

УДК 551.46.08

© В. А. Глухов^{*1}, Ю. А. Гольдин¹, О. В. Глитко¹, Д. И. Глуховец^{1,2}, М. А. Родионов¹, 2024

¹Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, 117997, Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701, Институтский пер., 9, г. Долгопрудный, Московская область, Россия

*vl.glukhov@inbox.ru

СОПОСТАВЛЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ОРТОГОНАЛЬНО ПОЛЯРИЗОВАННЫХ КОМПОНЕНТ ЛИДАРНОГО ЭХО-СИГНАЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Статья поступила в редакцию 29.05.2024, после доработки 26.07.2024, принята в печать 10.09.2024

Аннотация

С использованием двухканального судового поляризационного лидара ПЛД-1 на станциях с однородным вертикальным распределением гидрооптических характеристик приповерхностного слоя выполнена серия лидарных измерений. Лидарное зондирование сопровождалось синхронными сопутствующими контактными измерениями ряда гидрооптических характеристик. Получен большой массив данных измерений, выполненных в водах с гидрооптическими характеристиками, меняющимися в широких пределах. В результате статистической обработки этих данных получены регрессионные соотношения, связывающие показатель ослабления s , показатель поглощения a и показатель диффузного ослабления света K_d с показателями ослабления ко- и кросс-поляризованных компонент лидарного эхо-сигнала. В большинстве случаев наблюдается линейная связь гидрооптических характеристик с показателями ослабления поляризованных компонент лидарного эхо-сигнала. Эти связи характеризуются высокими значениями коэффициента детерминации — от 0,8 до 0,95. Исключение составляет связь показателя ослабления света s и показателя ослабления кросс-поляризованной компоненты лидарного эхо-сигнала, где для описания этой связи используется полином второй степени (коэффициент детерминации 0,88). Данные о гидрооптических характеристиках, полученные с использованием кросс-поляризованной компоненты лидарного эхо-сигнала, в основном дублируют данные ко-поляризованной компоненты. Однако использование двухканальной регистрирующей системы повышает надежность и достоверность получаемых данных и обеспечивает возможность контроля однородности подводного участка трассы зондирования.

Ключевые слова: морской поляризационный лидар, гидрооптические характеристики, регрессионные соотношения

UDC 551.46.08

© V. A. Glukhov^{*1}, Yu. A. Goldin¹, O. V. Glitko¹, D. I. Glukhovets^{1,2}, M. A. Rodionov¹, 2024

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

²Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 141701, Institutskiy per., 9, Dolgoprudny, Moscow region, Russia

*vl.glukhov@inbox.ru

A COMPARISON OF THE INFORMATION CONTENT OF ORTHOGONALLY POLARIZED COMPONENTS OF LIDAR ECHO SIGNAL FOR EVALUATING HYDROOPTICAL CHARACTERISTICS OF THE NEAR-SURFACE LAYER

Received 29.05.2024, Revised 26.07.2024, Accepted 10.09.2024

Abstract

A series of lidar measurements were conducted at stations with a homogeneous vertical distribution of hydrooptical characteristics in the near-surface layer using a two-channel shipborne polarization lidar PLD-1. Lidar sounding was accompanied by synchronous contact measurements of a number of hydrooptical characteristics. A large dataset of measurement data was ob-

Ссылка для цитирования: Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Глитко О.В., Глуховец Д.И., Родионов М.А. Сопоставление информативности ортогонально поляризованных компонент лидарного эхо-сигнала для оценки гидрооптических характеристик приповерхностного слоя // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 3. С. 32–43.

doi:10.59887/2073-6673.2024.17(3)-3

For citation: Glukhov V.A., Goldin Yu.A., Glitko O.V., Glukhovets D.I., Rodionov M.A. A comparison of the Information Content of Orthogonally Polarized Components of Lidar Echo Signal for Evaluating Hydrooptical Characteristics of the Near-Surface Layer. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(3):32–43. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(3)-3

tained in waters where hydrooptical characteristics varied widely. As a result of the statistical processing of these data, regression relationships were obtained linking the seawater beam attenuation coefficient c , absorption coefficient a , and diffuse attenuation coefficient K_d to the lidar attenuation coefficients of the co- and cross-polarized components. In most cases, a linear relationship between hydrooptical characteristics and the lidar attenuation coefficients of the polarized components is observed. These relationships are characterized by high values of the coefficient of determination — from 0.8 to 0.95. An exception is the relationship between the seawater beam attenuation coefficient c and the lidar attenuation coefficient of the cross-polarized component, where a second-degree polynomial is used to describe this relationship (coefficient of determination is 0.88). Data on the hydrooptical characteristics obtained using the cross-polarized component of the lidar echo signal mostly duplicate the data of the co-polarized component. However, the use of a two-channel optical receiving system increases the reliability and accuracy of the obtained data and provides the possibility of controlling the homogeneity of the underwater section of the sounding path.

Keywords: marine polarized lidar, hydrooptical characteristics, regression relationship

1. Введение

Морские радиометрические лидары, а также лидары высокого спектрального разрешения с радиометрическим каналом (HSRL — high spectral resolution lidar), позволяют дистанционно оценивать величины гидрооптических характеристик приповерхностного слоя морской воды [1–10]. Это дает возможность проводить исследования пространственных распределений гидрооптических характеристик с движущихся судов без использования погружных, буксируемых или проточных систем.

Лидарный эхо-сигнал содержит информацию о гидрооптических характеристиках морской воды. Существует несколько подходов к разработке методов извлечения этой информации. Один из них — построение схемы зондирования таким образом, чтобы какой-либо из параметров лидарного эхо-сигнала зависел только от одной гидрооптической характеристики [2, 4, 11]. Например, при достаточно больших углах поля зрения приемной оптической системы лидара судового базирования ($2\gamma \sim 15\text{--}20^\circ$) показатель ослабления лидарного эхо-сигнала α приближается по своему значению к показателю диффузного ослабления света K_d [1–4, 8–10]. Однако при таких углах происходит размытие информации о неоднородностях вертикального распределения гидрооптических характеристик [3]. В работах [11] для измерения ряда первичных гидрооптических характеристик теоретически обосновано несколько процедур зондирования — с изменением угла поля зрения приемной оптической системы и с изменением угла зондирования в процессе измерений, а также с использованием приемников с разными диаграммами направленности. Это позволяет получить оценку нескольких гидрооптических характеристик, но усложняет конструкцию лидара и существенно увеличивает время, необходимое для проведения измерения в каждой точке, что затрудняет их использование при выполнении лидарной съемки с движущихся судов.

Другое направление заключается в использовании радиометрических лидаров с «классической» схемой с достаточно узким углом поля зрения приемной системы и установлении регрессионных соотношений между параметрами лидарных эхо-сигналов и гидрооптическими характеристиками [5]. Недостатком этого метода является применимость полученных регрессионных соотношений только к конкретной схеме зондирования.

В подавляющем большинстве случаев в радиометрических лидарах используется твердотельный лазер на АИГ: Nd^{3+} с преобразованием частоты во вторую гармонику [1]. Излучение этих лазеров линейно поляризовано. Во многих лидарах проводится регистрация двух взаимно-ортогональных поляризованных компонент эхо-сигнала — ко-поляризованной компоненты $P_{co}(t)$ и кросс-поляризованной компоненты $P_{cross}(t)$. Процессам формирования поляризованных компонент эхо-сигнала посвящен ряд работ [12–16]. Предлагается использовать величину отношения деполаризации лидарного эхо-сигнала $\delta(t)$, равную:

$$\delta\left(t = \frac{2z}{c_w}\right) = \frac{P_{cross}(t)}{P_{co}(t)}, \quad (1)$$

в качестве параметра, характеризующего воды с различными значениями гидрооптических характеристик [17, 18]. Здесь t — время, отсчитываемое от момента пересечения поверхности воды зондирующим импульсом, c_w — скорость света в морской воде. В работах [19, 20] предложен подход к решению обратной задачи извлечения показателя рассеяния $b(z)$, основанный на использовании информации о глубинной зависимости степени деполаризации эхо-сигнала, определяющейся как

$$g\left(t = \frac{2z}{c_w}\right) = \frac{P_{co}(t) - P_{cross}(t)}{P_{co}(t) + P_{cross}(t)}. \quad (2)$$

Трудность практического применения данного выражения связана с необходимостью использования априорной информации о значениях фактора депolarизации Φ , которое не может быть получено в рамках лидарного зондирования.

В работах [3–5, 8, 9] найдены регрессионные зависимости между параметрами лидарных эхо-сигналов и гидрооптическими характеристиками для ко-поляризованной компоненты эхо-сигнала, либо без учета поляризации принимаемого излучения. Интерес представляет нахождение таких регрессионных зависимостей для обоих ортогонально поляризованных компонент эхо-сигнала и выявление возможных особенностей, вносимых учетом поляризации.

Цель данной работы — определить связь ряда гидрооптических характеристик, изменяющихся в широком диапазоне, с параметрами поляризованных компонент лидарных эхо-сигналов для лидара судового базирования с относительно узким углом поля зрения.

2. Материалы и методы

2.1. Описание аппаратуры

Для проведения исследований использован судовый поляризационный лидар ПЛД-1 (разработка ИО РАН [20]). Двухканальная приемная система лидара предназначена для регистрации ко- и кросс-поляризованных компонент эхо-сигнала. Поляризационная селекция осуществляется пленочными поляроидами, установленными перед объективами. Основные технические характеристики лидара приведены в таблице 1.

Высота установки оптического блока лидара над поверхностью воды составляла около 15 м. Угол зондирования $\theta = 20^\circ$ от вертикали. Протяженность воздушного участка трассы зондирования H составляла около 16 м.

Лидарная съемка сопровождалась комплексом сопутствующих измерений. На станциях с помощью погружаемого прозрачномера ПУМ-200 (разработка ИО РАН [21]) выполнялись измерения вертикальных профилей показателя ослабления света морской водой c на длине волны $\lambda = 530$ нм, температуры морской воды, а также интенсивности флуоресценции хлорофилла «а». Точность измерения c в диапазоне 0,050–1,0 м⁻¹ составляет 0,005 м⁻¹.

Измерения спектров поглощения света морской водой $a(\lambda)$ выполнялись с помощью портативного спектрофотометра с интегрирующей сферой ICAM (Integrating Cavity Absorption Meter) [22]. Измерения выполнялись на пробах, отобранных на станциях. Обработка данных проводилась согласно методике [23]. Точность измерения показателя поглощения составляла 0,05 м⁻¹. Измеренный набор значений показателя ослабления и показателя поглощения на длине волны 530 нм позволил рассчитать вероятность выживания фотона $\omega_0 = b/c$, где показатель рассеяния определялся как $b = c - a$. Разница измеряемых величин гидрооптических характеристик на длинах волн $\lambda = 530$ нм и $\lambda = 532$ нм мала по сравнению с погрешностью измерений и ей можно пренебречь. Для простоты значение длины волны у соответствующих гидрооптических характеристик в дальнейшем опускается.

Таблица 1

Table 1

Основные технические характеристики лидара ПЛД-1
 Main technical characteristics of PLD-1 lidar

Характеристика	Значение
Длина волны зондирующего излучения, нм	532
Длительность зондирующего импульса, нс	7
Энергия зондирующего импульса, мДж	20
Частота зондирования, Гц	1
Расходимость зондирующего пучка, мрад	5
Тип поляризации зондирующего излучения	Линейная
Угол поля зрения приемной оптической системы ко-поляризованного канала, град. (мрад)	2 (35)
Диаметр входного объектива ко-поляризованного канала, мм	63
Угол поля зрения приемной оптической системы кросс-поляризованного канала, град. (мрад)	2 (35)
Диаметр входного объектива кросс-поляризованного канала, мм	100
Длительность импульсной характеристики лидара, нс	10,8
Разрядность АЦП, бит	14
Частота оцифровки лидарных эхо-сигналов, ГГц	2,5

На станциях, выполнявшихся в светлое время суток, проводились измерения вертикальных профилей спектральной облученности $E_d(z, \lambda)$, создаваемой потоком нисходящего излучения. Для проведения измерений использовался погружной гиперспектральный радиометр Ramses (Trios, Германия). Относительная погрешность измерения $E_d(z, \lambda)$ — около 8 %. Данные измерений использовались для расчета показателя диффузного ослабления нисходящего потока солнечной радиации K_d на длине волны $\lambda = 532$ нм. На большинстве использованных в работе станций измерения подводной облученности выполнялись при среднем зенитном угле солнца 70° в условиях переменной облачности. Для проведения сравнительного анализа с лидарными оценками выполнялся пересчет измеренных значений K_d для случая только направленного излучения солнца, находящегося в зените [10].

2.2. Место проведения натурных исследований

Работы выполнялись в рамках первого этапа 89-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в западной части Карского моря с 5 по 19 сентября 2022 г. [24]. Ряд результатов гидрооптических измерений, выполненных в этом рейсе, представлен в работах [6, 25]. Гидрооптические характеристики в районе работ менялись в широких пределах — показатель ослабления s принимал значения от $0,17 \text{ м}^{-1}$ до $1,1 \text{ м}^{-1}$, показатель поглощения a — от $0,10 \text{ м}^{-1}$ до $0,21 \text{ м}^{-1}$.

2.3. Методика обработки данных лидарного зондирования

В работе анализируются данные лидарного зондирования, полученные на станциях с однородным вертикальным распределением гидрооптических характеристик в приповерхностном слое 0–10 м. Вид ко- и кросс-поляризованных компонент лидарных эхо-сигналов, зарегистрированных в водах разной прозрачности, представлен на рисунке 1. В обоих случаях спад кросс-поляризованной компоненты более пологий, чем ко-поляризованной компоненты. Особенно ярко это наблюдается в мутных водах. Форма спада лидарного эхо-сигнала в однородных по глубине водах определяется двумя процессами — ослаблением зондирующего излучения при распространении от поверхности до заданного горизонта и от заданного горизонта до поверхности, обусловленного поглощением и рассеянием, и процессом деполяризации излучения, обуславливающим переход света из одной поляризованной компоненты в другую в процессе рассеяния. Деполяризация света в толще воды происходит при однократном рассеянии на несферических частицах и при многократном рассеянии. Влияние процесса ослабления в толще воды для обеих ортогонально-поляризованных компонент одинаково. В то же время влияние процесса деполяризации на начальных участках трассы зондирования существенно отличается. Это связано с различием амплитуд ко- и кросс-поляризованных компонент эхо-сигнала. В прозрачных водах степень деполяризации эхо-сигнала $g(t)$ на глубинах 20–30 м составляет 0,8–0,9 [19]. Поэтому в первом приближении процессом деполяризации при формировании начального участка спада ко-поляризованной компоненты можно пренебречь и для описания его формы использовать функцию аппроксимации, вид которой следует из лидарного уравнения. Лидарное уравнение в квази-однократном приближении имеет вид [10, 26]:

$$P\left(t = \frac{2Z}{c_w}\right) = \frac{c_w W_0 S T_O (1-r)^2}{2(nH + Z)^2} \beta'(\pi) \exp(-2\alpha Z), \quad (3)$$

где Z и H — протяженности подводного и надводного участков трассы зондирования, c_w — скорость света в морской воде, n — показатель преломления морской воды, W_0 — энергия зондирующего импульса, S — площадь приемной апертуры, T_O — пропускание приемной системы, $r \approx 0,02$ — коэффициент отражения Френеля для границы раздела воздух–морская вода, α — показатель ослабления лидарного эхо-сигнала, $\beta'(\pi)$ — эффективное значение показателя направленного рассеяния $\beta(\theta)$ (volume scattering function — VSF) при значении угла рассеяния $\theta = 180^\circ$. Истинная глубина z может быть пересчитана из Z с учетом угла зондирования φ . Момент времени t отсчитывается от момента пересечения зондирующим импульсом поверхности воды.

Следует подчеркнуть, что в представленном виде лидарное уравнение может быть записано только для однородных по вертикали распределений гидрооптических характеристик. В случае наличия стратификации α и $\beta'(\pi)$ зависят от глубины. Используемый в работе подход, при котором форма спада лидарного эхо-сигнала характеризуется одним значением α , становится не применим.

Соответствующие аппроксимирующие функции имеют вид:

$$P_{co} \left(t = \frac{2Z}{c_w} \right) = \frac{A}{(nH + Z)^2} \exp(-2\alpha_{co}Z), \quad (4)$$

где α_{co} — показатель ослабления ко-поляризованной компоненты эхо-сигнала, A — коэффициент аппроксимации, не зависящий от глубины.

Для формирования начальных участков спада кросс-поляризованной компоненты вклад процесса деполяризации существенен. Поэтому, строго говоря, использовать лидарное уравнение (3) для его описания нельзя. В то же время, анализ большого количества экспериментальных данных, полученных в ходе исследования, показал, что на коротких начальных участках спада эхо-сигнала аналогичные аппроксимирующие функции $P_{cross}(t)$ с показателем ослабления лидарного эхо-сигнала α_{cross} с достаточной точностью описывает форму спада кросс-поляризованной компоненты:

$$P_{cross} \left(t = \frac{2Z}{c_w} \right) = \frac{B}{(nH + Z)^2} \exp(-2\alpha_{cross}Z), \quad (5)$$

где α_{cross} — показатель ослабления ко-поляризованной компоненты эхо-сигнала, B — коэффициент аппроксимации, не зависящий от глубины.

На рисунке 1 пунктирными линиями показаны аппроксимирующие функции вида (4) и (5). Эти аппроксимирующие функции хорошо описывают форму спада поляризованных компонент эхо-сигнала и позволяют определить значения α_{co} и α_{cross} , характеризующие скорость спада. Для определения α методом аппроксимаций использовался участок спада эхо-сигнала, соответствующий диапазону глубин от 4 до 8 м. Форма эхо-сигнала выше 4 м подвержена сильному влиянию поверхностного волнения. Ниже 8–10 м во многих случаях наблюдается изменчивость гидрооптических характеристик, связанная со стратификацией.

При обработке данных лидарной съемки значение α определялось для каждого зарегистрированного эхо-сигнала. На станциях, продолжительность которых составляла от 1 до 3 часов, проводилось усреднение всех полученных значений α (от 3 до 11 тысяч зондирований), что позволило снизить влияние случайных ошибок измерений. Неизменность гидрооптических характеристик на станции контролировалась по форме лидарного эхо-сигнала и по отсутствию существенной изменчивости α с течением времени.

Полученные таким образом значения α_{co} и α_{cross} были использованы для построения регрессионных соотношений этих величин с различными гидрооптическими характеристиками.

3. Результаты и обсуждение

Лидарное зондирование с целью определения показателя ослабления ко- и кросс-поляризованных компонент лидарного эхо-сигнала выполнено на станциях, характеризовавшихся однородным по глубине

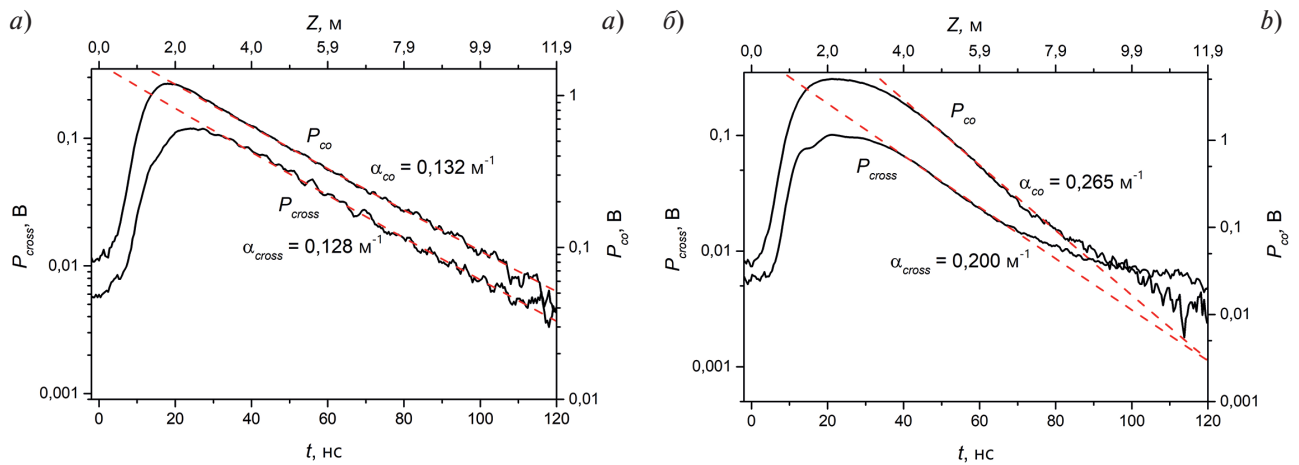


Рис. 1. Вид ко- и кросс-поляризованных компонент эхо-сигнала, зарегистрированных в водах разной прозрачности, и вид соответствующих функций аппроксимации: $a - c = 0,17 \text{ м}^{-1}$, $b - c = 1,1 \text{ м}^{-1}$

Fig. 1. The examples of co- and cross-polarized components of the echo signal recorded in waters with varying transparency and the corresponding approximation functions: $a - c = 0.17 \text{ m}^{-1}$, $b - c = 1.1 \text{ m}^{-1}$

распределением гидрооптических характеристик в слое 0–10 м. При этом гидрооптические характеристики в районе работ менялись в широком диапазоне. Так, показатель ослабления c принимал значения от $0,17 \text{ м}^{-1}$ до $1,1 \text{ м}^{-1}$, показатель поглощения a — от $0,10 \text{ м}^{-1}$ до $0,21 \text{ м}^{-1}$, вероятность выживания фотона ω_0 — от $0,38$ до $0,84$.

Для случая прозрачных вод (рис. 1, а), характеризующихся показателем ослабления $c = 0,17 \text{ м}^{-1}$, значения α_{co} и α_{cross} близки между собой, что свидетельствует об относительно малом вкладе процесса деполаризации в формирование поляризованных компонент. С увеличением показателя рассеяния b различия в формах спадов эхо-сигналов увеличиваются. Для случая замутненных вод, характеризующихся показателем ослабления $c = 1,1 \text{ м}^{-1}$, значения α_{co} и α_{cross} заметно различаются (рис. 1, б). Спад кросс-поляризованной компоненты эхо-сигнала более пологий, что говорит о существенном вкладе процесса деполаризации в формирование поляризованных компонент эхо-сигналов. Зависимость отношения $\alpha_{\text{co}}/\alpha_{\text{cross}}$ от c представлена на рис. 2. Цветом точек обозначены значения ω_0 . Пунктирной линией показана линейная аппроксимация полученных данных с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,78$. Сопоставление c и ω_0 показывает, что рост показателя ослабления c определяется в основном ростом показателя рассеяния b . Этот рост приводит к увеличению вклада многократного рассеяния и, соответственно, процесса деполаризации в формирование кросс-поляризованной компоненты эхо-сигнала. Как следует из графика, представленного на рис. 2, отношение $\alpha_{\text{co}}/\alpha_{\text{cross}}$ с увеличением c монотонно растет и в относительно мутных водах достигает значений $1,3–1,4$.

Полученный массив данных позволил построить диаграммы соответствия значений α_{co} , α_{cross} и гидрооптических характеристик, непосредственно измерявшихся одновременно с проведением лидарного зондирования. На рис. 3 представлены диаграммы соответствия значений α_{co} , α_{cross} и значений c . Функции аппроксимации показаны сплошными линиями, пунктирными линиями обозначены 95 %-е доверительные интервалы. Рисунок демонстрирует наличие линейной связи между показателем ослабления ко-поляризованной компоненты эхо-сигнала и показателем ослабления c с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,95$. Для кросс-поляризованной компоненты при значениях $c > 0,8 \text{ м}^{-1}$ наблюдается отклонение от линейной аппроксимации (R^2 линейной аппроксимации по всему массиву данных равен $0,75$). Особенно ярко отклонение проявляется при $c > 1,0 \text{ м}^{-1}$. Возможно, это связано с увеличением вклада процесса деполаризации в формирование кросс-поляризованной компоненты. Величина этого вклада определяется многократным рассеянием, в первую очередь, двухкратным, вероятность которого пропорциональна b^2 [27]. Использование в качестве функции аппроксимации полинома второй степени обеспечивает существенно лучшее описание зависимости α_{cross} от c ($R^2 = 0,88$). Вопрос соотношения процессов ослабления и деполаризации при формировании кросс-поляризованной компоненты эхо-сигнала требует дополнительных исследований.

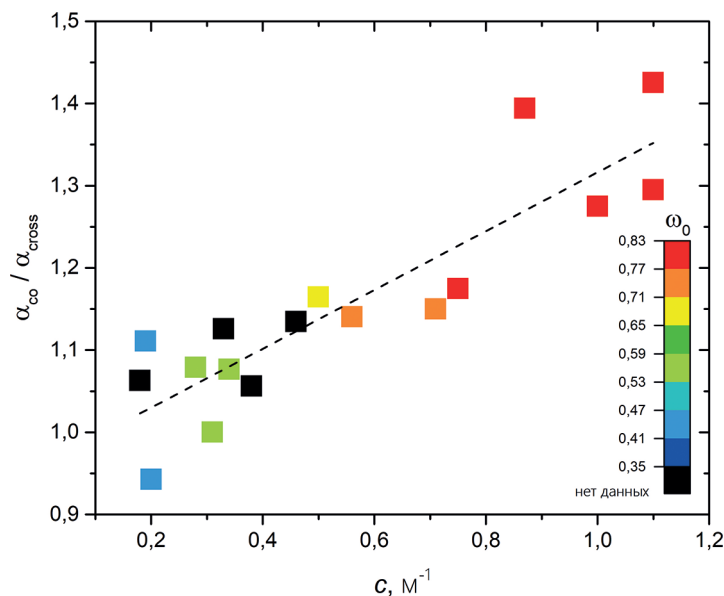


Рис. 2. Зависимость отношения $\alpha_{\text{co}}/\alpha_{\text{cross}}$ от c . Цвет точек показывает значения ω_0

Fig. 2. The relationship between the ratio $\alpha_{\text{co}}/\alpha_{\text{cross}}$ and c . The color of the points indicates the values of ω_0

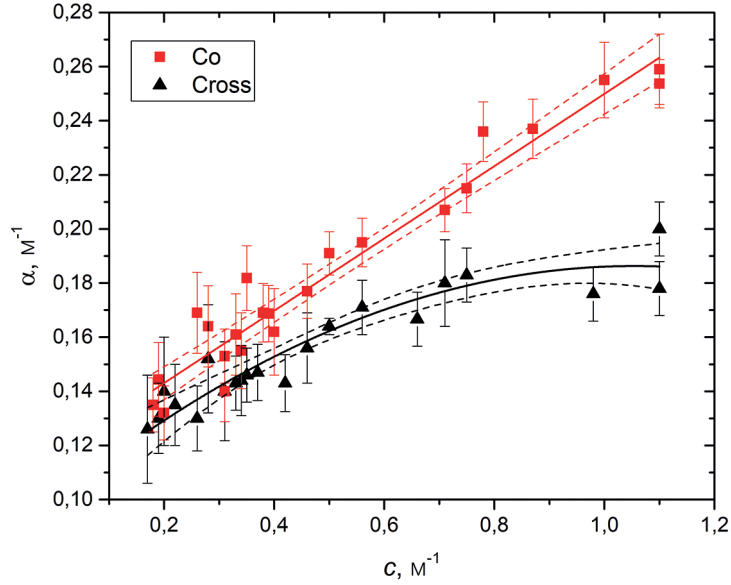


Рис. 3. Диаграмма соответствия значений α_{co} , α_{cross} и значений c . Функции аппроксимации показаны сплошными линиями, пунктирными линиями обозначены 95 %-е доверительные интервалы

Fig. 3. Correspondence diagram of α_{co} , α_{cross} and c . Approximation functions are shown with solid lines, and 95 % confidence intervals are indicated by dashed lines

На основании функциональных зависимостей, представленных на рис. 3, рассчитаны уравнения регрессий для ко- и кросс-поляризованных компонент, позволяющие определить показатель ослабления c по значениям α_{co} и α_{cross} . Эти уравнения имеют вид:

$$c_L^{co} = 7,10 \cdot \alpha_{co} - 0,81, \quad (6)$$

$$c_L^{cross} = 62,71 \cdot \alpha_{cross}^2 - 6,93 \cdot \alpha_{cross} + 0,034, \quad (7)$$

где c_L — показатель ослабления света, рассчитанный по данным лидарного зондирования. Точность определения коэффициентов регрессии методом наименьших квадратов для ко-поляризации составляет $7,10 \pm 0,37$ и $0,81 \text{ м}^{-1} \pm 0,07 \text{ м}^{-1}$, для кросс-поляризации — $62,71 \pm 3,34$ м, $6,93 \pm 0,63$ и $0,034 \text{ м}^{-1} \pm 0,001 \text{ м}^{-1}$. Относительная погрешность определения показателя ослабления c по данным лидарного зондирования для ко-поляризованной компоненты составляет 10 %, для кросс-поляризованной — 12 %. Полученные регрессионные зависимости справедливы в диапазоне изменения показателя ослабления от $0,17 \text{ м}^{-1}$ до $1,1 \text{ м}^{-1}$.

Диаграммы соответствия значений α_{co} , α_{cross} и значений показателя поглощения a представлены на рис. 4. Рисунок демонстрирует наличие линейной связи между α_{co} и a ($R^2 = 0,95$) и α_{cross} и a ($R^2 = 0,88$).

Уравнения регрессий для ко- и кросс-поляризованных компонент, позволяющие определить показатель ослабления a по значениям α_{co} и α_{cross} имеют вид:

$$a_L^{co} = 0,74 \cdot \alpha_{co} + 0,008, \quad (8)$$

$$a_L^{cross} = 1,28 \cdot \alpha_{cross} - 0,06, \quad (9)$$

где a_L — показатель поглощения света, рассчитанный по данным лидарного зондирования. Точность определения коэффициентов регрессии методом наименьших квадратов для ко-поляризации составляет $0,74 \pm 0,05$ и $0,008 \text{ м}^{-1} \pm 0,001 \text{ м}^{-1}$, для кросс-поляризации — $1,28 \pm 0,14$ и $0,06 \text{ м}^{-1} \pm 0,01 \text{ м}^{-1}$. Относительная погрешность определения показателя поглощения a по данным лидарного зондирования для ко-поляризованной компоненты составляет 10 %, для кросс-поляризованной — 12 %.

Диаграммы соответствия значений α_{co} , α_{cross} и значений показателя диффузного ослабления света K_d представлены на рис. 5. Рисунок демонстрирует наличие линейной связи между α_{co} и K_d ($R^2 = 0,87$) и α_{cross} и K_d ($R^2 = 0,80$).

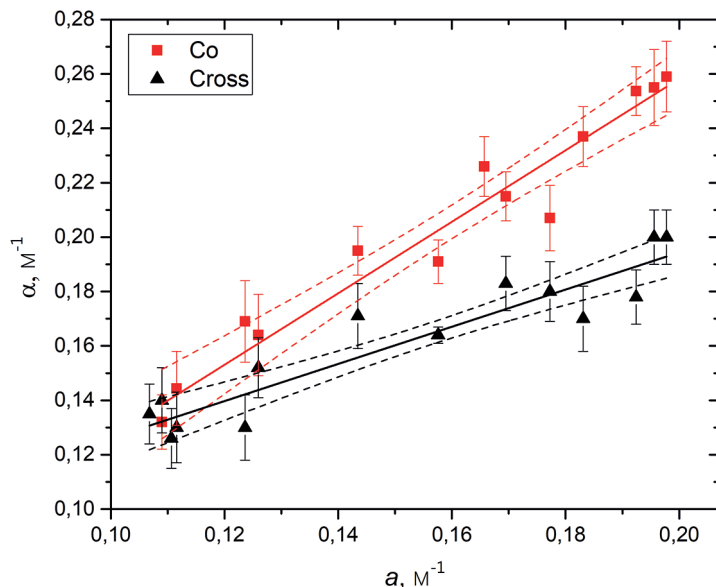


Рис. 4. Диаграмма соответствия значений α_{co} , α_{cross} и значений a . Функции аппроксимации показаны сплошными линиями, пунктирными линиями обозначены 95 %-е доверительные интервалы

Fig. 4. Correspondence diagram of α_{co} , α_{cross} and a . Approximation functions are shown with solid lines, and 95 % confidence intervals are indicated by dashed lines

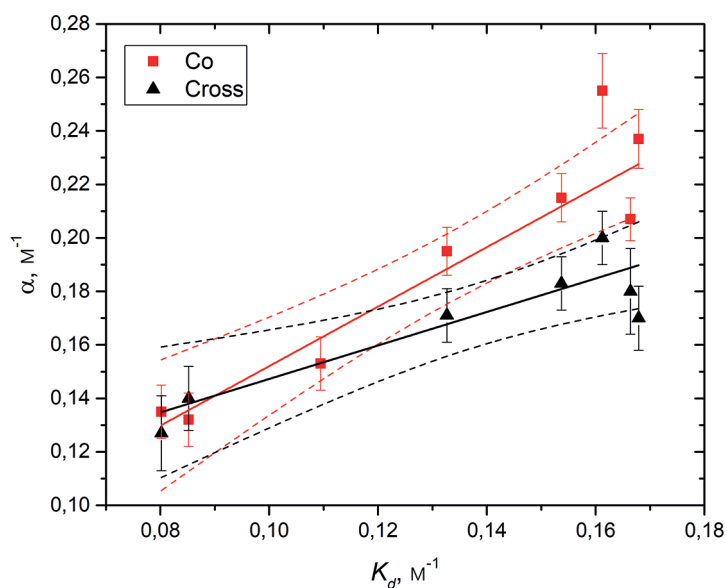


Рис. 5. Диаграмма соответствия значений α_{co} , α_{cross} и значений K_d . Функции аппроксимации показаны сплошными линиями, пунктирными линиями обозначены 95 %-е доверительные интервалы

Fig. 5. Correspondence diagram of α_{co} , α_{cross} and K_d . Approximation functions are shown with solid lines, and 95 % confidence intervals are indicated by dashed lines

Уравнения регрессии для ко- и кросс-поляризованных компонент, позволяющие определить показатель диффузного ослабления света K_d по значениям α_{co} и α_{cross} имеют вид:

$$K_{d,L}^{co} = 0,74 \cdot \alpha_{co} - 0,08, \quad (10)$$

$$K_{d,L}^{cross} = 1,34 \cdot \alpha_{cross} - 0,09, \quad (11)$$

где $K_{d,L}$ — показатель диффузного ослабления света, рассчитанный по данным лидарного зондирования. Точность определения коэффициентов регрессии для ко-поляризации составляет $0,74 \pm 0,11$ и $0,08 \text{ м}^{-1} \pm \pm 0,01 \text{ м}^{-1}$, для кросс-поляризации — $13,05 \pm 1,22$ и $1,53 \text{ м}^{-1} \pm 0,19 \text{ м}^{-1}$. Относительная погрешность определения $K_{d,L}$ по данным лидарного зондирования для ко-поляризованной компоненты составляет 12 %, для кросс-поляризованной — 13 %.

Полученные регрессионные соотношения α_{co} , α_{cross} и ряда гидрооптических характеристик справедливы для лидаров с расходимостью зондирующего пучка и углом поля зрения приемной оптической системы, указанных в табл. 1, а также для геометрии зондирования, описанной в разделе 2.1. В случае изменения геометрии зондирования и характеристик лидара (в первую очередь угла поля зрения приемной системы) потребуется корректировка коэффициентов регрессионных соотношений.

4. Заключение

В результате лидарного зондирования, выполненного на станциях с однородным вертикальным распределением гидрооптических характеристик приповерхностного слоя, и проведения синхронных сопутствующих контактных измерений ряда гидрооптических характеристик получен большой массив данных. Статистическая обработка этих данных позволила получить регрессионные соотношения, связывающие показатель ослабления c , показатель поглощения a и показатель диффузного ослабления света K_d с показателями ослабления ко- и кросс-поляризованных компонент лидарного эхо-сигнала. Полученные регрессионные соотношения обеспечивают возможность использования данных лидарной съемки на ходу судна для оценки пространственных распределений гидрооптических характеристик, необходимых для решения ряда практических задач.

Данные, полученные с использованием кросс-поляризованной компоненты лидарного эхо-сигнала, в основном дублируют данные ко-поляризованной компоненты. Однако использование двухканальной регистрирующей системы повышает надежность и достоверность получаемых данных. Кроме того, регистрация двух ортогонально поляризованных компонент лидарного эхо-сигнала позволяет рассчитывать глубинные зависимости отношения деполяризации $\delta(z)$, которая чувствительна к различного рода вертикальным неоднородностям в толще воды. Это дает возможность использовать данные лидарной съемки для контроля однородности вертикального распределения гидрооптических характеристик в верхней толще морской воды и отбраковки данных измерений в стратифицированных водах [15–17].

При продолжении работ интерес представляет проведение исследований в различных акваториях Мирового океана, отличающихся значениями и соотношениями гидрооптических характеристик, а также для различных геометрий зондирования и углов поля зрения приемной оптической системы. Полученные при этом данные позволят внести необходимые корректировки в регрессионные соотношения.

Благодарности

Авторы благодарят В.А. Артемьева, М.А. Павлову, С.К. Клименко и Д.Н. Дерягина за помощь в проведении сопутствующих измерений.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge V.A. Artemyev, M.A. Pavlova, S.K. Klimenko and D.N. Deryagin for assistance in carrying out contact measurements.

Финансирование

Обработка и анализ данных лидарного зондирования выполнены в рамках государственного задания ИО РАН по теме № FMWE-2024–0015. Обработка данных сопутствующих измерений выполнена в рамках соглашения с Росгидрометом № 169-15-2023-002.

Funding

The processing and statistical analysis of the recorded lidar sounding data were carried out within the Shirshov Institute of Oceanology state assignment (No. FMWE-2024–0015). The processing of related data was sponsored under the project funded by the Russian Hydrometeorological Service (contract agreement No. 169-15-2023-002).

Литература

1. Глухов В.А., Гольдин Ю.А. Морские радиометрические лидары и их использование для решения океанологических задач // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 1. С. 104–128. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(1)-9
2. Браво-Животовский Д.М., Гордеев Л.Б., Долин Л.С., Моченев С.Б. Определение показателей поглощения и рассеяния морской воды по некоторым характеристикам светового поля искусственных источников света // Гидрофизические и гидрооптические исследования в Атлантическом и Тихом океанах. По результатам исследований в 5-м рейсе НИС «Дмитрий Менделеев». Глава 5. С. 153–158 / Под ред. А.С. Мониной, К.С. Шифрина. М.: Наука, 1974. 328 с.
3. Xu P., Liu D., Shen Y., Chen Y. Design and validation of a shipborne multiple-field-of-view lidar for upper ocean remote sensing // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2020. Vol. 254. P. 107201. doi:10.1016/j.jqsrt.2020.107201
4. Collister B.L., Zimmerman R.C., Hill V.J., Sukenik I., Balch 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
5. Glukhov V.A., Goldin Yu.A., Glitko O.V. et al. Investigation of the Relationships between the Parameters of Lidar Echo Signals and Hydrooptical Characteristics in the Western Kara Sea // Oceanology. 2023. Vol. 63 (S1). P. S119–S130. doi:10.1134/S0001437023070044
6. Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Глитко О.В., Аглова Е.А., Глуховец Д.И., Родионов М.А. Лидарные исследования в первом этапе 89-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16. № 4. С. 107–115. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(4)-9
7. Chen Ya., Cui X., Gu Q. et al. This is MATE: A Multiple scAttering correcTion rETrieval algorithm for accurate lidar profiling of seawater optical properties // Remote Sensing of Environment. 2024. Vol. 307. P. 114166. doi:10.1016/j.rse.2024.114166
8. Zhou Y., Chen Y., Zhao H. et al. Shipborne oceanic high-spectral-resolution lidar for accurate estimation of seawater depth-resolved optical properties // Light: Science & Applications. 2022. Vol. 11. P. 261. doi:10.1038/s41377-022-00951-0
9. Schulien J.A., Behrenfeld M.J., Hair J.W. et al. Vertically- resolved phytoplankton carbon and net primary production from a high spectral resolution lidar // Optic Express. 2017. Vol. 25. P. 13577–13587. doi:10.1364/OE.25.013577
10. Gordon H.R. Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering // Applied Optics. 1982. Vol. 21. N 16. P. 2996–3001.
11. Dolina I.S., Dolin L.S., Levin I.M., Rodionov A.A., Savel'ev V.A. Inverse problems of lidar sensing of the ocean // Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters. SPIE. 2007. Vol. 6615. P. 104–113.
12. Chaikovskaya L.I., Zege E.P. Theory of polarized lidar sounding including multiple scattering // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2004. Vol. 88, N 1–3. P. 21–35. doi:10.1016/j.jqsrt.2004.01.002
13. Васильков А.П., Кондранин Т.В., Мясников Е.В. Определение профиля показателя рассеяния света по поляризационным характеристикам отраженного назад излучения при импульсном зондировании океана // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1990. Т. 26, № 3. С. 307–312.
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. Krekov G.M., Krekova M.M., Shamanaev V.S. Laser sensing of a subsurface oceanic layer. II. Polarization characteristics of signals // Applied Optics. 1998. Vol. 37. P. 1596–1601. doi:10.1364/AO.37.001596
16. Churnside J.H. Polarization effects on oceanographic lidar // Optics express. 2008. Vol. 16, N 2. P. 1196–1207. doi:10.1364/OE.16.001196
17. Коханенко Г.П., Балин Ю.С., Пеннер И.Э., Шаманаев В.С. Лидарные и in situ измерения оптических параметров поверхностных слоев воды в озере Байкал // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 5. С. 377–385.
18. Churnside J.H. Review of profiling oceanographic lidar // Optical Engineering. 2014. Vol. 53, N 5. P. 051405–051405. doi:10.1117/1.OE.53.5.051405
19. 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
20. 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
21. Артемьев В.А., Таскаев В.Р., Григорьев А.В. Автономный прозрачномер ПУМ-200 // В сборнике: Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2021). Материалы XVII международной научно-технической конференции. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. 2021. С. 95–99.
22. Погосян С.И., Дургарян А.М., Конюхов И.В. и др. Абсорбционная спектроскопия микроводорослей цианобактерий и растворенного органического вещества: измерения во внутренней полости интегрирующей сферы // Океанология. 2009. Т. 49. С. 934–939.

23. Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Копелевич О.В. и др. Измерения показателя поглощения морской воды с помощью интегрирующей сферы // Светотехника. 2017. № 5. С. 39–43.
24. Кравчишина М.Д., Ключиткин А.А., Новигатский А.Н. и др. 89-й рейс (1-й этап) научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш”: климатический эксперимент во взаимодействии с самолетом-лабораторией Ту-134 “Оптик” в Карском море // Океанология. 2023. Т. 63, № 3. С. 1–4. doi:10.31857/S0030157423030073
25. Glukhovets D.I., Aglova E.A., Artemiev V.A. et al. Results of Hydrooptical Field Studies in the Barents and Kara Seas in September 2022 // Complex Investigation of the World Ocean (CIWO-2023). Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. 2023. P. 439–445. doi:10.1007/978-3-031-47851-2_53
26. Долин Л.С., Савельев В.А. О характеристиках сигнала обратного рассеяния при импульсном облучении мутной среды узким направленным световым пучком // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1971. Т. 7, № 5. С. 505–510.
27. Ernst A. Multiple-scattering theory. New developments and applications. Halle-Wittenberg University. 2007. 65 с.

References

1. Glukhov V.A., Goldin Yu.A. Marine profiling lidars and their application for oceanological problems. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(1):104–128. doi:10.59887/2073–6673.2024.17(1)-9
2. Bravo-Zhivotovsky D.M., Gordeev L.B., Dolin L.S., Mochenev S.B. Determination of absorption and scattering indicators of sea water based on some characteristics of the light field of artificial light sources. *Hydrophysical and hydrooptical studies in the Atlantic and Pacific oceans. Based on the results of research on the 5th cruise of the R/V Dmitry Mendeleev. Chapter 5*. P. 153–158 / Ed. by A.S. Monin, K.S. Shifrin. M.: Nauka; 1974. 328 p. (in Russian).
3. Peituo Xu, Dong Liu, Yibing Shen et al. Design and validation of a shipborne multiple-field-of-view lidar for upper ocean remote sensing. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2020;254:107201. doi:10.1016/j.jqsrt.2020.107201
4. Collister B.L., Zimmerman R.C., Hill V.J., Sukenik I., Balch M. Polarized lidar and ocean particles: insights from a mesoscale coccolithophore bloom. *Applied Optics*. 2020;59(15):4650–4662. doi:10.1364/AO.389845
5. Glukhov V. A., Goldin Yu. A., Glitko O.V. et al. Investigation of the Relationships between the Parameters of Lidar Echo Signals and Hydrooptical Characteristics in the Western Kara Sea. *Oceanology*. 2023;63(Suppl 1): S119–S130. doi:10.1134/S0001437023070044
6. Glukhov V.A., Goldin Yu.A., Glitko O.V. et al. Lidar Research during the First Stage of the 89th Cruise of the R/V “Academic Mstislav Keldysh”. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023;16(4):107–115. doi:10.59887/2073–6673.2023.16(4)-9
7. Chen Ya., Cui X., Gu Q. et al. This is MATE: A Multiple scAttering correcTion rETrieval algorithm for accurate lidar profiling of seawater optical properties. *Remote Sensing of Environment*. 2024;307:114166. doi:10.1016/j.rse.2024.114166
8. Zhou Y., Chen Y., Zhao H. et al. Shipborne oceanic high-spectral-resolution lidar for accurate estimation of seawater depth-resolved optical properties. *Light: Science & Applications*. 2022;11:261. doi:10.1038/s41377-022-00951-0
9. Schulien J.A., Behrenfeld M.J., Hair J.W. et al. Vertically- resolved phytoplankton carbon and net primary production from a high spectral resolution lidar. *Optic Express*. 2017;25:13577–13587. doi:10.1364/OE.25.013577
10. Gordon H.R. Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering. *Applied Optics*. 1982;21(16):2996–3001.
11. Dolina I.S., Dolin L.S., Levin I.M., Rodionov A.A., Savel'ev V.A. Inverse problems of lidar sensing of the ocean. *Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters. SPIE*. 2007;6615:104–113.
12. Chaikovskaya L.I., Zege E.P. Theory of polarized lidar sounding including multiple scattering. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2004;88(1–3):21–35. doi:10.1016/j.jqsrt.2004.01.002
13. Vasilkov A.P., Kondranin T.V., Myasnikov E.V. Determination of the light scattering index profile based on the polarization characteristics of back-reflected radiation during pulsed ocean sounding. *Izvestiya AS USSR, Atmospheric and Ocean Physics*. 1990;26(3):307–312 (in Russian).
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. Krekov G.M., Krekova M.M., Shamanaev V.S. Laser sensing of a subsurface oceanic layer. II. Polarization characteristics of signals. *Applied Optics*. 1998;37:1596–1601. doi:10.1364/AO.37.001596
16. Churnside J.H. Polarization effects on oceanographic lidar. *Optics express*. 2008;16(2):1196–1207. doi:10.1364/OE.16.001196
17. Kokhanenko G.P., Balin Y.S., Penner I.E., Shamanaev V.S. Lidar and in situ measurements of the optical parameters of water surface layers in Lake Baikal. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2011;24(5):478–486. doi:10.1134/S1024856011050083
18. Churnside J.H. Review of profiling oceanographic lidar. *Optical Engineering*. 2014;53(5):051405–051405. doi:10.1117/1.OE.53.5.051405
19. 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;40(24):4353–4364. doi:10.1364/AO.40.004353

20. 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 doi:10.7868/S207366731702006X (in Russian).
21. Artemiev V.A., Taskaev V.R., Grigoriev A.V. Autonomous transparent meter PUM-200. *Materials of the XVII International Scientific and Technical Conference (MSOI-2021)*, Moscow: 2021. P. 95–99 (in Russian).
22. Pogosyan S.I., Durgaryan A.M., Konyukhov I.V. et al. Absorption spectroscopy of microalgae, cyanobacteria, and dissolved organic matter: Measurements in an integrating sphere cavity. *Oceanology*. 2009;49:866–871. doi:10.1134/S0001437009060125
23. Glukhovets D.I., Sheberstov S.V., Kopelevich O.V. et al. Measuring the sea water absorption factor using integrating sphere. *Light & Engineering*. 2018;26(1):120–126.
24. Kravchishina M.D., Klyuvitkin A.A., Novigatskiy A.N. et al. The 89th cruise (1st stage) of the research vessel “Academician Mstislav Keldysh”: climatic experiment in interaction with the Tu-134 “Optik” laboratory aircraft in the Kara Sea. *Oceanology*. 2023;63(3):1–4. doi:10.31857/S0030157423030073
25. Glukhovets D.I., Aglova E.A., Artemiev V.A. et al. Results of Hydrooptical Field Studies in the Barents and Kara Seas in September 2022. *Complex Investigation of the World Ocean (CIWO-2023)*. *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Cham: Springer; 2023. P. 439–445. doi:10.1007/978-3-031-47851-2_53
26. Dolin L.S., Savelev V.A. Characteristics of the backscattering signal during pulsed irradiation of a turbid medium by a narrow directed light beam. *Izvestiya AS USSR, Atmospheric and Ocean Physics*. 1971;7:505–510 (in Russian).
27. Ernst A. *Multiple-scattering theory. New developments and applications*. Halle-Wittenberg University: 2007. 65 p.

Об авторах

ГЛУХОВ Владимир Алексеевич, научный сотрудник ИО РАН, ORCID: 0000-0003-4555-8879, WoS ResearcherID: GSD-4886–2022, Scopus Author ID: 57191414331, SPIN-код (РИНЦ): 9449-2307, e-mail: vl.glukhov@inbox.ru

ГОЛЬДИН Юрий Анатольевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИО РАН, ORCID: 0000-0001-5731-5458, Scopus Author ID: 6602648464, SPIN-код (РИНЦ): 2750-1867, e-mail: goldin@ocean.ru

ГЛИТКО Олег Викторович, научный сотрудник ИО РАН, ORCID: 0009-0005-2313-2326. e-mail: glitko_kisin@mail.ru

ГЛУХОВЕЦ Дмитрий Ильич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИО РАН, преподаватель, Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), ORCID: 0000-0001-5641-4227, Scopus AuthorID: 57193736311, SPIN-код (РИНЦ): 6755-2450, e-mail: glukhovets@ocean.ru

РОДИОНОВ Максим Анатольевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИО РАН, ORCID: 0000-0002-7397-0548, Scopus AuthorID: 56034199200, SPIN-код (РИНЦ): 5706-0570