

УДК 551.46.08

© В. А. Глухов^{1*}, Ю. А. Гольдин¹, О. В. Глитко¹, Е. А. Аглова^{1,2}, Д. И. Глуховец^{1,2}, М. А. Родионов¹, 2023

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский пр-т, д. 36

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

*vl.glukhov@inbox.ru

ЛИДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПЕРВОМ ЭТАПЕ 89-ГО РЕЙСА НИС «АКАДЕМИК МСТИСЛАВ КЕЛДЫШ»

Статья поступила в редакцию 05.10.2023, после доработки 04.12.2023, принята в печать 06.12.2023

Аннотация

Выполнена лидарная съемка западной части Карского моря. Съемка проводилась в сентябре 2022 г. Использован судовой радиометрический (профилирующий) лидар ПЛД-1. Оптический блок лидара располагался на 8-й палубе НИС «Академик Мстислав Келдыш» на высоте 15 м над поверхностью воды. Лидарное зондирование проводилось на станциях и на ходу судна. Маршрут судна проходил через акватории, характеризующиеся широким диапазоном изменений гидрооптических характеристик. Лидарные измерения сопровождались комплексом сопутствующих измерений гидрооптических и гидрологических характеристик. Сопутствующие измерения выполнялись на станциях с использованием погружаемых приборов, а также на ходу судна с помощью проточного измерительного комплекса. Однородность вертикального распределения гидрооптических характеристик на ходу судна в верхнем десятиметровом слое контролировалась дистанционным методом по лидарным данным. Продемонстрировано хорошее согласие пространственных распределений параметров лидарных эхо-сигналов, гидрооптических и гидрологических характеристик (совпадение пространственных положений различных особенностей распределения, локальных максимумов, минимумов и фронтальных зон). Получен большой объем данных измерений, позволяющих в дальнейшем провести их статистическую обработку с целью нахождения связей между параметрами лидарных эхо-сигналов и гидрооптическими характеристиками, зарегистрированными контактными методами.

Ключевые слова: морской лидар, гидрооптические характеристики, лидарная съемка, фронтальные зоны, Карское море

UDC 551.46.08

© V. A. Glukhov^{*1}, Yu. A. Goldin¹, O. V. Glitko¹, E. A. Aglova^{1,2}, D. I. Glukhovets^{1,2}, M. A. Rodionov¹, 2023

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

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

*vl.glukhov@inbox.ru

LIDAR RESEARCH DURING THE FIRST STAGE OF THE 89th CRUISE OF THE R/V 'ACADEMIC MSTISLAV KELDYSH'

Received 05.10.2023, Revised 04.12.2023, Accepted 06.12.2023

Abstract

A lidar survey of the western part of the Kara Sea was carried out in September 2022. The shipborne radiometric (profiling) lidar PLD-1 was used. The lidar optical unit was located on the 8th deck of the R/V 'Akademik Mstislav Keldysh' at an altitude of 15 m above the water surface. Lidar sounding was carried out at stations and underway. The vessel route passed through water areas characterized by a wide range of changes in hydrooptical characteristics. Lidar measurements were accompanied by synchronized measurements of hydrooptical and hydrological characteristics. These measurements were carried out using submersible instruments at stations and using a flow-through measuring complex along the ship's route. The hydrooptical characteristics vertical distribution uniformity in the upper ten-meter layer was controlled remotely using underway lidar data.

Ссылка для цитирования: 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

For citation: Glukhov V.A., Goldin Yu.A., Glitko O.V., Aglova E.A., Glukhovets D.I., Rodionov M.A. 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

Good agreement between the spatial distributions of the lidar echo signals parameters, of the hydrooptical and of the hydrological characteristics (coincidence of the locations of various distribution features, local maxima, minima and frontal zones) was demonstrated. A large volume of measurement data has been obtained, which allows for further statistical processing in order to find relationships between the parameters of lidar echo signals and hydrooptical characteristics recorded by contact methods.

Keywords: marine lidar, hydrooptical characteristics, lidar survey, frontal zones, Kara Sea

1. Введение

Возможности дистанционного зондирования приповерхностных слоев морской воды с использованием радиометрических лидаров продемонстрированы в целом ряде работ [1–5]. Важным направлением исследований с использованием морских лидаров судового и авиационного базирования является дистанционное определение гидрооптических характеристик приповерхностного слоя [5–8]. Обычно при обработке данных радиометрических лидаров с целью извлечения гидрооптических характеристик предполагается однородность вертикального распределения исследуемого слоя. В последние годы появились работы, позволяющие получать вертикальные распределения гидрооптических характеристик при наличии их стратификации. Для этого используются лидары высокого спектрального разрешения (HSRL — High Spectral Resolution Lidar), совмещающие регистрацию временной и спектральной зависимостей эхо-сигнала [9, 10].

Методы извлечения информации о гидрооптических характеристиках из данных лидарного зондирования в каждом конкретном случае зависят от характеристик лидара и геометрии зондирования [7, 11]. Универсального алгоритма пересчета параметров лидарных эхо-сигналов в значения гидрооптических характеристик нет. Это обуславливает необходимость проведения измерений с конкретными лидарами в конкретных акваториях. Удобным регионом для проведения таких исследований является Карское море, характеризующееся высокой пространственной изменчивостью гидрооптических характеристик в широком диапазоне их значений [12–14]. Достоинствами судовой лидарной съемки являются возможность проведения измерения на ходу судна без использования погружаемых устройств, а также возможность проведения синхронных сопутствующих измерений гидрооптических и гидрологических характеристик.

В данной работе представлены результаты лидарных измерений, выполненных на станциях и на ходу судна, а также результаты сопоставления пространственных распределений параметров лидарных эхо-сигналов с соответствующими распределениями гидрооптических и гидрологических характеристик, полученных в ходе синхронных сопутствующих измерений.

2. Материалы и методы

2.1. Описание аппаратуры

Для проведения исследований использован судовой поляризационный лидар ПЛД-1 (разработка ИО РАН [15]). Длина волны зондирующего излучения — 532 нм, длительность зондирующего импульса по уровню 0,5–7 нс, энергия зондирующего импульса — 20 мДж, угол поля зрения приемной оптической системы — 0,9 град. (15,5 мрад), диаметр входного объектива — 63 мм. Для оцифровки и регистрации лидарных эхо-сигналов использовался цифровой четырехканальный осциллограф LeCroy HDO4034. Частота оцифровки — 2,5 ГГц, разрядность АЦП — 14 бит. В лидаре ПЛД-1 имеется два приемных канала, предназначенных для регистрации ко- и кросс-поляризованных компонент лидарного эхо-сигнала на длине волны зондирования. В данной статье анализируются только ко-поляризованные компоненты лидарного эхо-сигнала.

При проведении исследований оптический блок лидара размещался на 8-й палубе НИС «Академик Мстислав Келдыш». Высота оптического блока над поверхностью воды — около 15 м. Угол зондирования $\theta = 20^\circ$ от вертикали. Протяженность воздушного участка трассы зондирования H составляла около 16 м. Одновременно с регистрацией лидарных эхо-сигналов регистрировались данные навигационного положения по сигналам спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS.

В течение всего рейса проводилась регистрация лидарных эхо-сигналов с частотой 1 Гц. Измерения проводились как во время выполнения станций, так и на ходу судна. При скорости судна 10 узлов пространственная дискретность точек измерений составляла около 5 м.

Лидарная съемка сопровождалась комплексом синхронных сопутствующих измерений. На станциях с помощью погружаемого прозрачномера ПУМ-200 (разработка ИО РАН [16, 17]) выполнялись измерения вертикальных профилей показателя ослабления света морской водой c на длине волны $\lambda = 530$ нм. Точность измерения c в диапазоне 0,050–1,0 м⁻¹ составляет 0,005 м⁻¹. При увеличении значений показателя ослабления выше 1 м⁻¹ возрастает влияние многократного рассеяния, что приводит к росту погрешности измерений. Оценка изменчивости показателя ослабления в этом диапазоне носит качественный характер.

С помощью проточного измерительного комплекса ИО РАН проводились непрерывные измерения на станциях и на ходу судна [18]. Комплекс позволяет проводить измерения температуры воды T и удельной электропроводности, которая затем пересчитывается в соленость S . Проточный спектральный флуориметр в составе комплекса позволяет определять интенсивность флуоресценции окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ) — I_{CDOM} , индуцированной излучением лазера с длиной волны возбуждения 405 нм. Значения интенсивности флуоресценции приводятся к рамановским единицам измерения (R.U.) путем нормировки пика флуоресценции на пик комбинационного рассеяния на молекулах воды. В состав комплекса также входит универсальный малогабаритный прозрачномер ПУМ-А для определения величины показателя ослабления света c на длине волны 530 нм. Технические характеристики ПУМ-А аналогичны характеристикам ПУМ-200, приведенным выше. Глубина водозабора — 2–3 м. Пространственное разрешение данных — около 50 м. Привязка измеренных данных осуществлялась по сигналам спутниковой навигационной системы GPS.

2.2. Район проведения работ

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. Маршрут судна и положения станций показаны на рис. 1.

Маршрут судна пересекал несколько гидрологических фронтов. Один фронт разделял относительно теплые баренцевоморские воды, проникающие в акваторию Карского моря, и замутненные прибрежные воды, формируемые стоком рек, наиболее крупные из которых — р. Байдарата, р. Кара, р. Юрибей и др. Другой фронт был сформирован на границе между прибрежными водами вблизи полуострова Ямал и относительно холодными и прозрачными водами Восточно-Новоземельского течения. Диапазон изменения показателя ослабления составил от $0,17 \text{ м}^{-1}$ вблизи Новой Земли до значений $1,5 \text{ м}^{-1}$ и выше в акватории Байдарацкой губы. На протяжении рейса волнение не превышало 4-х баллов. Дымка над поверхностью воды практически отсутствовала.

2.3. Методика обработки данных лидарного зондирования

Показатель ослабления лидарного эхо-сигнала $\alpha(z)$ характеризует экспоненциальную форму спада лидарного эхо-сигнала в соответствии с лидарным уравнением [1]:

$$P\left(t = \frac{2Z}{c_w}\right) = P_0 \frac{AT_0(1-r)^2}{(nH + Z)^2} \beta(\pi, Z) \exp\left[-2 \int_0^Z \alpha(Z') dZ'\right], \quad (1)$$

где Z и H — протяженности подводного и надводного участков трассы зондирования, c_w — скорость света в морской воде, n — коэффициент преломления морской воды, $\alpha(Z)$ — показатель ослабления лидарного эхо-сигнала, $\beta(\pi, Z)$ — значение индикатрисы рассеяния в направлении 180° , P_0 — мощность зондирующего импульса, A — размер приемной апертуры, T_0 — пропускание приемной системы, $r \approx 0,02$ — амплитудный коэффициент отражения Френеля для границы раздела воздух–морская вода. Истинная глубина z может быть пересчитана из Z с учетом угла зондирования θ .

В общем случае $\alpha(z)$ зависит от вертикального распределения гидрооптических характеристик приповерхностного слоя и принимает значения от Kd до c в зависимости от геометрии зондирования [11]. В случае однородных по глубине вод α является постоянной величиной. Для определения α использовался стандартный подход, основанный на применении аппроксимаций лидарного эхо-сигнала функцией,

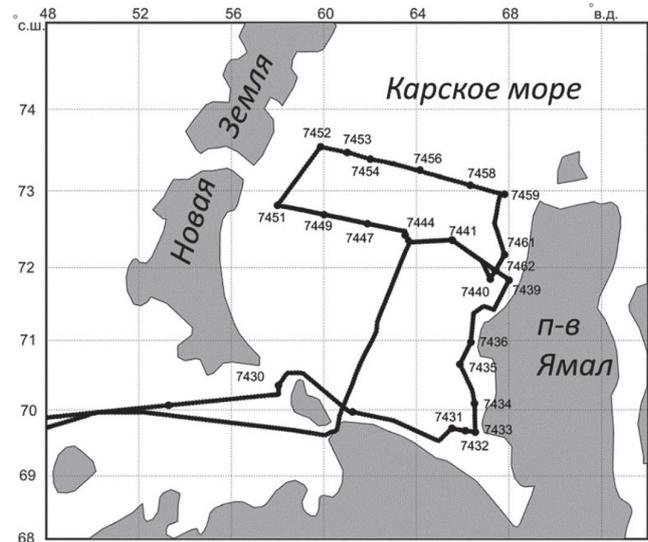


Рис. 1. Маршрут судна и положения станций 1-го этапа 89-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Карском море

Fig. 1. The vessel route and the station positions of the 1st stage of the 89th cruise of the R/V 'Academic Mstislav Keldysh' in the Kara Sea

вид которой следует из лидарного уравнения [5, 19]. При определении α использовался участок спада эхо-сигнала, соответствующий диапазону глубин от 4 до 8 м. Участок выше 4 м подвержен сильному влиянию поверхностного волнения. Ниже 8–10 м во многих случаях наблюдается изменчивость гидрооптических характеристик. Примеры ко-поляризованных компонент лидарных эхо-сигналов и соответствующих аппроксимирующих функций показаны на рис. 2. Все измерения проводились в линейном режиме работы ФЭУ. Для предотвращения насыщения осуществлялась регулировка высоковольтного напряжения питания ФЭУ. На рис. 2, а и б представлен случай вод различной прозрачности, однородных по глубине в слое от поверхности до 10 м. Рисунок 2, а иллюстрирует ситуацию, когда благодаря высокой прозрачности воды работает модель однократного рассеяния и показатель лидарного ослабления α близок к показателю ослабления c . Рисунок 2, б иллюстрирует ситуацию, когда благодаря высокому значению показателя рассеяния эффективная диаграмма направленности приемника становится широкой и показатель α близок к показателю диффузного ослабления K_d . В качестве критерия однородности вертикального распределения c в слое 0–10 м может быть использована величина дисперсии показателя ослабления. На станции 7453 (рис. 2, а) значение дисперсии c составило $6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-2}$, на станции 7433 (рис. 2, б) — $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-2}$. Это примеры станций с однородными по глубине водами. На рисунке 2, в представлен случай неоднородного по глубине участка 0–10 м. Значение дисперсии c на этой станции составило $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-2}$. Спад лидарного эхо-сигнала имеет более сложную форму, для описания которой необходимо применение нескольких различных аппроксимаций. В связи с этим для дальнейшего анализа были использованы только те станции, на которых слой 0–10 м был однородным по показателю ослабления c с дисперсией менее 10^{-5} .

При обработке данных лидарной съемки значение α определялось для каждого зарегистрированного эхо-сигнала. На станциях, продолжительность которых составляла 1–3 ч, 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

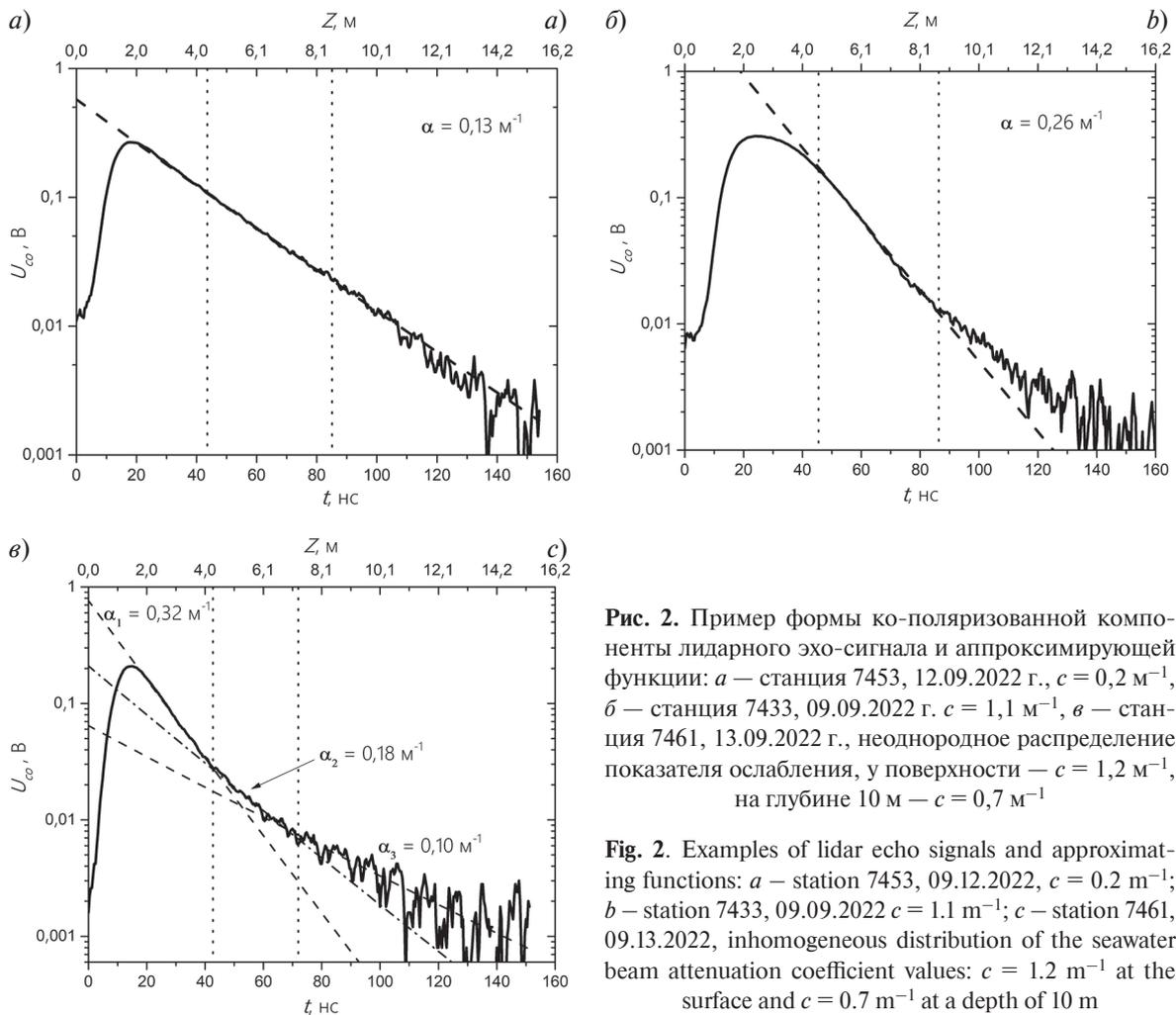


Рис. 2. Пример формы ко-поляризованной компоненты лидарного эхо-сигнала и аппроксимирующей функции: а — станция 7453, 12.09.2022 г., $c = 0,2 \text{ м}^{-1}$, б — станция 7433, 09.09.2022 г. $c = 1,1 \text{ м}^{-1}$, в — станция 7461, 13.09.2022 г., неоднородное распределение показателя ослабления, у поверхности — $c = 1,2 \text{ м}^{-1}$, на глубине 10 м — $c = 0,7 \text{ м}^{-1}$

Fig. 2. Examples of lidar echo signals and approximating functions: а — station 7453, 09.12.2022, $c = 0.2 \text{ м}^{-1}$; б — station 7433, 09.09.2022 $c = 1.1 \text{ м}^{-1}$; в — station 7461, 09.13.2022, inhomogeneous distribution of the seawater beam attenuation coefficient values: $c = 1.2 \text{ м}^{-1}$ at the surface and $c = 0.7 \text{ м}^{-1}$ at a depth of 10 m

по форме лидарного эхо-сигнала и по отсутствию существенной изменчивости α с течением времени. Данные измерений, полученные на ходу судна, усреднялись по результатам 100 зондирований (пространственный интервал усреднения — около 500 м) для снижения влияния качки судна, волнения и пены на поверхности воды.

3. Результаты и их обсуждение

Лидарная съемка выполнялась как на станциях, так и на ходу судна в течение около 270 ч. Однородное по глубине распределение показателя ослабления c в верхнем слое от поверхности до 10 м зарегистрировано на 27 станциях на разных участках маршрута. Для каждой из этих станций рассчитано среднее значение показателя ослабления лидарного эхо-сигнала α и стандартное отклонение измеряемой величины. Распределения по маршруту судна значений α и c , измеренных на станциях, представлены на рис. 3. Диапазон измерений c составил от $0,17 \text{ м}^{-1}$ до $1,1 \text{ м}^{-1}$. Наблюдается хорошее соответствие вида распределений, совпадение положения особенностей распределений, локальных максимумов, минимумов и фронтальных зон. Полученный набор пар величин α и c позволяет в дальнейшем провести их статистический анализ для установления регрессионных соотношений. Приведенное распределение α содержит информацию о пространственном распределении гидрооптических характеристик и может быть успешно использовано для проведения дистанционных измерений этих характеристик лидарным методом.

Пример результатов измерений, выполненных на ходу судна, представлен на рис. 4. На этом рисунке показан участок разреза, соответствующий переходу от пролива Карские ворота к Байдарацкой губе, выполненный 08.09.2022 г. между станциями 7430 и 7431 (см. рис. 1). Сопоставление пространственных распределений α и c , измеренного проточным измерительным комплексом на ходу судна, показаны на

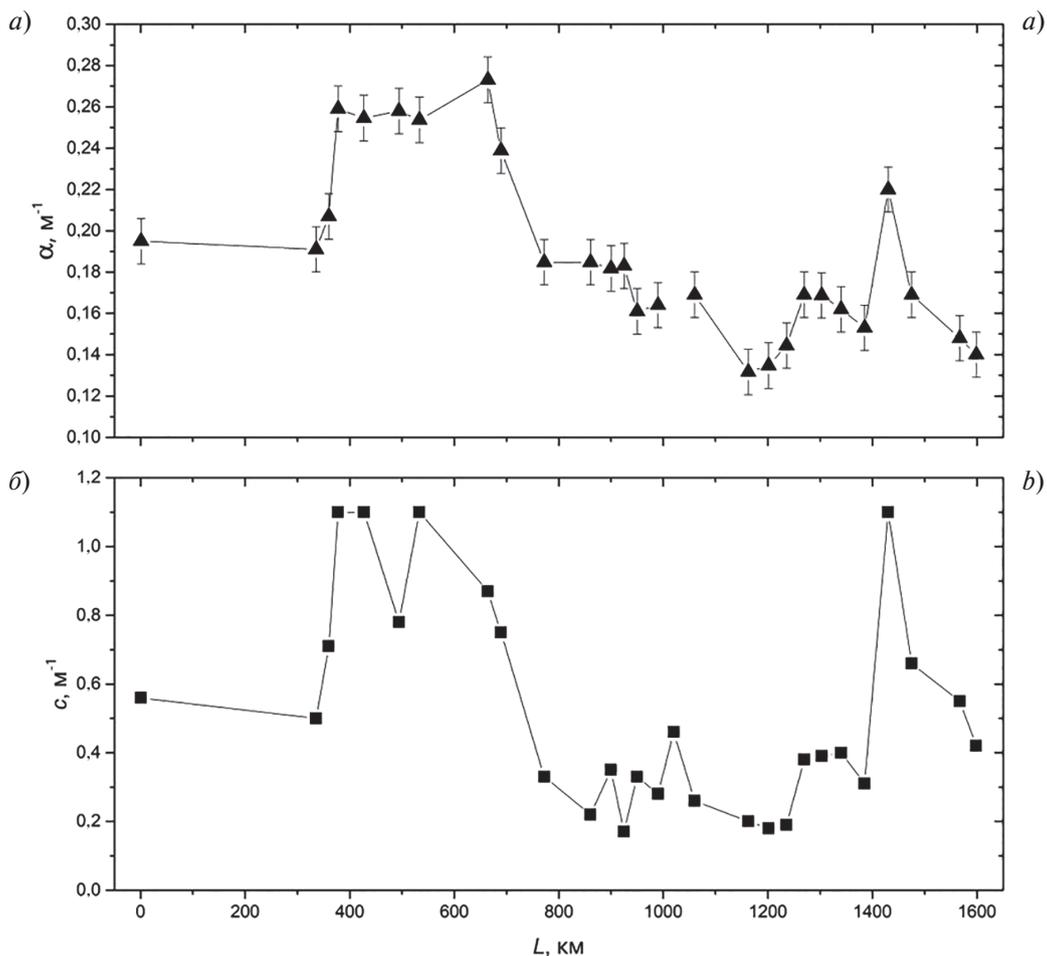


Рис. 3. Распределения по маршруту судна значений α и c , измеренных на станциях

Fig. 3. Distributions of α and c values measured at stations along the vessel's route

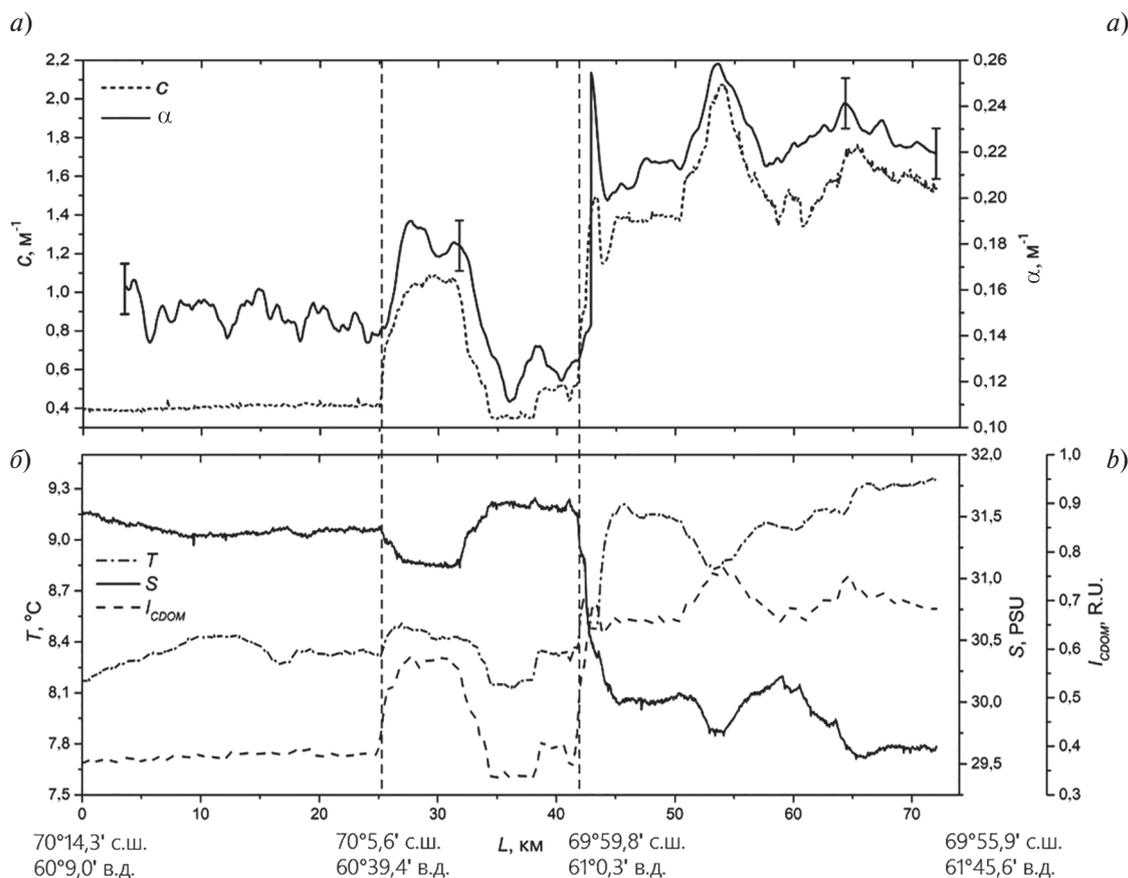


Рис. 4. Результаты измерений на ходу судна, выполненные на участке разреза между станциями 7430 и 7431: а – α и c , б – T , S , I_{CDOM}

Fig. 4. Cross-section along the ship route, carried out on the section between the stations 7430 and 7431: а – α and c , б – T , S , I_{CDOM}

рис. 4, а. Соответствующие распределения солёности S , температуры T и интенсивности флуоресценции ОРОВ I_{CDOM} , также измеренные проточным измерительным комплексом, показаны на рис. 4, б. Вид изменчивости α хорошо согласуется с видом других распределений. Распределение показателя ослабления лидарного эхо-сигнала α хорошо отражает положение фронтов. Отметим, что на разрезе зарегистрирована отрицательная корреляция распределения S и I_{CDOM} . Это свидетельствует о том, что разрез расположен в зоне влияния речного стока [12, 13].

4. Заключение

Выполнена судовая лидарная съемка западной части Карского моря. Для проведения съемки использован судовой поляризационный лидар ПЛД-1. Анализ полученных данных показал высокое сходство распределений показателя ослабления лидарного эхо-сигнала α и показателя ослабления света c . Выполнено сопоставление пространственного распределения α , c , температуры, солёности и интенсивности флуоресценции ОРОВ. Продемонстрировано хорошее соответствие параметров полученных распределений, совпадение пространственных положений различных особенностей распределения, локальных максимумов, минимумов и фронтальных зон.

Получен большой массив данных лидарного зондирования и синхронных сопутствующих измерений, позволяющий в дальнейшем провести их статистический анализ и установить регрессионные соотношения между конкретными гидрооптическими характеристиками и параметрами лидарных эхо-сигналов. Наличие таких соотношений позволит проводить количественные измерения гидрооптических характеристик лидарным методом с использованием лидара ПЛД-1. При продолжении работ представляет интерес анализ кросс-поляризованной компоненты лидарного эхо-сигнала, сформированной в основном многократно рассеянным излучением.

Благодарности

Авторы благодарят В.А. Артемьева за помощь в проведении сопутствующих измерений.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge V.A. Artemyev for assistance in carrying out contact measurements.

Финансирование

Обработка массива данных лидарного зондирования и его анализ выполнены в рамках государственного задания ИО РАН по теме № FMWE-2021-0014. Регистрация и обработка данных сопутствующих измерений выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-77-10059.

Funding

Processing and analysis of the lidar data array were carried out as a part of the state assignment of Shirshov Institute of Oceanology No. FMWE-2021-0014. Acquisition and processing of contact measurements data were carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 21-77-10059).

Литература

1. *Vasilkov A.P., Goldin Yu.A., Gureev B.A.* et al. 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, N 4. P. 778–789. doi:10.1093/icesjms/fsp029
3. *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
4. *Churnside J.H., Brown E.D., Parker-Stetter S.* et al. 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. *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
6. *Goldin Y.A., Vasilev A.N., Lisovskiy A.S., Chernook V.I.* Results of Barents Sea airborne lidar survey // *Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters SPIE*. 2007. Vol. 6615. P. 126–136. doi:10.1117/12.740456
7. *Xu P., Liu D., Shen Y.* 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. Vol. 254. P. 107201. doi:10.1016/j.jqsrt.2020.107201
8. *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.
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 // *Optics Express*. 2017. Vol. 25. P. 13577–13587. doi:10.1364/OE.25.013577
10. *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, N 261. doi:10.1038/s41377-022-00951-0
11. *Gordon H.R.* Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering // *Applied Optics*. 1982. Vol. 21, N 16. P. 2996–3001. doi:10.1364/AO.21.002996
12. *Буренков В.И., Гольдин Ю.А., Артемьев В.А., Шеберстов С.В.* Оптические характеристики вод Карского моря по судовым и спутниковым наблюдениям // *Океанология*. 2010. Т. 50, № 5. С. 716–729. doi:10.1134/S000143701005005X
13. *Буренков В.И., Гольдин Ю.А., Гуреев Б.А., Судьбин А.И.* Основные представления о распределении оптических свойств Карского моря // *Океанология*. 1995. Т. 35, № 3. С. 376–387.
14. *Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А.* Пространственно-временная изменчивость характеристик стоковой фронтальной зоны в Карском море в первые два десятилетия XXI века // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 4. С. 23–41. doi:10.59887/fpg/38mu-zda7-dper
15. *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
16. *Буренков В.И., Шеберстов С.В., Артемьев В.А., Таскаев В.Р.* Оценка погрешности измерения показателя ослабления света морской водой в мутных водах арктических морей // *Светотехника*. 2019. Т. 2. С. 55–60. doi:10.33383/2018-100

17. Артемьев В.А., Таскаев В.Р., Григорьев А.В. Автономный прозрачномер ПУМ-200 // 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.
18. Гольдин Ю.А., Глуховец Д.И., Гуреев Б.А. и др. Судовой проточный комплекс для измерения биооптических и гидрологических характеристик морской воды // Океанология. 2020. Т. 60, № 5. С. 814–822. doi:10.31857/S0030157420040103
19. 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

References

1. Vasilkov A.P., Goldin Yu.A., Gureev B.A. et al. 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. 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
4. Churnside J.H., Brown E.D., Parker-Stetter S. et al. 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. 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
6. Goldin Y.A., Vasilev A.N., Lisovskiy A.S., Chernook V.I. Results of Barents Sea airborne lidar survey. *Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters. SPIE*. 2007, 6615, 126–136. doi:10.1117/12.740456
7. Xu P., Liu D., Shen Y. 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
8. Kokhanenko G.P., Balin Y.S., Penner I.E., Shamanaev V.S. Lidar and *in situ* sensing of the upper layers of Baikal Lake water. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2011, 24(5), 478–486. doi:10.1134/S1024856011050083
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. *Optics Express*. 2017, 25, 13577–13587. doi:10.1364/OE.25.013577
10. 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
11. Gordon H.R. Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering. *Applied Optics*. 1982, 21(16), 2996–3001. doi:10.1364/AO.21.002996
12. Burenkov, V.I., Goldin, Y.A., Artem'ev, V.A. et al. Optical characteristics of the Kara Sea derived from shipborne and satellite data. *Oceanology*, 2010, 50, 675–687. doi:10.1134/S000143701005005X
13. Burenkov V.I., Goldin Yu.A., Gureev B.A., Sudbin A.I. Basic ideas about the distribution of optical properties of the Kara Sea. *Oceanology*. 1995, 35(3), 376–387 (in Russian).
14. Konik A.A., Zimin A.V., Atadzhanova O.A. Spatial and temporal variability of the characteristics of the river plume frontal zone in the Kara Sea in the first two decades of the XXI century. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15(4), 23–41. doi:10.59887/fpg/38mu-zda7-dpep
15. 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).
16. Burenkov V.I., Sheberstov S.V., Artemiev V.A., Taskaev V.R. Estimation of measurement error of the seawater beam attenuation coefficient in turbid water of Arctic seas. *Light & Engineering*. 2019, 2, 55–60. doi:10.33383/2018–100
17. Artemyev V.A., Taskaev V.R., Grigoriev A.V. Autonomous transparent meter PUM-200. *Materials of the XVII international scientific and technical conference: Modern methods and means of oceanological research (MSOI-2021)*. P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS. Moscow. 2021, 95–99 (in Russian).
18. Goldin Y.A., Glukhovets D.I., Gureev B.A. et al. Shipboard flow-through complex for measuring bio-optical and hydrological seawater characteristics. *Oceanology*. 2020, 60, 713–720. doi:10.1134/S0001437020040104
19. 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. doi:10.7868/S2073667321030084 (In Russian).

Лидарные исследования в первом этапе 89-го рейса нис «Академик Мстислав Келдыш»
Lidar research during the first stage of the 89th cruise of the R/V 'Academic Mstislav Keldysh'

Об авторах

ГЛУХОВ Владимир Алексеевич, РИНЦ AuthorID: 916467, ORCID ID: 0000-0003-4555-8879,
Scopus AuthorID: 57191414331, WoS ResearcherID: GSD-4886-2022, vl.glukhov@inbox.ru

ГОЛЬДИН Юрий Анатольевич, кандидат физико-математических наук, РИНЦ AuthorID: 58653,
ORCID ID: 00000-0001-5731-5458, Scopus AuthorID: 6602648464, goldin@ocean.ru

ГЛИТКО Олег Викторович, ORCID ID: 0009-0005-2313-2326, glitko_kisin@mail.ru

АГЛОВА Евгения Андреевна, РИНЦ AuthorID: 1160772, ORCID ID: 0009-0008-6698-0386,
Scopus AuthorID: 57396090100, aglova.ea@ocean.ru

ГЛУХОВЕЦ Дмитрий Ильич, кандидат физико-математических наук, РИНЦ AuthorID: 924346,
ORCID ID: 0000-0001-5641-4227, Scopus AuthorID: 57193736311, glukhovets@ocean.ru

РОДИОНОВ Максим Анатольевич, кандидат физико-математических наук, РИНЦ AuthorID: 203807,
ORCID ID: 0000-0002-7397-0548, Scopus AuthorID: 56034199200, maxim_rodionov@mail.ru