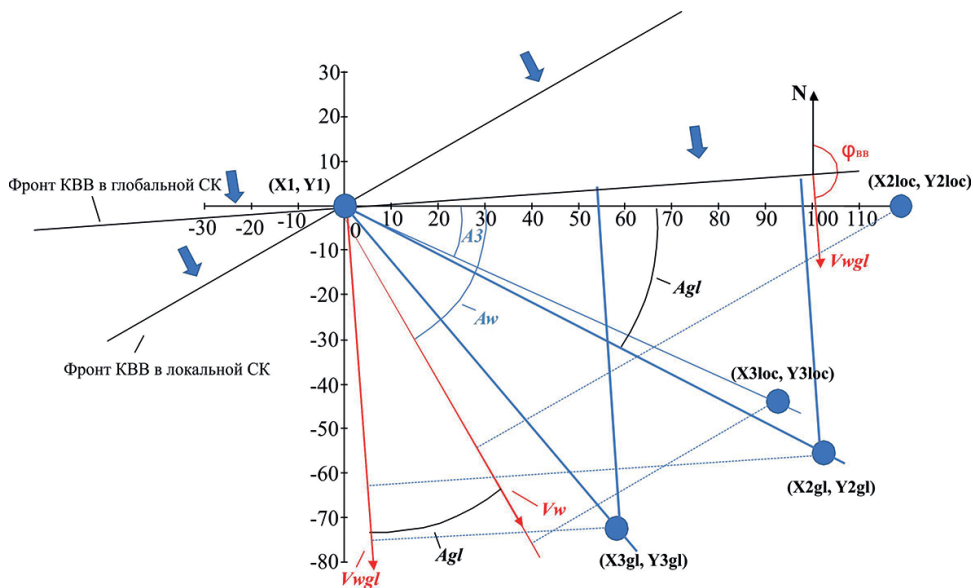


Рис. 8. Расчетная схема для численного решения

Fig. 8. Calculation scheme for numerical solution

Параметрами алгоритма являются: $\Delta\omega = [-\pi/2, \pi/2]$ (рад) исходный интервал неопределенности угла $\Delta\omega$; $V_\omega = [0, 5]$ (м/с) исходный интервал неопределенности скорости V_ω ; NPOINT = 41 — количество точек регулярной сетки; KD = 3 — коэффициент ускорения; NSTEP = 75 — количество шагов. Эти параметры выбираются из специфики конкретной прикладной задачи. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2
Table 2

Оценка параметров методом сжимающихся интервалов
Estimation of parameters by the method of shrinking intervals

Целевая функция: $GOAL_A(Aw, Vw) = \left(\cos(Aw) - \frac{Tm \cdot N2 \cdot Vw}{L_{12}} \right)^2 + \left(\cos(A3 - Aw) - \frac{Tm \cdot N3 \cdot Vw}{L_{13}} \right)^2$				
Область неопределенности	Нижняя граница	Верхняя граница	Среднее значение	Оценка точности
Исходная	$Aw_L = -\pi/2$ $Vw_L = 0$	$Aw_H = \pi/2$ $Vw_H = 5$	0 рад 2,5 м/с	+/- 1,57 рад +/- 2,5 м/с
Результирующая	$Aw_L = -1,02576$ $Vw_L = 0,674$	$Aw_H = -1,01669$ $Vw_H = 0,688$	-1,02135 рад 0,681 м/с	+/- 0,009 рад +/- 0,007 м/с

Результаты сравнения оценки параметров КВВ разными способами представлены в табл. 3. В табл. 3 приведены данные для угла $\varphi_{вв}$ — угла, измеряемого по ходу часовой стрелки между направлением распространения волны и направлением на север. Аналитическое решение позволяет определить направление распространения КВВ посредством вычисления угла $\varphi_{2в}$ (23)–(25). В столбце «Численное решение» представлены результаты оценки параметра Aw путем применения переборного алгоритма к решению задачи (19) и последующему расчету значения Vw .

Таблица 3
Table 3

Сравнение применения методов оценки параметров КВВ
Comparison of the use of methods for estimating internal waves parameters

Параметр	Аналитическое решение	Численное решение	
		Метод поиска минимума на регулярной сетке	Метод сжимающихся интервалов
Угол Aw , °	В данном методе не вычисляется	–59	–59
Угол $\varphi_{2в}$, °	–31	В данном методе не вычисляется	В данном методе не вычисляется
Направление распространения КВВ относительно севера $\varphi_{вв}$, °	177	177	177
Оценка точности определения направления, %	В данном методе не вычисляется	В данном методе не вычисляется	0,44
Скорость Vw , м/с	0,68	0,68	0,68
Оценка точности определения скорости, %	В данном методе не вычисляется	В данном методе не вычисляется	1,06

В приведенном примере обработки рассчитанная скорость дрейфа составила 0,1 м/с, угол дрейфа 123°. Тогда в соответствии с (20)–(21) скорость КВВ составит 0,74 м/с. Было выполнено сопоставление вектора скорости КВВ с полученными ранее оценками в районе Карских Ворот по данным обработки сигналов от трех термокос, расположенных в разных частях дрейфующего судна [21]. Продемонстрировано хорошее согласование оценок фазовой скорости: 0,74 м/с в настоящей работе против 0,87 м/с в [21]. Отмечено несоответствие оценок направления распространения (177° в данной работе против 56° в [21]), которое может быть вызвано тем, что измерения производились в разные фазы приливного цикла.

6. Заключение

В работе предложен новый подход к оценке параметров КВВ по результатам обработки результатов измерений температуры, выполненной массивом дрейфующих буев, базирующий на: вычислении задержки распространения сигналов между регистрирующими устройствами с помощью взаимно корреляционных функций; численном решении трансцендентного уравнения для определения направления движения и скорости КВВ; интервальном методе оценки параметров КВВ.

Оценка параметров скорости и направления выполнялась с использованием модели плоской волны. В локальной системе координат с использованием известных геометрических параметров расчетной схемы получена система двух уравнений для скорости и угла распространения КВВ. Описано два варианта численного решения этой системы. Один базируется на поиске минимума одномерной функции для уравнения угла распространения. Второй алгоритм использует интервальный метод одновременной оценки угла и скорости распространения КВВ. Интервальный метод обеспечивает получение оценки точности решения системы уравнений.

Полученные к настоящему времени результаты подтверждают перспективность применения метода взаимно-корреляционных функций и численных методов для определения базовых характеристик КВВ по данным натурных измерений температуры в системах регистрации реального времени.

В этой связи актуальными задачами следующего этапа являются задачи разработки методов: фиксации фронтов КВВ с использованием взаимно-корреляционных функций; выработки подходов к оценке формы волны; расширение границ применимости метода, связанных с ограничениями, накладываемыми моделью плоской волны. Предлагаемые алгоритмы ориентированы на работу в системах регистрации КВВ в реальном времени. Однако их развитие также позволит в дальнейшем обработать накопленный массив измерений, собранных в ходе экспедиционных исследований по программе «Плавучий университет», и получить оценки кинематических свойств КВВ в различных морях российской Арктики.

Финансирование

Измерения в проливе Карские ворота выполнены в рамках научно-образовательной программы «Плавучий университет» (соглашение № 075-01593-23-06). Формулирование методов обработки, имитационное моделирование и обработка результатов измерений выполнены в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0028).

Funding

Measurements in the Kara Gates Strait were carried out within the framework of the scientific and educational program “Floating University” (Agreement No. 075-01593-23-06). The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for IO RAS (theme No. FMWE-2024-0028).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Литература

1. Свергун Е.И., Зимин А.В., Мотыжев С.В., и др. Метод измерения характеристик короткопериодных внутренних волн при помощи массива дрейфующих термопрофилирующих буев // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 3. С. 378–394. EDN UUZCGL.
2. Pelaez Quiñones J.D., Sladen A., Ponte A., et al. High resolution seafloor thermometry for internal wave and upwelling monitoring using Distributed Acoustic Sensing // Scientific Reports. 2023. Vol. 13, 17459. EDN NMMYXH. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44635-0>
3. Yang C.F., Chi W.C., van Haren H. et al. Tracking deep-sea internal wave propagation with a differential pressure gauge array // Scientific Reports. 2021. Vol. 11, 23311. EDN XYRZNF. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02721-1>
4. Preusse M., Peeters F., Lorke A. Internal waves and the generation of turbulence in the thermocline of a large lake // Limnology and Oceanography. 2010. Vol. 55, No. 6. P. 2353–2365. <https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.6.2353>
5. Lorke A., Peeters F., Bäuerle E. High-Frequency Internal Waves in the Littoral Zone of a Large Lake // Limnology and Oceanography. 2006. Vol. 51, No. 4. P. 1935–1939. <https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.4.1935>
6. Serebryany A., Khimchenko E., Popov O., Denisov D., Kenigsberger G. Internal Waves Study on a Narrow Steep Shelf of the Black Sea Using the Spatial Antenna of Line Temperature Sensors // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. Vol. 8, 833. EDN JDCUER. <https://doi.org/10.3390/jmse8110833>

7. Гайский П.В. Стационарная измерительная система на базе термопрофилемеров на океанографической платформе для определения параметров внутренних волн: результаты испытаний // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 1. С. 98–112. EDN TSHDME
8. Rong L., Xiong X., Chen L. An automatic identification algorithm of internal solitary wave for mooring data based on geometric characteristics of the flow field // *Frontiers in Marine Science*. 2023. Vol. 10: 1147268. EDN AYTQRY. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1147268>
9. Zimin A., Svergun E., Sofina E., et al. Interannual variability of nonlinear internal wave characteristics in the Pacific Ocean off the Kamchatka Peninsula and the Northern Kuril Islands // *Frontiers in Marine Science*. 2025. Vol. 12, 1662937. EDN GNWFAF. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1662937>
10. Бутырский Е.Ю. Методы моделирования и оценивания случайных величин и процессов. СПб.: Стратегия будущего, 2020. 642 с. EDN RIWUKM. https://doi.org/10.37468/mon_1850
11. Астапкович А.М., Матвеев Д.П., Шарафутдинова Т.К. Способ обнаружения сигналов известной формы на основе векторно-косинусной меры подобия. Патент № 2783875 С1 от 21.11.2022. EDN QUHQJA.
12. Степанюк И.А. Методы измерения характеристик морских внутренних волн. СПб.: изд. РГГМУ, 2002. 136 с.
13. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. Горячие точки в поле внутренних волн в океане // *Акустический журнал*. 2007. Т. 53. С. 410–436. EDN HFFSOU
14. Шарафутдинова Т.К. Программа для синтеза и исследования свойств детекторов сигналов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021615878 от 13.04.2021.
15. Himmelblau D. Applied nonlinear programming. McGraw-Hill Education, 1972.
16. Астапкович А.М., Бутырский Е.Ю., Шкатов А.В., Васильев В.В. Метод сжимающихся интервалов на регулярной сетке для поиска глобального минимума // *Информация. Космос*. 2024. № 1. С. 91–105. EDN AHFJUS.
17. Канторович Л.В. О некоторых новых подходах к вычислительным методам и обработке наблюдений // *Сибирский математический журнал*. 1962. Т. 3, № 5. С. 701–709. EDN ZIGTWJ.
18. Жолен Л., Кифер М., Дидри О., Вальтер Э. Прикладной интервальный анализ. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2007. 468 с.
19. Морозов А.Ю. Параллельный алгоритм адаптивной интерполяции на основе разреженных сеток для моделирования динамических систем с интервальными параметрами // *Программная инженерия*. 2021. Т. 12, № 8. С. 395–403. EDN DNKGPH. <https://doi.org/10.17875/prin.12.395-403>
20. Астапкович А.М., Шарафутдинова Т.К., Шкатов А.В. Параметрическая идентификация моделей методом сжимающихся интервалов // *Информация и космос*. 2024. № 3. С. 52–59. EDN AVQRDU.
21. Kozlov I.E., Kopyshov I.O., Frey D.I., et al. Multi-Sensor Observations Reveal Large-Amplitude Nonlinear Internal Waves in the Kara Gates, Arctic Ocean // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. 5769. EDN LBAVOR. <https://doi.org/10.3390/rs15245769>

References

1. Svergun EI, Zimin AV, Motyzhev SV, et al. Measuring the characteristics of short-period internal waves using an array of drifting thermoprofiling buoys. *Physical Oceanography*. 2025;32(3):392–407. (In Russ.).
2. Pelaez Quiñones JD, Sladen A, Ponte A, et al. High resolution seafloor thermometry for internal wave and upwelling monitoring using Distributed Acoustic Sensing. *Scientific Reports*. 2023;13:17459. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44635-0>
3. Yang CF, Chi WC, van Haren H, et al. Tracking deep-sea internal wave propagation with a differential pressure gauge array. *Scientific Reports*. 2021;11:23311. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02721-1>
4. Preusse M, Peeters F, Lorke A. Internal waves and the generation of turbulence in the thermocline of a large lake. *Limnology and Oceanography*. 2010;55(6):2353–2365. <https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.6.2353>
5. Lorke A, Peeters F, Bäuerle E. High-Frequency Internal Waves in the Littoral Zone of a Large Lake. *Limnology and Oceanography*. 2006;51(4):1935–1939. <https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.4.1935>
6. Serebryany A, Khimchenko E, Popov O, Denisov D, Kenigsberger G. Internal Waves Study on a Narrow Steep Shelf of the Black Sea Using the Spatial Antenna of Line Temperature Sensors. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020;8:833. <https://doi.org/10.3390/jmse8110833>
7. Gaisky PV. Thermoprofiler-Based Stationary Measuring System on the Oceanographic Platform for Determining Internal Wave Parameters: Testing Results. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*. 2024;(1):98–112. (In Russ.).
8. Rong L, Xiong X, Chen L. An automatic identification algorithm of internal solitary wave for mooring data based on geometric characteristics of the flow field. *Frontiers in Marine Science*. 2023;10:1147268. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1147268>
9. Zimin A, Svergun E, Sofina E., et al. Interannual variability of nonlinear internal wave characteristics in the Pacific Ocean off the Kamchatka Peninsula and the Northern Kuril Islands. *Frontiers in Marine Science*. 2025;12:1662937. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1662937>

10. Butyrsky EY. Methods of modeling and estimation of random variables and processes. St. Petersburg: Strategiya buduschego; 2020. 642 p. (In Russ.).
11. Astapkovich AM, Matveev DP, Sharafutdinova TK. A method for detecting signals of a known shape based on a vector-cosine similarity measure. Patent No. 2783875 C1 dated 11/21/2022. (In Russ.).
12. Stepanyuk IA. Methods of measuring the characteristics of marine internal waves. St. Petersburg: Izdatel'stvo RGGMU; 2002. 136 p. (In Russ.).
13. Sabinin KD., Serebryany AN. "Hot spots" in the field of internal waves in the ocean. *Acoustical Physics*. 2007;53(3):357–380.
14. Sharafutdinova TK. Program for synthesis and investigation of properties of signal detectors. Certificate of state registration of the computer program No. 2021615878, dated 04/13/2021. (In Russ.).
15. Himmelblau D. Applied nonlinear programming. McGraw-Hill Education; 1972.
16. Astapkovich AM, Butyrsky EYu, Shkatov AV, Vasiliev VV. The method of compressible intervals on a regular grid for searching for a global minimum. *Informatsiya. Kosmos*. 2024;(1):91–105. (In Russ.).
17. Kantorovich LV. On some new approaches to computational methods and observation processing. *Siberian Mathematical Journal*. 1962;3(5):701–709. (In Russ.).
18. Jolene L, Kiefer M, Didry O, Walter E. Applied interval analysis. Moscow–Izhevsk: Institut kompyuternykh issledovaniy; 2007. 468 p. (In Russ.).
19. Morozov AY. Parallel algorithm of adaptive interpolation based on sparse grids for modeling dynamic systems with interval parameters. *Programmnaya Inzheneriya*. 2021;12(8):395–403. (In Russ.). <https://doi.org/10.17875/prin.12.395-403>
20. Astapkovich AM, Sharafutdinova TK, Shkatov AV. Parametric identification of models by the method of shrinking intervals. *Informatsiya i Kosmos*. 2024;(3):52–59. (In Russ.).
21. Kozlov IE, Kopyshov IO, Frey DI., et al. Multi-Sensor Observations Reveal Large-Amplitude Nonlinear Internal Waves in the Kara Gates, Arctic Ocean. *Remote Sensing*. 2023;15:5769. <https://doi.org/10.3390/rs15245769>

Об авторах

ШАРАФУТДИНОВА Таисия Константиновна, кандидат технических наук, научный сотрудник СПбФ ИО РАН, ORCID: 0009-0002-1082-9528, SPIN-код (РИНЦ): 5349-1395, e-mail: sharafutdinova.taya@yandex.ru

АСТАПКОВИЧ Александр Михайлович, кандидат технических наук, ведущий специалист ГК «ГЕОСКАН», e-mail: tatalex2@gmail.com

СВЕРГУН Егор Игоревич, кандидат географических наук, научный сотрудник СПбФ ИО РАН, доцент РГГМУ, SPIN-код (РИНЦ): 3212-7041, ORCID: 0000-0002-9228-5765, Scopus AuthorID: 57195066881, WoS ResearcherID: AAC-7289-2020, e-mail: egor-svergun@yandex.ru

ЗИМИН Алексей Вадимович, доктор географических наук, главный научный сотрудник СПбФ ИО РАН, профессор СПбГУ, ORCID: 0000-0003-1662-6385, WoS ResearcherID: C-5885-2014, Scopus AuthorID: 55032301400, SPIN-код (РИНЦ): 9833-3460, e-mail: zimin2@mail.ru