

УДК 551.46.08

© В. А. Глухов*, Ю. А. Гольдин, Г. В. Жегулин, М. А. Родионов, 2022

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, Россия

*E-mail: vl.glukhov@inbox.ru

КОМПЛЕКСНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЛИДАРНОЙ СЪЕМКИ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ

Статья поступила в редакцию 30.03.2022, после доработки 10.08.2022, принята в печать 15.08.2022

Выполнена комплексная обработка данных судовой лидарной съемки прибрежных районов Черного моря, в которых ранее с использованием контактных и спутниковых методов наблюдались короткопериодные внутренние волны. В качестве источника зондирующих линейно-поляризованных лазерных импульсов в лидаре использован твердотельный лазер с диодной накачкой активного элемента АИГ: Nd с импульсной мощностью 20 мДж на длине волны 532 нм и длительностью 7 нс. В ходе лидарной съемки регистрировались ко- и кросс-поляризованная компонента эхо-сигнала. При обработке использовалась в основном кросс-поляризованная компонента эхо-сигнала в силу её большей чувствительности к различного рода неоднородностям распределения гидрооптических характеристик с глубиной. Цель обработки — выявление квазипериодических структур в пространственном распределении характеристик лидарных эхо-сигналов, обусловленных распространением короткопериодных внутренних волн. В работе использовано три метода обработки: аппроксимационный метод, метод вейвлет-анализа и метод Гильберта-Хуанга. Обработан большой массив данных, полученных в результате 50 часов лидарной съемки. Выявлено три шестидесятиминутных трека, содержащих квазипериодические структуры. Результаты, полученные с использованием трех методов обработки, хорошо согласуются между собой и позволяют получить наиболее полную информацию о параметрах исследуемых процессов. Параметры зарегистрированных квазипериодических процессов характерны для внутренних волн, наблюдаемых в прибрежных районах Черного моря. В дальнейшем при обработке большого объема данных лидарного зондирования целесообразно на первом этапе проводить быструю обработку автоматизированными спектральными методами, а детальную обработку аппроксимационным методом проводить только для тех участков съемки, на которых выявлены квазипериодические процессы.

Ключевые слова: судовой поляризационный лидар, лидарная съемка, морские акватории, внутренние волны, вейвлет-анализ, преобразование Гильберта-Хуанга

© V. A. Glukhov*, Yu. A. Goldin, G. V. Zhegulin, M. A. Rodionov, 2022

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 117997, Nahimovsky Pr., 36, Moscow, Russia

*E-mail: vl.glukhov@inbox.ru

COMPLEX PROCESSING OF LIDAR SURVEY DATA OF MARINE AREAS

Received 30.03.2022; Revised 10.08.2022; Accepted 15.08.2022

The complex processing of data from the shipborne lidar survey of the Black Sea coastal areas was carried out. In this area, internal waves are often observed according to contact and satellite observations. The source of probing linearly polarized laser pulses in the lidar is a solid-state laser with diode pumping of the YAG: Nd active element with a pulse power of 20 mJ at a wavelength of 532 nm and a duration of 7 ns. The co- and cross-polarized components of the echo signal were recorded during the lidar survey. The cross-polarized component of the echo signal was mainly used due to its greater sensitivity to various kinds of inhomogeneities in the vertical distribution of hydrooptical characteristics. The purpose of processing is to identify quasi-periodic structures in the spatial distribution of the characteristics of lidar echo signals caused the propagation of short-period internal waves. Three processing methods were applied: the approximation method, the wavelet analysis method, and the Hilbert-Huang transform method. A large array of data obtained during 50 hours of lidar survey has been processed. Three 60-minute tracks containing quasi-periodic structures have been identified. The three processing methods results are in good agreement with each other and make it possible to obtain the most complete information about the parameters of the studied processes. The parameters of the recorded quasi-periodic processes are typical for internal waves observed in the coastal areas of the Black Sea. In the future,

Ссылка для цитирования: Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Жегулин Г.В., Родионов М.А. Комплексная обработка данных лидарной съемки морских акваторий // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 3. С. 27–42.

doi:10.48612/fpg/26nu-3hte-3n48

For citation: Glukhov V.A., Goldin Yu.A., Zhegulin G.V., Rodionov M.A. Complex Processing of Lidar Survey Data of Marine Areas. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 3, 27–42. doi:10.48612/fpg/26nu-3hte-3n48

when processing a large amount of lidar sounding data, it is advisable to carry out fast processing by automated spectral methods at the first stage, and to carry out detailed processing by the approximation method only for those survey areas where quasi-periodic processes have been identified.

Keywords: shipboard polarized lidar, lidar survey, marine areas, internal waves, wavelet analysis, Hilbert-Huang transform

1. Введение

Лидарная съемка морских акваторий с использованием радиометрических лидаров позволяет обнаруживать и определять параметры светорассеивающих слоев [1, 2], регистрировать положение рыбных косяков, определять положения границ повышенных концентраций фитопланктона, обусловленных цветением, в том числе кокколитофоридов [3–6]. Актуальной задачей лидарного зондирования является регистрация и определение параметров внутренних волн (ВВ) [7–9]. Возможность регистрации ВВ лидарным методом обусловлена наличием корреляции между вертикальными распределениями гидрофизических и гидрооптических характеристик в приповерхностном слое морской воды. Такая корреляция позволяет дистанционно оценить глубину залегания пикноклина, а при соответствующей организации процесса лидарной съёмки регистрировать квазипериодические процессы в толще воды, приводящие к изменению положения пикноклина.

Важной задачей лидарного зондирования является разработка методов обработки и интерпретации как результата каждого зондирования, так и серии результатов, полученных при выполнении лидарной съемки. Поляризационный метод обработки позволяет оценивать параметры стратификации показателя рассеяния по временной зависимости степени деполяризации лидарного эхо-сигнала [1, 3]. Различные варианты метода базового сигнала основаны на сравнении формы реального эхо-сигнала с формой эхо-сигнала для однородного участка подводной трассы зондирования. Этот метод показал эффективность при наличии подповерхностных слоев повышенного светорассеяния [3, 7, 10, 11]. Развитием метода базового сигнала является аппроксимационный метод, который был успешно применен для определения границ между слоями с различными гидрооптическими характеристиками в случае двухслойной стратификации [9]. Регистрация изменения положения границы между слоями в ходе лидарной съемки позволила зарегистрировать квазипериодические структуры, обусловленные прохождением короткопериодных ВВ. Для обработки данных серии импульсов, полученной в ходе лидарной съемки, могут быть использованы спектральные методы, основанные на анализе изменения амплитуды эхо-сигнала на фиксированной глубине. Интересно провести сопоставление результатов обработки данных лидарной съемки разными методами и оценить возможность использования комплексной обработки для получения наиболее полной информации об исследуемых процессах.

Целью работы является применение комплексной обработки данных лидарной съемки для регистрации квазипериодических процессов, протекающих в приповерхностной толще морской воды, и определения их параметров.

2. Материалы и методы

2.1. Описание аппаратуры и методики лидарной съемки

Исследования выполнялись с использованием морского поляризационного лидара ПЛД-1 (совместная разработка Лаборатории оптики океана и атмосферы Санкт-Петербургского филиала ИО РАН и Лаборатории оптики океана ИО РАН) [12, 13]. В качестве источника зондирующих импульсов в лидаре используется импульсный твердотельный лазер на АИГ: Nd^{3+} с накачкой активного элемента решётками лазерных диодов и преобразованием частоты излучения во вторую гармонику (разработка ООО «ЛАГРАН», г. Москва) со следующими характеристиками: длина волны зондирующего излучения 532 нм, энергия зондирующего импульса 20 мДж, длительность зондирующего импульса по уровню 0,5–7 нс, расходимость по уровню 80 % энергии 3 мрад, поляризация зондирующего излучения линейная, частота зондирования 1 Гц.

Двухканальная приемная система предназначена для регистрации ко- и кросс-поляризованных компонент эхо-сигнала. Световой диаметр приемной оптической системы ко-поляризованного канала составляет 63 мм, кросс-поляризованного канала — 90 мм, угол поля зрения оптических систем обоих каналов 2°. Поляризационный метод обеспечивает ряд преимуществ при зондировании толщи воды с неоднородным распределением гидрооптических характеристик с глубиной [1, 2, 9, 13]. В связи с этим в данной работе анализируются, в основном, данные регистрации кросс-поляризованной компоненты эхо-сигнала.

Для регистрации сигналов с фотоприемников используется цифровой осциллограф LeCroy HDO 4034 с полосой пропускания 350 МГц, частотой дискретизации 2,5 Гвыб./с и динамическим диапазоном 12 бит.

Пространственное разрешение по глубине (минимальное изменение глубины погружения рассеивающего объекта, которое может быть зафиксировано с помощью лидара) определяется характеристиками фронта импульсной функции измерительной системы. Эксперименты по определению дальности до подвижного плоского щита показали, что лидар ПЛД-1 позволяет уверенно регистрировать изменение дальности порядка 30 см [12].

При проведении съемки оптический блок лидара был установлен на верхней палубе судна. Высота оптического блока над поверхностью воды составляла 9,5 м. С помощью устройства крепления и наведения оптического блока был установлен угол зондирования 20° от вертикали для минимизации влияния зеркального отражения луча лазера от взволнованной поверхности воды.

Для расширения динамического диапазона регистрации лидарных эхо-сигналов использовался метод ранжирования [14], заключающийся в регистрации разных участков сигнала с разной чувствительностью приёмно-регистрирующей системы. На одном канале осциллографа регистрировался весь размах сигнала — от нуля до максимума амплитуды, а на другом — сигнал с 10-кратным усилением, когда вершина импульса находится в насыщении. В этом случае удается более подробно зарегистрировать кривую затухания эхо-сигналов на глубине более 10 м, поскольку изменения сигнала на глубине существенно меньше, чем в случае регистрации всей амплитуды.

Лидарная съемка проводилась галсами на малом ходу судна при скорости 4 узла. Продолжительность сеансов лидарной съемки составляла порядка 1 ч. Между сериями лидарного зондирования в дрейфе судна производились измерения с помощью зонда SBE25 с прозрачномером C-Star с длиной базы 25 см, измеряющим показатель ослабления света морской водой на длине волны 530 нм. В светлое время суток проводились измерения глубины видимости диска Секки Z_6 .

2.2. Условия проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились в Феодосийском заливе Черного моря летом 2016 г. Район работ характеризуется глубинами 1000–1200 м вблизи спада глубин от 100 до 1200 м. Результаты контактных измерений [15, 16] и данные спутниковой съемки [17–19] свидетельствуют о том, что шельфовая зона Черного моря является местом активной генерации и распространения ВВ.

Глубина видимости диска Секки Z_6 в районе проведения экспериментальных исследований варьировалась от 9 до 11 м. Типичный профиль вертикального распределения гидрофизических характеристик и показателя ослабления в районе проведения исследований представлен на рис. 1. Общая глубина в точке измерения профиля составляла 1050 м. Особенности распределения показателя ослабления в данном районе хорошо согласуются с распределением гидрофизических характеристик. Слой повышенного градиента изменения показателя ослабления соответствует положению пикноклина. Важно отметить полное отсутствие слоя повышенного светорассеяния, приуроченного к пикноклину.

Измерения проводились в условиях, близких к штилевым — поверхностное волнение не превышало 1 балл. Скорость движения судна 4 узла. Влияние поверхностного волнения и незначительной качки на точность определения положения глубины промежуточного слоя можно оценить с помощью продолжительных серии зондирований однородных участков. Анализ таких серий зондирований показал, что погрешность определения границ слоя составляет 0,4 м. При обработке данных лидарной съемки производилось усреднение по 20 зондированиям. Такое усреднение снизило величину мультипликативной погрешности, обусловленной влиянием волнения и качки судна, до величины 0,2 м. Отметим, что это усреднение практически не влияет на возможность регистрации периодических структур в интересующем нас диапазоне периодов 3–10 мин.

2.3. Методы обработки

Целью обработки серии лидарных эхо-сигналов является поиск и определение параметров квазипериодических процессов, обусловленных распространением короткопериодных ВВ. Необходимо зарегистрировать наличие квазипериодических структур, определить период, амплитуду, количество колебаний в волновом пакете и время его прихода. Для обработки данных лидарной съемки использовались три метода: аппроксимационный метод, метод вейвлет-анализа и метод Гильберта-Хуанга. Каждый из них основан на анализе формы спада эхо-сигнала и её изменения в серии зондирований. В работе [9] показана эффективность

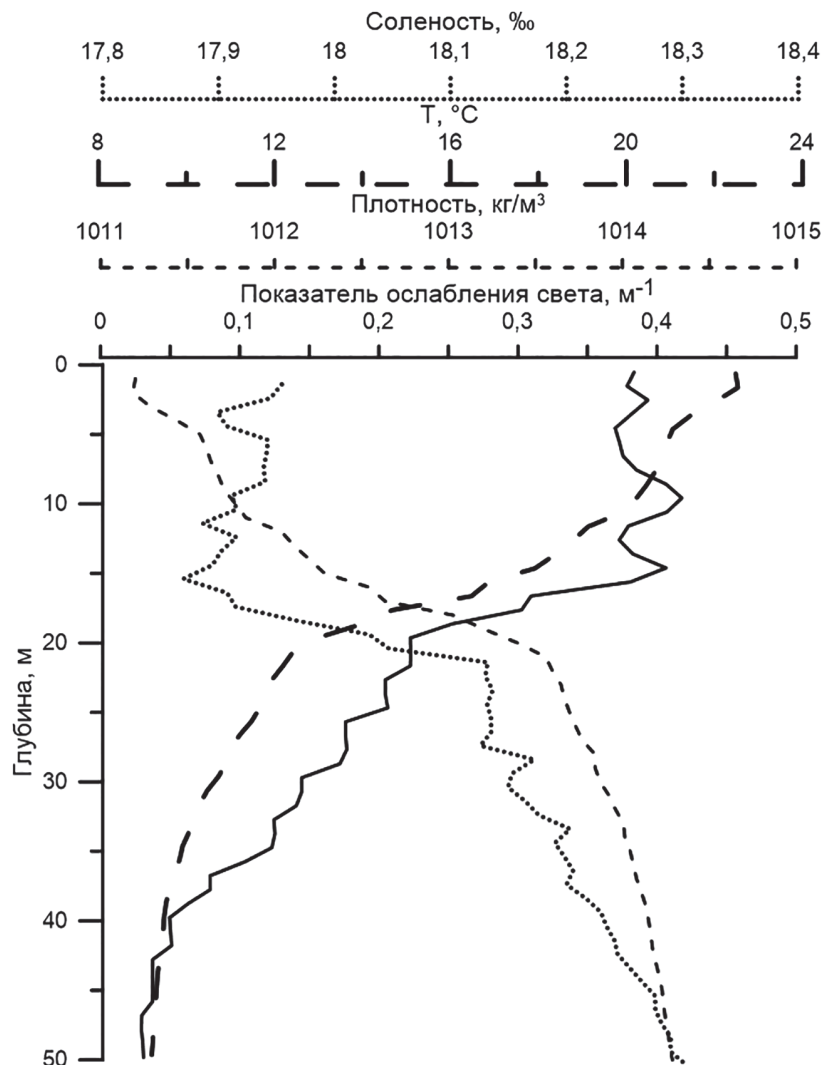


Рис. 1. Характерный профиль гидрофизических характеристик морской воды в районе работ

Fig. 1. Typical profile of the hydrophysical characteristics of sea water in the work region

применения аппроксимационного метода при обработке сигналов лидарного зондирования толщи морской воды с двухслойной стратификацией гидрооптических характеристик. Суть метода заключается в выделении участков спада эхо-сигнала и подборе для них параметров аналитической функции аппроксимации, вид которой следует из лидарного уравнения [1]:

$$U(t) = a \cdot \frac{\exp(-b \cdot c_w t)}{(2n_w H + c_w t)^2},$$

где a , b — параметры аппроксимации, c_w — скорость света в воде, t — время, отсчитываемое от момента пересечения зондирующим импульсом поверхности воды, n_w — показатель преломления морской воды, H — протяженность воздушного участка трассы зондирования.

Границы участков аппроксимаций определялись по особенностям формы затухания эхо-сигнала с глубиной. Критерием правильности выбора интервалов глубин и параметров a и b является точность аппроксимации заданных участков, оцениваемая методом наименьших квадратов. Точка пересечения аппроксимационных кривых для верхнего и промежуточного участков спада эхо-сигнала является характерной точкой и принимается за положение границы между слоями. Как показано в работе [9], найденное таким образом положение границ слоев соответствует положению пикноклина. Положение границ между слоями под воздействием разных гидрофизических факторов меняется со временем. Обработка массива данных лидарного зондирования позволяет дистанционно регистрировать эти изменения.

Достоинством данного метода является возможность получения наглядной картины вертикальных смещений положения границ между слоями, приуроченными к положению термоклина, позволяющей оценить период, амплитуду, количество колебаний в цуге и время регистрации квазипериодических структур. В настоящее время метод является довольно трудоемким, поскольку существующая программа обработки требует участия оператора для анализа каждого эхо-сигнала.

Два других использованных в работе метода основаны на спектральном анализе изменения амплитуд эхо-сигналов с фиксированной глубины, несущей информацию о значении коэффициента обратного рассеяния. В этом случае анализ данных лидарного зондирования представляет собой задачу поиска квазипериодических изменений амплитуды сигнала обратного рассеяния на заданных горизонтах.

Вейвлет-анализ применяется для различных задач океанологии [20]. В частности, с использованием вейвлет-анализа были определены параметры ВВ по данным термолинии и прозрачномера [21]. В этой работе показана также высокая корреляция между изменениями температуры и показателя ослабления света морской водой в области слоя скачка. В отличие от Фурье-преобразования, вейвлет-анализ позволяет определять не только наличие периодических процессов в заданном интервале частот, но и указывать их положение во времени.

Методика вейвлет-анализа, примененная для выборок значений амплитуд лидарных эхо-сигналов с фиксированной глубины, аналогична методике, применявшейся для анализа данных термолинии [21]. При подготовке данных лидарного зондирования использовалась фильтрация исходного сигнала методом Савицкого-Голея второго порядка с окном 15 мин для подавления низкочастотных составляющих, сравнимых с продолжительностью серии лидарного зондирования [22]. В качестве материнского вейвлета выбран вейвлет Морле с центральной частотой 2л. Для каждой выборки с заданной глубины серии лидарного зондирования рассчитывались амплитуды коэффициентов вейвлет-преобразования и уровни их значимости по отношению к красному шуму с 95%-ным порогом [23]. Недостатком вейвлет-анализа является зависимость точности определения параметров квазипериодических структур и их времени регистрации от продолжительности и дискретности измерений в серии лидарного зондирования. Влияние краевых эффектов и привязка к заранее заданному функциональному базису также вносит погрешности в определении параметров выделенных сигналов.

Другим методом спектрального анализа является преобразование Гильберта-Хуанга, активно используемое в различных областях науки для исследования нелинейных и нестационарных колебательных процессов [24]. В задачах океанологии в работах [25–28] преобразование Гильберта-Хуанга было использовано для изучения параметров нелинейных и разрушающихся ВВ.

В основе преобразования Гильберта-Хуанга лежит предположение, что любой сигнал состоит из разнообразных внутренних видов колебаний, наложенных одно на другое, причем разложение, в отличие от Фурье анализа, ведется только по тем колебаниям (т. е. эмпирическим модам), которые присутствуют в исходном сигнале. В отличие от гармонического анализа, где модель (дискретного или непрерывного) сигнала задается заранее, эмпирические моды вычисляются в ходе процесса обработки. Метод эмпирических мод (EMD — Empirical Mode Decomposition) осуществляется путем разложения данных на ряд внутренних модовых функций (IMF — Intrinsic Mode Functions) и функцию тренда посредством просеивания. В дальнейшем к ряду IMF применяется преобразование Гильберта для вычисления мгновенной частоты и амплитуды сигнала для каждого момента времени. Результатом использования преобразования Гильберта является трехмерный ряд: продолжительность сигнала — период — амплитуда. При анализе нестационарных процессов спектры Гильберта позволяют обнаруживать потоки энергии во времени, пространстве, а также между различными компонентами спектров. Преобразование Гильберта-Хуанга позволяет зарегистрировать изменение частоты исследуемого процесса во времени и проследить за изменением его амплитуды.

Преимуществами использования преобразования Гильберта-Хуанга над вейвлет-анализом являются более высокая чувствительность к изменению амплитуды сигнала рассматриваемого колебательного процесса [27]. Разложение исходного ряда основано на самом сигнале и не имеет заранее определенного функционального базиса (в отличие от вейвлет-преобразования), а значит, может быть применено к сигналам любой формы. Преобразование Гильберта-Хуанга также не требует дополнительной подготовки сигнала, как в случае вейвлет-анализа с использованием фильтра Савицкого-Голея.

В отличие от аппроксимационного метода, требующего участия оператора и экспертной оценки, в настоящий момент обработка спектральными методами выборок амплитуд лидарных эхо-сигналов на заданной глубине полностью автоматизирована. Программная реализация спектральных методов выполнена в пакете программ MATLAB2021b с применением встроенных функций Signal Processing Toolbox и Wavelet Toolbox.

3. Результаты и обсуждение

Общее время лидарной съемки составило около 50 ч. Получен большой массив данных, в результате их обработки было выявлено три галса, на которых были зарегистрированы квазипериодические структуры. На рис. 2–5 показаны результаты обработки данных лидарной съемки на галсе № 1. Результаты обработки аппроксимационным методом показаны на рис. 2. Верхняя кривая соответствует положению верхней границы промежуточного слоя, а нижняя кривая — нижней. Для эхо-сигналов в начале цикла с учетом особенностей формы спада были выбраны следующие интервалы глубин для подбора параметров аппроксимирующих функций: 11–13 м, 13–16 м и 16–21 м. В ходе обработки в случае изменения формы эхо-сигнала положение этих границ корректируется. Результат обработки галса показывает, что положение верхней границы слоя остается практически постоянным на протяжении всего галса, в то же время на нижней границе зарегистрирована четко выраженная периодическая структура. Средний период колебаний составляет 5 мин, амплитуда — порядка 1 м.

Вейвлет-анализ данных галса № 1 был выполнен для изменения значений амплитуд эхо-сигнала в зависимости от времени на фиксированной глубине в диапазоне 14–24 м с шагом 1 м. Наиболее четкий результат получен для глубины 17 м, близкой к положению термоклина. Результат вейвлет-анализа этого горизонта показан на рис. 3. На рис. 3, а представлены в графическом виде локальные коэффициенты вейвлет-преобразования, ось абсцисс представляет собой ось времени регистрации серии лидарных эхо-сигналов, ось ординат — период. Рисунок 3, а представляет собой вейвлет-изображение, на котором видны все характерные особенности процесса — масштаб и интенсивность периодических изменений амплитуды лидарного эхо-сигнала на заданной глубине, а также наличие, расположение и длительность областей, соответствующих повышенным значениям вейвлет-коэффициентов. Сплошной черной линией выделены статистически значимые участки сигнала, имеющие 95 %-й уровень значимости по отношению к красному шуму. В нижней правой части рисунка выделяется статистически значимый участок сигнала с центральным периодом 6 мин и продолжительностью около 30 мин. Это указывает на наличие квазипериодического процесса с соответствующими характеристиками, проявляющегося в изменении амплитуды лидарных эхо-сигналов

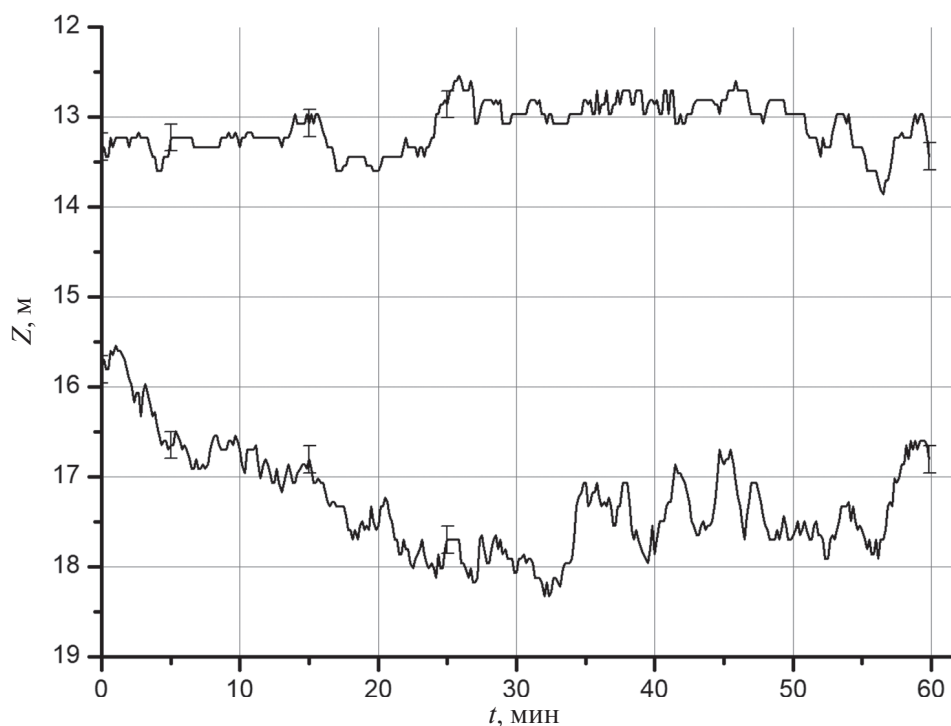


Рис. 2. Положение верхней и нижней границ промежуточного слоя, полученные в результате обработки данных лидарной съемки на галсе № 1 аппроксимационным методом

Fig. 2. The position of the upper and lower boundaries of the middle layer, obtained on the track No. 1 by the approximation method

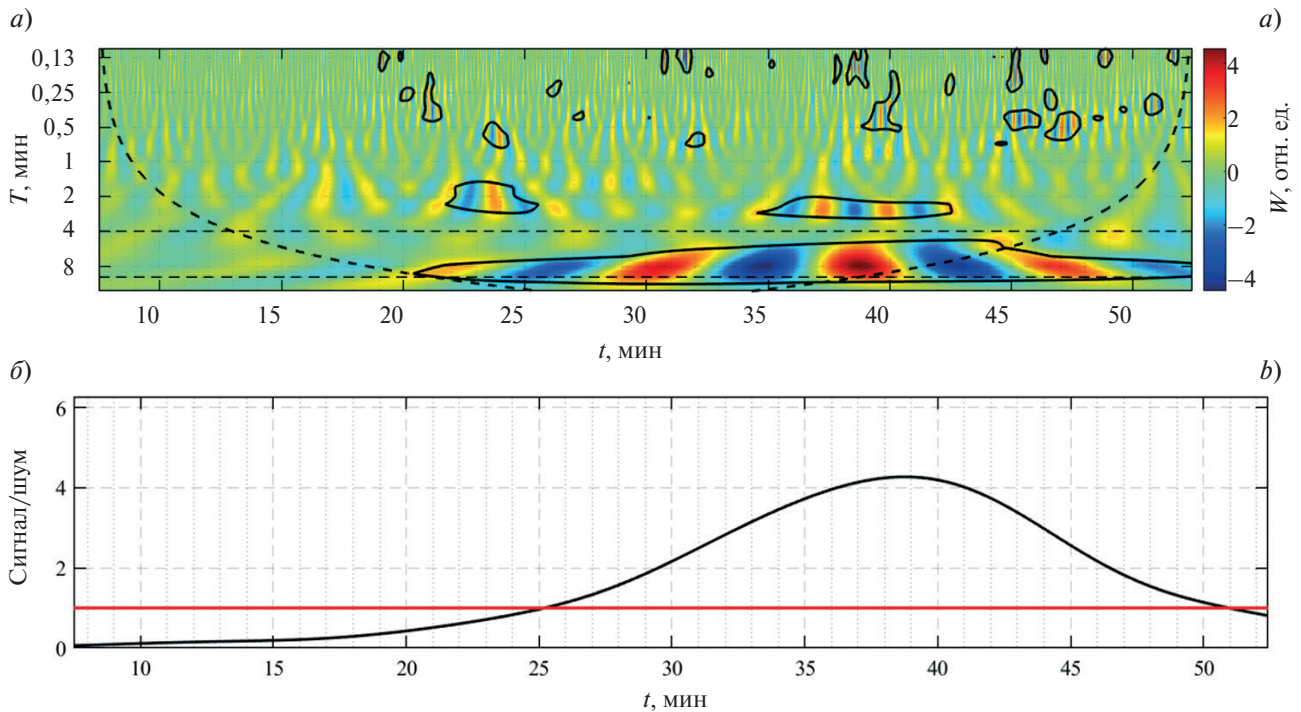


Рис. 3. Результат обработки данных галса № 1 с фиксированной глубины 17 м с помощью вейвлет-анализа: *a* — амплитуды коэффициентов вейвлет-преобразования; *b* — усредненная по временным масштабам мощность вейвлет-спектра, нормированная на 95-й % уровень значимости по отношению к фоновому красному шуму

Fig. 3. The result of data processing of the track No. 1 from a fixed depth of 17 m using wavelet analysis: *a* — the amplitudes of the wavelet transform coefficients; *b* — the time-averaged power of the wavelet spectrum, normalized to the 95 % significance level with respect to the red noise

на заданной глубине. Пунктирной кривой выделена зона сильного влияния краевых эффектов. Диапазон периодов, указанных на рисунке, определяется из выражения для расчета временных масштабов сигнала и зависит от дискретности и продолжительности исходного сигнала [23]. Пунктирные горизонтальные линии ограничивают временной диапазон, для которого рассчитывается усредненная по этим масштабам мощность вейвлет-спектра, показанная на рис. 3, *b*. За единицу принимается спектральная мощность красного шума. С 25-й по 50-ю минуту значения усредненного спектра мощности превосходят мощность красного шума, что подтверждает значимость колебаний в данном временном интервале.

Результат вейвлет-анализа данных того же галса, но полученных с глубины 14 м, показан на рис. 4. Колебания в рассматриваемом диапазоне периодов также выделяются на этой глубине, но расчет усредненного во временных масштабах от 4 до 8 мин спектра мощности, показанного на рис. 4, *b*, позволяет оценить значимость этих колебаний. Практически весь галс усредненный спектр мощности меньше единицы, что говорит о том, что данные сигналы хоть и обладают некоторой периодичностью, но их значимость мала. Этот результат согласуется с поведением верхней границы промежуточного слоя, положение которой было получено с использованием метода аппроксимаций (рис. 2).

Данные галса № 1 обрабатывались также с использованием метода Гильберта-Хуанга. На рис. 5 представлен спектр, рассчитанный для значений амплитуд лидарных эхо-сигналов на глубине 17 м. На рисунке показано поведение со временем внутренней модовой функции для временных диапазонов 1–8 мин. Цветом показана амплитуда представленной модовой функции, размерность амплитуды совпадает с размерностью исходной выборки с глубины. В спектре наблюдается волновой пакет в диапазоне 2–5 мин длительностью около 30 мин.

Результаты обработки галса № 2 представлены на рис. 6–8. На рис. 6 показан результат обработки галса методом аппроксимаций. Для эхо-сигналов в начале цикла были выбраны следующие интервалы глубин для подбора параметров аппроксимирующих функций: 11–13, 13–16 и 16–21 м. В отличие от галса № 1, зафиксированы синхронные колебания верхней и нижней границы промежуточного слоя. Максимальная амплитуда на верхней границе составляет 1 м, а на нижней — 2 м. Всего наблюдается 5 колебаний со средним периодом 8 мин.

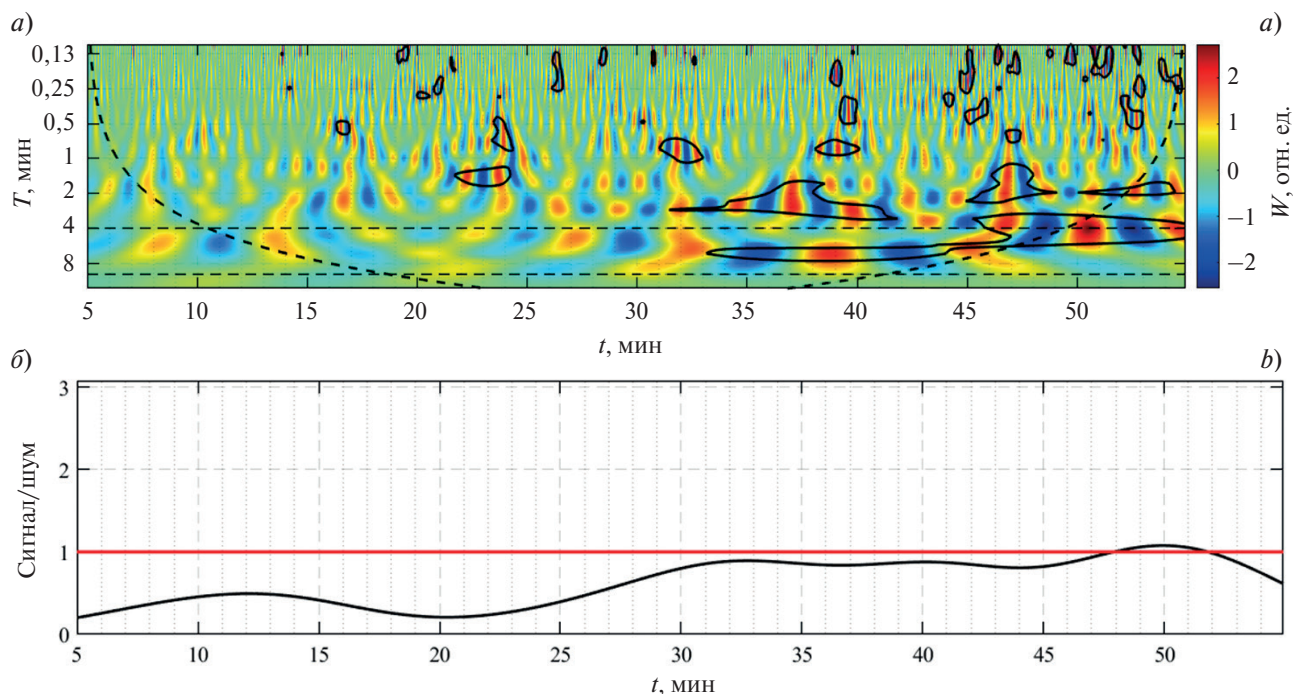


Рис. 4. Результат обработки данных галса № 1 с фиксированной глубины 14 м с помощью вейвлет-анализа: *a* — амплитуды коэффициентов вейвлет-преобразования, *b* — усредненная по временным масштабам мощность вейвлет-спектра, нормированная на 95 %-й уровень значимости по отношению к фоновому красному шуму

Fig. 4. The result of data processing of the track No. 1 from a fixed depth of 14 m using wavelet analysis: *a* — the amplitudes of the wavelet transform coefficients; *b* — the time-averaged power of the wavelet spectrum, normalized to the 95 % significance level with respect to the red noise

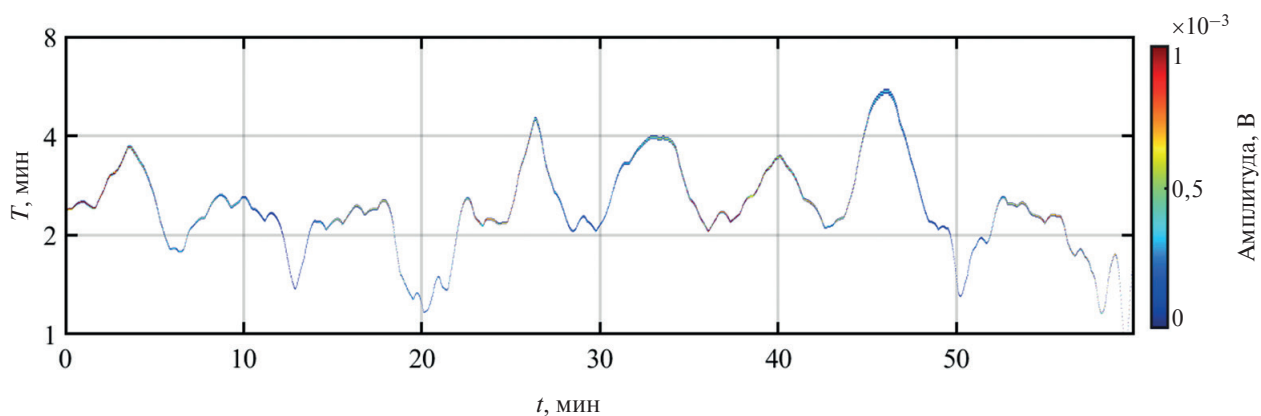


Рис. 5. Вид внутренней модовой функции, характеризуемой периодами от 1 до 8 мин, полученной при обработке распределения амплитуд эхо-сигналов с глубины 17 м на галсе № 1 методом Гильберта-Хуанга

Fig. 5. The intrinsic mode function, characterized by periods from 1 to 8 min, obtained by processing the distribution of echo signal amplitudes from the depth of 17 m on track No. 1 using the Hilbert-Huang transform

Вейвлет-анализ данных галса № 2 был выполнен для изменения значений амплитуд эхо-сигнала в зависимости от времени на фиксированной глубине в диапазоне 14–24 м с шагом 1 м. Наиболее четкий результат получен для глубины 18 м. Результат вейвлет-анализа для этого горизонта показан на рис. 7. Вейвлет-анализ позволяет выявить статистически значимые колебания с периодом, лежащим в интервале 4–8 мин, на протяжении практически всего галса.

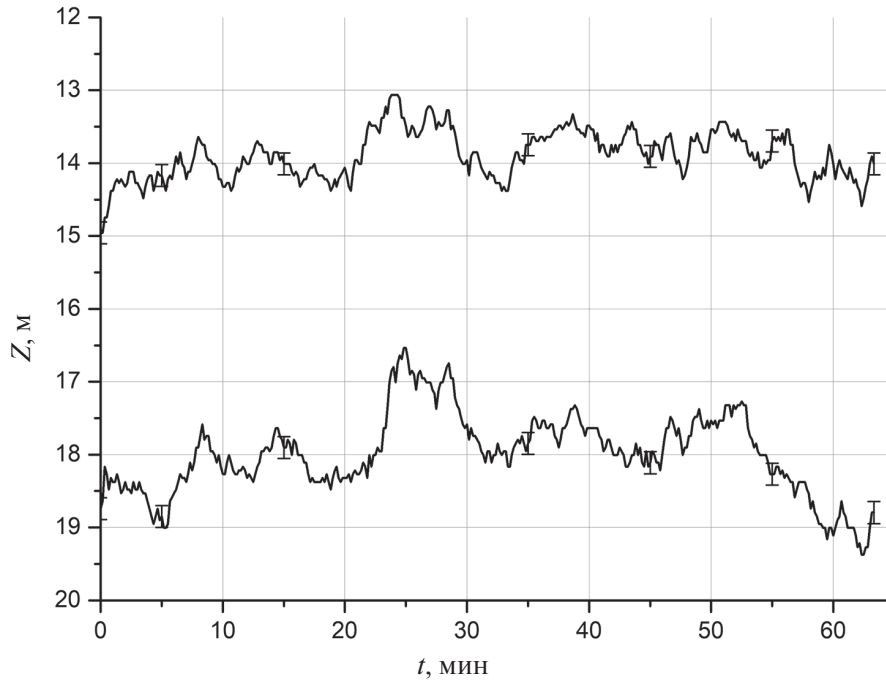


Рис. 6. Положение верхней и нижней границ промежуточного слоя, полученные в результате обработки данных лидарной съемки на галсе № 2 аппроксимационным методом

Fig. 6. The position of the upper and lower boundaries of the middle layer, obtained on the track No. 2 by the approximation method

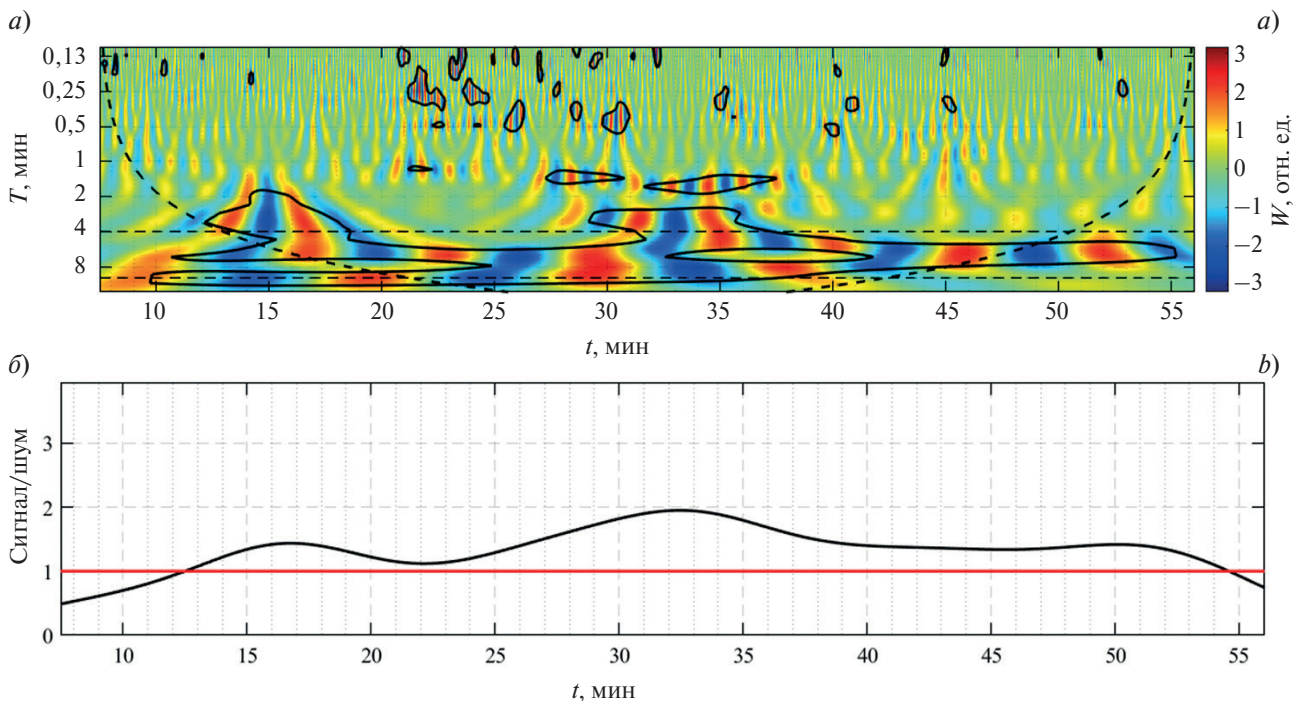


Рис. 7. Результат обработки данных галса № 2 с фиксированной глубины 18 м с помощью вейвлет-анализа: *a* — амплитуды коэффициентов вейвлет-преобразования, *b* — усредненная по временным масштабам мощность вейвлет-спектра, нормированная на 95%-й уровень значимости по отношению к фоновому красному шуму

Fig. 7. The result of data processing of the track No. 2 from a fixed depth of 18 m using wavelet analysis: *a* — the amplitudes of the wavelet transform coefficients; *b* — the time-averaged power of the wavelet spectrum, normalized to the 95% significance level with respect to the red noise

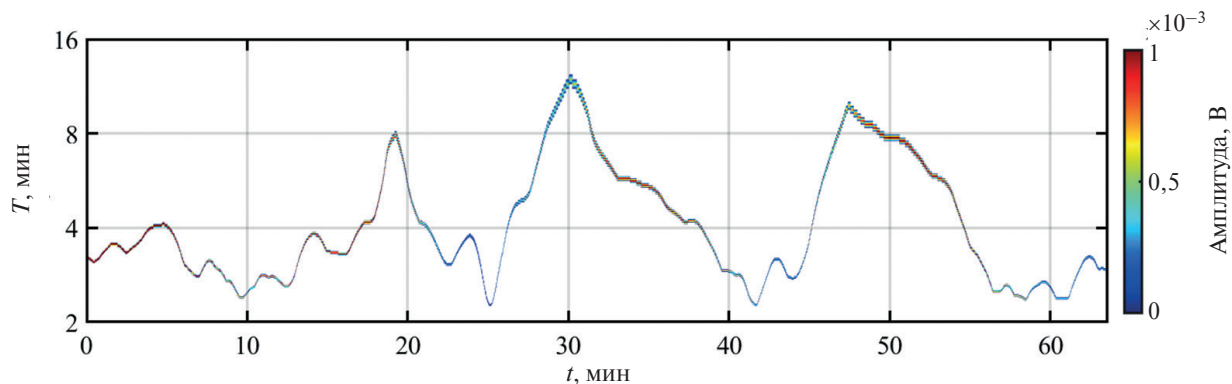


Рис. 8. Вид внутренней модовой функции, характеризуемой периодами 2–16 мин, полученной при обработке распределения амплитуд эхо-сигналов с глубины 18 м на галсе № 2 методом Гильберта-Хуанга

Fig. 8. The intrinsic mode function, characterized by periods from 2 to 16 min, obtained by processing the distribution of echo signal amplitudes from a depth of 18 m on track No. 2 using the Hilbert-Huang transform

Результат обработки данных галса № 2 с горизонта 18 м методом Гильберта-Хуанга представлен на рис. 8. На рисунке показано поведение со временем внутренней модовой функции для временных диапазонов 2–16 мин. В спектре наблюдается волновой пакет в диапазоне 2–12 мин, состоящий из трех колебаний. В отличие от метода аппроксимаций, метод Гильберта-Хуанга позволил четко выделить периодические структуры начиная с 15-й минуты. Это может быть связано с тем, что первые два колебания, выделенные методом аппроксимаций, резко отличаются от следующих за ними величин периода (порядка 5 мин) и не попадают в интервал разложения данной внутренней модовой функции.

Результаты обработки галса № 3 показаны на рис. 9–11. На рис. 9 приведен результат обработки галса методом аппроксимаций. Для эхо-сигналов в начале цикла были выбраны следующие интервалы глубин для подбора параметров аппроксимирующих функций: 11–13, 13–16 и 16–21 м. Отметим, что на нижней

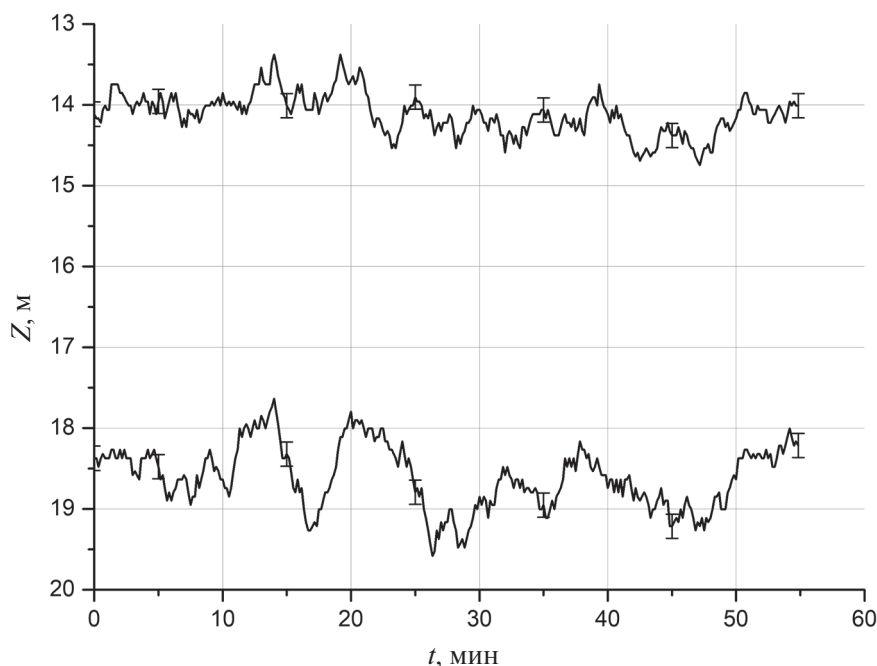


Рис. 9. Положение верхней и нижней границ промежуточного слоя, полученные в результате обработки данных лидарной съемки на галсе № 3 аппроксимационным методом

Fig. 9. The position of the upper and lower boundaries of the middle layer, obtained on the track No. 3 by the approximation method

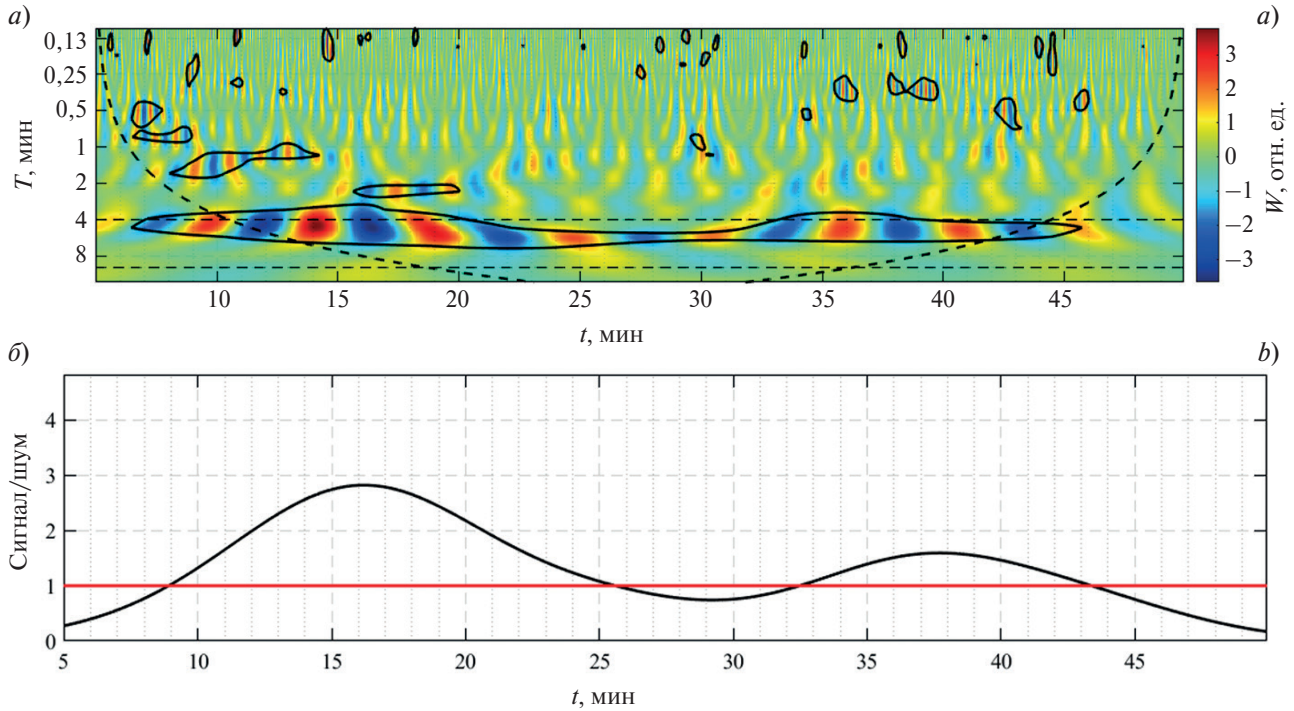


Рис. 10. Результат обработки данных галса № 3 с фиксированной глубины 18 м с помощью вейвлет-анализа: *a* — амплитуды коэффициентов вейвлет-преобразования, *b* — усредненная по временным масштабам мощность вейвлет-спектра, нормированная на 95 %-й уровень значимости по отношению к фоновому красному шуму

Fig. 10. The result of data processing of the track No. 3 from a fixed depth of 18 m using wavelet analysis: *a* — the amplitudes of the wavelet transform coefficients; *b* — the time-averaged power of the wavelet spectrum, normalized to the 95 % significance level with respect to the red noise

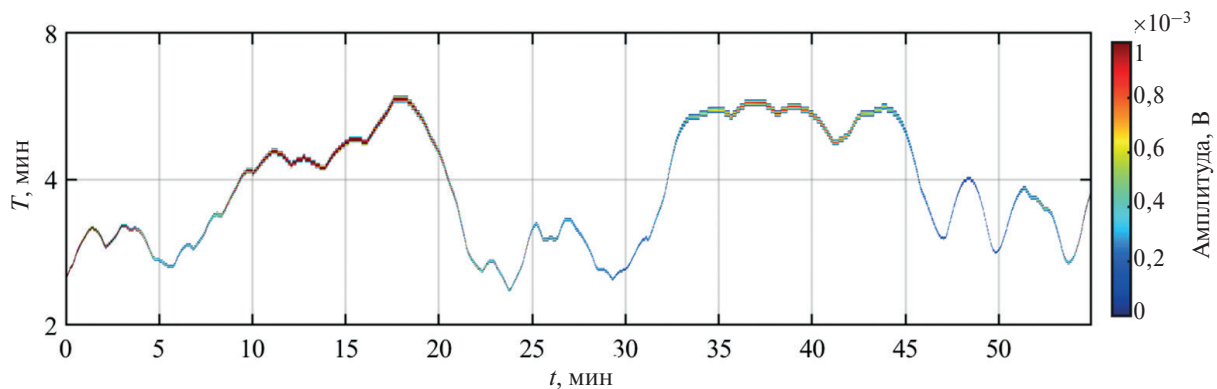


Рис. 11. Вид внутренней модовой функции, характеризуемой периодами 2–8 мин, полученной при обработке распределения амплитуд эхо-сигналов с глубины 18 м на галсе № 3 методом Гильберта-Хуанга

Fig. 11. The intrinsic mode function, characterized by periods from 2 to 8 min, obtained by processing the distribution of echo signal amplitudes from a depth of 18 m on track No. 3 using the Hilbert-Huang transform

границе выделяются четыре колебания, в то время как на верхней границе выделяются только два наиболее интенсивных. Максимальная амплитуда на верхней границе составляет 0,6 м, а на нижней — порядка 2 м. Средний период колебаний составляет 7 мин.

Аналогично галсу № 2, наиболее четкий результат применения вейвлет анализа к галсу № 3 был получен для глубины 18 м. Результаты расчетов приведены на рис. 10. Периодические структуры наблюдаются на протяжении практически всего галса. Наиболее интенсивные колебания наблюдаются в первой половине галса, что соответствует результату, полученному с использованием метода аппроксимаций.

На рис. 11 представлен спектр Гильберта-Хуанга, полученный для глубины 18 м. Видно, что в спектре выделяются колебания со средним периодом 6–7 мин, занимающие большую часть галса. При этом наиболее интенсивные колебания наблюдаются в первой половине галса, что показано цветом на рис. 11, и соответствует результатам, показанным на рис. 9 и 10.

Измерения характеристик ВВ проводилось на ходу судна при скорости судна 4 узла (2 м/с). Измеренные гидрологические характеристики в районе работ позволяют получить оценку фазовой скорости ВВ. Она составляет 0,5 м/с. Однако направление движения ВВ в эксперименте не определялось. Поэтому для измеренного периода ВВ 6 мин можно оценить только границы интервала измеряемых длин волн: 540 м в случае движения судна навстречу волне, и 900 м при совпадении направления движения судна и волны. Реальное значение длины волны зависит от величины угла между векторами скоростей судна и ВВ и располагается в этом интервале.

Результаты, полученные с использованием спектральных методов, а именно период и локализация квазипериодических структур на галсе, для всех трех галсов достаточно хорошо согласуются между собой и с результатом, полученным аппроксимационным методом. Некоторые расхождения в положении и периодах выделенных колебаний обусловлены нестрогой периодичностью и малым количеством периодов, затрудняющих спектральный анализ.

4. Заключение

Выполненная комплексная обработка массива данных судовой лидарной съемки прибрежных районов Черного моря направлена на поиск и определение параметров квазипериодических структур, обусловленных распространением ВВ. Использовано три метода обработки. Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки. Наиболее наглядным является аппроксимационный метод, позволяющий получить картину вертикальных смещений областей с резкими градиентами показателя ослабления, приуроченных к слою скачка плотности. Преимуществом примененных спектральных методов — вейвлет-анализа и преобразования Гильберта-Хуанга — является возможность быстрой обработки большого массива данных, позволяющая определить период и локализацию квазипериодических процессов. Результаты, полученные каждым из трех методов, в целом соответствуют друг другу. Некоторые количественные расхождения могут быть обусловлены нестрогой периодичностью исследуемых процессов и малым количеством колебаний в цуге, затрудняющие проведение спектрального анализа. В настоящее время в аппроксимационном методе используется метод экспертной оценки, что делает его применение весьма трудоемким. Поэтому при обработке больших массивов данных целесообразно на первом этапе проводить быструю обработку автоматизированными спектральными методами, а детальную обработку аппроксимационным методом проводить только для тех участков съемки, на которых выявлены квазипериодические процессы. Такой подход позволяет относительно быстро получить наиболее полную информацию.

Описанные в работе методы можно применить для обработки данных авиационной лидарной съемки, обладающей рядом преимуществ — высокой производительностью и возможностью получать синоптическую картину проявления динамических процессов, протекающих в приповерхностном слое морской воды.

При продолжении работ необходимо провести исследования в водах с другими типами стратификации, при этом лидарное зондирование должно сопровождаться синхронными контактными измерениями гидрофизических и гидрооптических характеристик.

Финансирование

Экспериментальные исследования и обработка зарегистрированного массива данных спектральными методами была выполнена в рамках государственного задания по теме № FMWE-2021–0014. Обработка зарегистрированного массива данных аппроксимационным методом выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ проект № 075–15–2021–934 («Исследование антропогенных и естественных факторов изменений состава воздуха и объектов окружающей среды в Сибири и Российском секторе Арктики в условиях быстрых изменений климата с использованием УНУ «Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик»»).

Funding

Experimental studies and processing of the registered data array by spectral methods were carried out as part of the state assignment No. FMWE-2021–0014. The processing of the registered data array by the approximation method was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation

project No. 075-15-2021-934 (The study of anthropogenic and natural factors of changes in the composition of air and environmental objects in Siberia and the Russian sector of the Arctic in conditions of rapid climate change using the Tu-134 Optik flying laboratory).

Литература

1. *Vasilkov A.P., Goldin Yu.A., Gureev B.A., Hoge F.E., Swift R.N., Wright C.W.* Airborne polarized lidar detection of scattering layers in the ocean // *Applied Optics*. 2001. Vol. 40, N 24. P. 4353–4364. doi:10.1364/AO.40.004353
2. *Churnside J.H., Donaghay P.L.* Thin scattering layers observed by airborne lidar // *ICES Journal of Marine Science*. 2009. Vol. 66, N4. P. 778–789. doi:10.1093/icesjms/fsp029
3. *Collister B.L., Zimmerman R.C., Hill V.J., Sukenik C.I., Balch W.M.* Polarized lidar and ocean particles: insights from a mesoscale coccolithophore bloom // *Applied Optics*. 2020. Vol. 59, N 15. P. 4650–4662. doi:10.1364/AO.389845
4. *Churnside J.H., Brown E.D., Parker-Stetter S., Horne J.K., Hunt G.L., Hillgruber N., Sigler M.F., Vollenweider J.J.* Airborne remote sensing of a biological hot spot in the southeastern Bering Sea // *Remote Sensing*. 2011. Vol. 3, N 3. P. 621–637. doi:10.3390/rs3030621
5. *Goldin Y.A., Vasilev A.N., Lisovskiy A.S., Chernook V.I.* Results of Barents Sea airborne lidar survey // *Proceedings SPIE. Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters (13 April 2007)*. 2007. Vol. 6615. P. 126–136. doi:10.1117/12.740456
6. *Zhong C., Chen P., Pan D.* An Improved Adaptive Subsurface Phytoplankton Layer Detection Method for Ocean Lidar Data // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, N 19. P. 3875. doi:10.3390/rs13193875
7. *Churnside J.H., Ostrovsky L.A.* Lidar observation of a strongly nonlinear internal wave train in the Gulf of Alaska // *International Journal of Remote Sensing*. 2005. Vol. 26, N 1. P. 167–177. doi:10.1080/01431160410001735076
8. *Bukin O.A., Major A.Y., Pavlov A.N., Shevtsov B.M., Kholodkevich E.D.* Measurement of the lightscattering layers structure and detection of the dynamic processes in the upper ocean layer by shipborne lidar // *International Journal of Remote Sensing*. 1998. Vol. 19, N 4. P. 707–715. doi:10.1080/014311698215946
9. *Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Родионов М.А.* Лидарный метод регистрации внутренних волн в водах с двухслойной стратификацией гидрооптических характеристик // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14, № 3. С. 86–97. doi:10.7868/S2073667321030084
10. *Hoge F.E., Wright C.W., Krabill W.B., Buntzen R.R., Gilbert G.D., Swift R.N., Berry R.E.* Airborne lidar detection of subsurface oceanic scattering layers // *Applied Optics*. 1988. Vol. 27, N19. P. 3969–3977. doi:10.1364/AO.27.003969
11. *Goldin Y.A., Gureev B.A., Ventskut Y.I.* Shipboard polarized lidar for seawater column sounding // *Proceedings SPIE. Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters (13 April 2007)*. 2007. Vol. 6615. P. 152–159. doi:10.1117/12.740466
12. *Гольдин Ю.А., Гуреев Б.А., Родионов М.А., Глухов В.А.* Морской поляризационный лидар ПЛД-1 // *Труды XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (Санкт-Петербург, 2016)*. Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский научный центр РАН, 2016. С. 215–217.
13. *Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Родионов М.А.* Экспериментальная оценка возможностей лидара ПЛД-1 по регистрации гидрооптических неоднородностей в толще морской среды // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 2. С. 41–48. doi:10.7868/S207366731702006X
14. *Goldin Yu.A., Rogozkin D.B., Sheberstov S.V.* Polarized Lidar Sounding of Stratified Seawater // *Proceedings of IV International Conference “Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW’2007)”*. Nizhny Novgorod, 2007. P. 175–178.
15. *Химченко Е.Е., Серебряный А.Н.* Внутренние волны на Кавказском и Крымском шельфах Черного моря (по летне-осенним наблюдениям 2011–2016 гг.) // *Океанологические исследования*. 2018. Т. 46, № 2, С. 69–87. doi:10.29006/1564–2291.JOR-2018.46(2).7
16. *Серебряный А.Н., Иванов В.А.* Исследования внутренних волн в Черном море с океанографической платформы МГИ // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2013. № 3. С. 34–45.
17. *Зимин А.В., Свергун Е.И.* Анализ характеристик и оценка ожидаемых высот внутренних волн на шельфе Крыма по данным экспедиции летом 2016 года // *Труды всероссийской научно-практической конференции «IV Феодосийские научные чтения» (Санкт-Петербург, 11–12 сентября 2017 г.)*. Феодосия: МБУК ФМД, «Арт-Лайф», 2017. С. 230–234.
18. *Лаврова О.Ю., Серебряный А.Н., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю.* Подспутниковые наблюдения мелкомасштабных гидродинамических процессов в северо-восточной части Черного моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10, № 4. С. 308–322.
19. *Иванов В.А., Шульга Т.Я., Багаев А.В., Медведева А.В., Пластун Т.В., Вержевская Л.В., Свищева И.А.* Внутренние волны на шельфе Черного моря в районе Гераклеийского полуострова: моделирование и наблюдение // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 4. doi:10.22449/0233-7584-2019-4-322-340

20. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145–1170. doi:10.3367/UFN.0166.199611a.1145
21. Жегулин Г.В. Использование вейвлет-анализа для оценки связи гидрологических и гидрооптических колебаний в диапазоне внутренних волн по данным натуральных наблюдений в Белом море // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9, № 3. С. 48–56.
22. Press W.H., Teukolsky S.A. Savitzky–Golay smoothing filters // Computers in Physics. 1990. Vol. 4, N 6. P. 669–672. doi:10.1063/1.4822961
23. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 176 с.
24. Huang N.E., Wu Z. A review on Hilbert–Huang transform: Method and its applications to geophysical studies // Reviews of Geophysics. 2008. Vol. 46, N 2. doi:10.1029/2007RG000228
25. Навроцкий В.В., Ляпидевский В.Ю., Павлова Е.П., Храпченко Ф.Ф. Внутренние волны и перемешивание в шельфовой зоне моря // Известия ТИНРО (Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра). 2010. Т. 162. С. 324–337.
26. Навроцкий В.В., Лобанов В.Б., Сергеев А.Ф., Воронин А.А., Горин И.И., Павлова Е.П. Динамическая структура каскадинга в заливе Петра Великого (Японское море) // Океанологические исследования. 2020. Т. 48, № 3. С. 148–163. doi:10.29006/1564–2291.JOR-2020.48(3).9
27. Dätig M., Schlurmann T. Performance and limitations of the Hilbert–Huang transformation (ННТ) with an application to irregular water wave // Ocean Engineering. 2004. Vol. 31, N 14–15. P. 1783–1834. doi:10.1016/j.oceaneng.2004.03.007
28. Ezer T., Heyman W.D., Houser C., Kjerfve B. Modeling and observations of high-frequency flow variability and internal waves at a Caribbean reef spawning aggregation site // Ocean Dynamics. 2010. Vol. 61, N 5. P. 581–598. doi:10.1007/s10236-010-0367-2

References

1. Vasilkov A.P., Goldin Yu.A., Gureev B.A., Hoge F.E., Swift R.N., and Wright C.W. Airborne polarized lidar detection of scattering layers in the ocean. *Applied Optics*. 2001, 40, 4353–4364. doi:10.1364/AO.40.004353
2. Churnside J.H., Donaghay P.L. Thin scattering layers observed by airborne lidar. *ICES Journal of Marine Science*. 2009, 66(4), 778–789. doi:10.1093/icesjms/fsp029
3. Collister B.L., Zimmerman R.C., Hill V.J., Sukenik C.I., Balch W.M. Polarized lidar and ocean particles: insights from a mesoscale coccolithophore bloom. *Applied Optics*. 2020, 59(15), 4650–4662. doi:10.1364/AO.389845
4. Churnside J.H., Brown E.D., Parker-Stetter S., Horne J.K., Hunt G.L., Hillgruber N., Sigler M.F., Vollenweider J.J. Airborne remote sensing of a biological hot spot in the southeastern Bering Sea. *Remote Sensing*. 2011, 3(3), 621–637. doi:10.3390/rs3030621
5. Goldin Y.A., Vasilev A.N., Lisovskiy A.S., Chernook V.I. Results of Barents Sea airborne lidar survey. *Proceedings SPIE. Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters (13 April 2007)*. 2007, 6615E, 126–136. doi:10.1117/12.740456
6. Zhong C., Chen P., Pan D. An improved adaptive subsurface phytoplankton layer detection method for ocean lidar data. *Remote Sensing*. 2021, 13(19), 3875. doi:10.3390/rs13193875
7. Churnside J.H., Ostrovsky L.A. Lidar observation of a strongly nonlinear internal wave train in the Gulf of Alaska. *International Journal of Remote Sensing*. 2005, 26(1), 167–177. doi:10.1080/01431160410001735076
8. Bukin O.A., Major A.Y., Pavlov A.N., Shevtsov B.M., Kholodkevich E.D. Measurement of the lightscattering layers structure and detection of the dynamic processes in the upper ocean layer by shipborne lidar. *International Journal of Remote Sensing*. 1998, 19(4), 707–715. doi:10.1080/014311698215946
9. Glukhov V.A., Goldin Yu.A., Rodionov M.A. Method of internal waves registration by lidar sounding in case of waters with two-layer stratification of hydrooptical characteristics. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2021, 14(3), 86–97 (In Russian). doi:10.7868/S2073667321030084
10. Hoge F.E., Wright C.W., Krabill W.B., Buntzen R.R., Gilbert G.D., Swift R.N., Berry R.E. Airborne lidar detection of subsurface oceanic scattering layers. *Applied Optics*. 1988, 27(19), 3969–3977. doi:10.1364/AO.27.003969
11. Goldin Y.A., Gureev B.A., Ventskut Y.I. Shipboard polarized lidar for seawater column sounding. *Proceedings SPIE. Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters (13 April 2007)*. 2007, 6615, 152–159. doi:10.1117/12.740466
12. Goldin Yu.A., Rodionov M.A., Gureev B.A., Glukhov V.A. Marine polarization lidar PLD-1. *Proceedings of XIII All-Russian Conference “Advanced Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics” (St. Petersburg, 2016)*. St. Petersburg, Saint-Petersburg Research Center of RAS, 2016, 215–217 (In Russian).

13. *Glukhov V.A., Goldin Yu.A., Rodionov M.A.* Experimental estimation of the capabilities of the lidar PLD-1 for the registration of various hydro-optical irregularities of the sea water column. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2017, 10(2), 41–48 (In Russian). doi:10.7868/S207366731702006X
14. *Goldin Yu.A., Rogozkin D.B., Sheberstov S.V.* Polarized lidar sounding of stratified seawater. *Proceedings of IV International Conference “Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW’2007)”*. Nizhny Novgorod, 2007, 175–178.
15. *Khimchenko E.E., Serebryany A.N.* Internal waves on the Caucasian and Crimean shelves of the Black Sea (according to summer-autumn observations 2011–2016). *Journal of Oceanological Research*. 2018, 46(2), 69–87 (In Russian). doi:10.29006/1564–2291.JOR-2018.46(2).7
16. *Serebryany A.N., Ivanov V.A.* Study of internal waves in the Black Sea from oceanography platform of Marine Hydrophysical Institute. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2013, 3, 34–45 (In Russian).
17. *Zimin A.V., Svergun E.I.* Analysis of the characteristics and assessment of the expected heights of internal waves on the Crimean shelf according to the expedition data in the summer of 2016. *Proceedings of the Russian Scientific and Practical Conference “IV Feodosia Scientific Readings”* (St. Petersburg, September 11–12, 2017). Feodosia, Art-Life, 230–234 (in Russian).
18. *Lavrova O.Y., Serebryany A.N., Mityagina M.I., Bocharova T.Y.* Subsatellite observations of small-scale hydrodynamic processes in the northeastern Black Sea. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2013, 10(4), 308–322 (in Russian).
19. *Ivanov V.A., Shul’ga T. Ya., Bagaev A.V., Medvedeva A.V., Plastun T.V., Verzhavskaia L.V., Svishcheva I.A.* Internal waves on the Black Sea shelf near the Heracles Peninsula: Modeling and observation. *Physical Oceanography*. 2019, 26(4), 288–304. doi:10.22449/1573-160X-2019-4-288-304
20. *Astaf’eva N.M.* Wavelet analysis: basic theory and some applications. *Physics-Uspokhi*. 1996, 39(11), 1085. doi:10.1070/PU1996v039n11ABEH000177
21. *Zhegulina G.V.* Using wavelet analysis to assess the relationship of hydrological and hydrooptical oscillations in the range of internal waves according to in situ observations in the White Sea. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2016, 9(3), 48–56 (in Russian).
22. *Press W.H., Teukolsky S.A.* Savitzky–Golay smoothing filters. *Computers in Physics*. 1990, 4(6), 669–672. doi:10.1063/1.4822961
23. *Koronovskiy A.A., Khramov A.E.* Continuous wavelet analysis and its applications. *Moscow, FIZMATLIT*, 2003. 176 p. (in Russian).
24. *Huang N.E., Wu Z.* A review on Hilbert–Huang transform: Method and its applications to geophysical studies. *Reviews of Geophysics*. 2008, 46(2). doi:10.1029/2007RG000228
25. *Navrotsky V.V. et al.* Internal waves and mixing in the shelf zone of the sea. *Izvestia TINRO* (Pacific Research Fisheries Center). 2010, 162, 324–337 (in Russian).
26. *Navrotsky V.V., Lobanov V.B., Sergeev A.F., Voronin A.A., Gorin I.I., Pavlova E.P.* Dynamic structure of cascading in the Peter the Great Bay (Sea of Japan). *Oceanological Research*. 2020, 48(3), 148–163 (in Russian). doi:10.29006/1564–2291.JOR-2020.48(3).9
27. *Dätig M., Schlurmann T.* Performance and limitations of the Hilbert–Huang transformation (HHT) with an application to irregular water wave. *Ocean Engineering*. 2004, 31(14–15), 1783–1834. doi:10.1016/j.oceaneng.2004.03.007
28. *Ezer T., Heyman W.D., Houser C., Kjerfve B.* Modeling and observations of high-frequency flow variability and internal waves at a Caribbean reef spawning aggregation site. *Ocean Dynamics*. 2010, 61(5), 581–598. doi:10.1007/s10236-010-0367-2

Об авторах

ГЛУХОВ Владимир Алексеевич	Научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова, Российской академии наук (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), ROR 00n1e1p60	ORCID ID: 0000-0003-4555-8879, WoS ResearcherID: GSD-4886-2022, Scopus AuthorID: 57191414331, elibrary AuthorID: 916467, e-mail: vl.glukhov@inbox.ru
ГОЛЬДИН Юрий Анатольевич	Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова, Российской академии наук (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), ROR 00n1e1p60	ORCID ID: 0000-0001-5731-5458, Scopus AuthorID: 6602648464, elibrary AuthorID: 58653, e-mail: goldin@ocean.ru

Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Жегулин Г.В., Родионов М.А.

Glukhov V.A., Goldin Yu.A., Zhegulin G.V., Rodionov M.A.

ЖЕГУЛИН Глеб Викторович	Научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова, Российской академии наук (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), ROR 00n1e1p60	ORCID ID: 0000-0002-8762-0899, WoS ResearcherID: AAP-7395-2021, Scopus AuthorID: 57195070290, elibrary AuthorID: 768992, e-mail: gleb-jegulin@rambler.ru
РОДИОНОВ Максим Анатольевич	Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова, Российской академии наук (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), ROR 00n1e1p60	ORCID ID: 0000-0002-7397-0548, Scopus AuthorID: 56034199200, elibrary AuthorID: 203807, e-mail: maxim_rodionov@mail.ru