



DOI 10.59887/2073-6673.2025.18(2)-11  
EDN QWDKNG

УДК 551.46.08

© В. А. Глухов\*, Ю. А. Гольдин, О. В. Глитко, 2025

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36  
\*vl.glukhov@inbox.ru

### Исследование зависимости характеристик лидарного эхо-сигнала от протяженности трассы зондирования

Статья поступила в редакцию 23.04.2025, после доработки 14.06.2025, принята в печать 20.06.2025

#### Аннотация

Натурные измерения характеристик отраженного от дна эхо-сигнала выполнены в акватории Бечевинской бухты. При проведении исследований использован авиационный поляризационный лидар АПЛ-3 (энергия зондирующего импульса 45 мДж, диаметр приемной оптической системы 100 мм, длительность импульсной характеристики лидара по уровню 0,5–10,8 нс). Диапазон изменения глубин при проведении исследований составил от 3 до 22 м, высота полета менялась от 500 до 1200 м. Оценка гидрооптических характеристик вод бухты проводилась по данным лидарного зондирования. Результаты натурных экспериментов показали, что зависимость величины и формы лидарного эхо-сигнала от протяженности трассы зондирования при регистрации слоев воды и морского дна имеет более сложный вид, чем это следует из общепринятой формы записи лидарного уравнения. Введение дополнительного члена в лидарное уравнение, определяющего дисперсию распределения освещенности в поперечном сечении бесконечно узкого пучка света, прошедшего через водный слой заданной толщины, позволило более точно описать полученные экспериментальные зависимости. Зарегистрированный эффект необходимо учитывать при проектировании лидарных комплексов, а также при обработке и анализе данных лидарной съемки.

**Ключевые слова:** батиметрический лидар, батиметрическая съемка, лидарное уравнение, высота зондирования, геометрический фактор

© V. A. Glukhov\*, Yu. A. Goldin, O. V. Glitko, 2025

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow 117997, Russia  
\*vl.glukhov@inbox.ru

### Investigation of the Dependence of Lidar Echo Signal Characteristics on the Length of the Sounding Path

Received 23.04.2025, Revised 14.06.2025, Accepted 20.06.2025

#### Abstract

Field measurements of the characteristics of the bottom-reflected lidar echo signal were conducted in the waters of Bechevinskaya Bay. The studies employed the APL-3 airborne polarization lidar (sounding pulse energy of 45 mJ, receiving optical system diameter of 100 mm, and system response function duration at the 0.5 level of 10.8 ns). The depth range during the investigations varied from 3 to 22 m, while the flight altitude ranged from 500 to 1200 m. The hydrooptical characteristics of the bay waters were assessed based on lidar sounding data. For the analysis of field measurement data, areas with similar values of the lidar attenuation coefficient were selected. The results of field experiments demonstrated that the relationship between the magnitude

Ссылка для цитирования: Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Глитко О.В. Исследование зависимости характеристик лидарного эхо-сигнала от протяженности трассы зондирования // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2025. Т. 18, № 2. С. 151–161. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(2\)-11](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(2)-11) EDN QWDKNG

For citation: Glukhov V.A., Goldin Yu.A., Glitko O.V. Investigation of the Dependence of Lidar Echo Signal Characteristics on the Length of the Sounding Path. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(2):151–161. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(2\)-11](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(2)-11)

of the lidar echo signal and the length of the sounding path for water layers and the seabed is more complex than what is suggested by the conventional form of the lidar equation. The introduction of an additional term into the lidar equation, which defines the dispersion of the irradiance distribution in the cross-section of an infinitely narrow beam of light passing through a water layer of a given thickness, allowed for a more accurate description of the obtained experimental dependencies. The registered effect must be taken into account when designing lidar systems, as well as during the processing and analysis of lidar survey data.

**Keywords:** bathymetric lidar, bathymetric survey, lidar equation, sounding altitude, geometric factor

## 1. Введение

Морские радиометрические (профилирующие) лидары позволяют решать ряд океанологических задач [1–3]. Среди них отметим поиск и регистрацию положения слоев повышенного светорассеяния [4, 5], определение гидрооптических характеристик приповерхностного слоя морской воды и их пространственной изменчивости [6–9], наблюдение внутренних волн [10–12]. Особое место занимает лазерная батиметрия [13]. Это наиболее развитый раздел лидарного зондирования. Известен ряд лидарных батиметрических систем, оформленных в виде сертифицированных средств измерений [14–16]. Такие системы применяются для регистрации изменчивости глубины дна мелководных прибрежных морских акваторий, мониторинга состояния фарватеров, а также для исследования дна внутренних водоемов и рек [16, 17].

Трасса лидарного зондирования включает атмосферный и подводный участки. В зависимости от объекта зондирования и прозрачности воды протяженность подводного участка трассы зондирования может принимать значения от единиц метров до нескольких десятков метров. Диапазон изменения протяженности атмосферного участка существенно больше. В подводных лидарах атмосферный участок отсутствует. В лидарах судового базирования его протяженность меняется в диапазоне 1–20 м. В авиационных лидарах протяженность атмосферного участка может меняться от 50 м до 500 м. В отдельных случаях его протяженность может увеличиваться до значений 1–2 км [18] и даже до значений около 10 км [19]. При размещении лидара на спутнике протяженность атмосферного участка увеличивается до сотен километров [20].

Обычно в процессе лидарной съемки высота расположения лидара фиксирована, поэтому экспериментальные данные о зависимости результатов съемки от высоты практически отсутствуют. Вместе с тем, протяженность атмосферного участка существенно влияет на амплитуду и форму спада лидарного эхо-сигнала. В работах [13, 21, 22] с использованием аналитического решения уравнения переноса в малоугловом приближении исследуется влияние протяженности трассы зондирования на величину отраженного от дна эхо-сигнала. Зависимости амплитуды эхо-сигналов, отраженных от поверхности, толщи воды и морского дна от протяженности трассы зондирования, полученные в результате расчетов [13, 21, 22], отличаются от общепринятой обратно квадратичной зависимости. Они имеют более сложный характер. Цель данной работы — экспериментальное исследование зависимости амплитуды и формы отраженных от слоев воды и дна эхо-сигналов от протяженностей атмосферного и подводного участков трассы зондирования.

## 2. Материалы и методы

### 2.1. Описание аппаратуры

Для проведения исследований использован авиационный поляризационный лидар АПЛ-3 (разработка ИО РАН [23]). Для оцифровки и регистрации лидарных эхо-сигналов использовался цифровой четырехканальный осциллограф LeCroy HDO4034. Оптический блок лидара был установлен над открытым оптическим люком самолета-лаборатории под углом  $\varphi = 15^\circ$  от вертикали, что позволило минимизировать влияния зеркальных бликов луча лазера от взволнованной поверхности воды. В процессе лидарной съемки регистрировалась кросс-поляризованная компонента лидарного эхо-сигнала. Основные технические характеристики лидара АПЛ-3 сведены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Основные технические характеристики лидара АПЛ-3

Main technical characteristics of the APL-3 lidar

Характеристика	Значение
Длина волны зондирующего излучения, нм	532
Длительность зондирующего импульса по уровню 0,5 мощности $\Delta t$ , нс	7

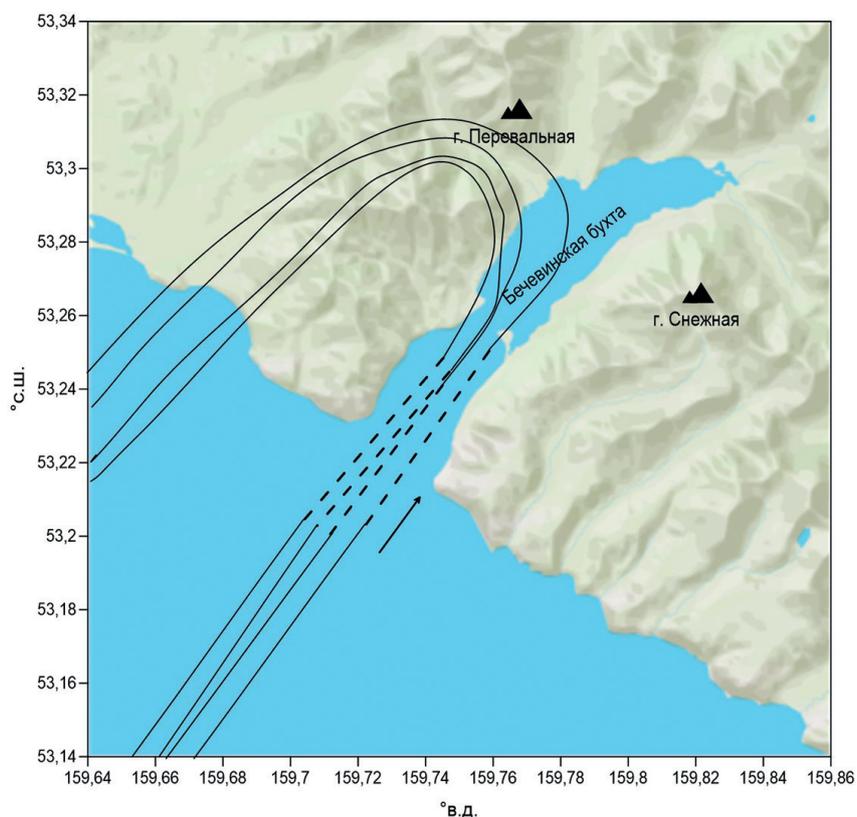
Окончание табл. 1

Fin table 1

Характеристика	Значение
Энергия зондирующего импульса $W_0$ , мДж	45
Частота зондирования, Гц	30
Расходимость зондирующего пучка $2\theta_1$ , мрад	5
Угол поля зрения приемной оптической системы $2\theta_2$ , град. (мрад)	2 (35)
Диаметр входного объектива, мм	100
Разрядность АЦП, бит	14
Частота оцифровки лидарных эхо-сигналов, ГГц	2,5

## 2.2. Время и место проведения натуральных исследований

Экспериментальные исследования проводились в августе 2018 г. в районе Бечевинской бухты Авачинского залива полуострова Камчатка [18, 24]. Пространственное положение галсов показано на рис. 1. Бухта окружена сопками высотой около 1 км. Требование соблюдения условий безопасности полетов позволили выполнить измерения только на входе в бухту. В ходе батиметрической съёмки было выполнено 4 галса самолета с высотой полета 500, 700, 900 и 1200 м. Дно бухты характеризуется изменчивостью глубин, что позволяет на относительно небольшом участке акватории получить лидарные эхо-сигналы, соответствующие значениям глубины дна от 3 до 22 м. Во время проведения натурального эксперимента состояние поверхности воды было близко к штилевому (скорость ветра не превышала 2 м/с). Это подтверждается данными визуальных наблюдений с борта авианосителя с использованием фотокамеры, установленной в фотолуке.



**Рис. 1.** Схема полетов над акваторией Бечевинской бухты. Пунктиром показаны участки, на которых производилось лидарное зондирование. Стрелкой показано направления полета на галсах

**Fig. 1.** Flight path over Bechevinskaya Bay. The dashed lines indicate the sections where lidar sounding was performed. The arrow shows the direction of flight along the tracks

### 2.3. Методика обработки данных лидарного зондирования

Обработка данных лидарного зондирования морского дна производилась с использованием стандартного для батиметрической съемки метода [13, 24, 25]. Пример определения глубины дна  $z_b$  показан на рис. 2. За точку отсчета принимается момент начала эхо-сигнала, сформированного приповерхностными слоями воды. Начало пика от дна принимается за его положение. Затем рассчитывается временной интервал  $\Delta t_b$  между моментами приема импульсов от приповерхностных слоев воды  $t_s$  и от дна  $t_b$ :

$$\Delta t_b = t_b - t_s. \quad (1)$$

Глубина дна  $z_b$  определяется по формуле:

$$z_b = \frac{c_w \Delta t_b}{2}, \quad (2)$$

где  $c_w$  — скорость света в морской воде. В случае, когда сигнал от дна расположен на спаде лидарного эхо-сигнала, амплитуда сигнала от дна  $P_b$  определяется как разница амплитуд максимума сигнала от дна и амплитуды сигнала от воды в момент времени, соответствующий моменту максимума амплитуды от дна. Пример такого эхо-сигнала, полученного с высоты 900 м при глубине дна 12,7 м показан на рис. 2, а. В случае, когда сигнал от дна формируется на участке, где уровень эхо-сигнала от толщи воды ниже уровня шумов, его амплитуда  $P_b$  отсчитывается от уровня шумов приемо-регистрирующей системы. Пример такого эхо-сигнала, полученного с высоты 500 м при глубине дна 21,5 м, показан на рис. 2, б.

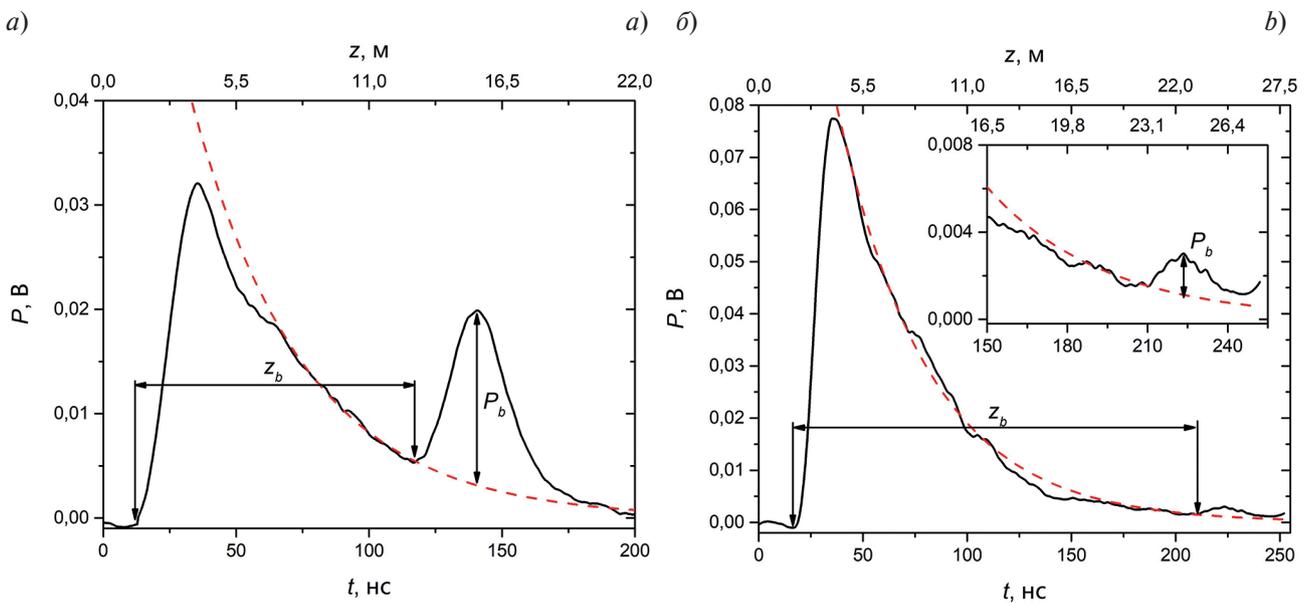


Рис. 2. Примеры лидарных эхо-сигналов, демонстрирующие метод определения глубины дна  $z_b$  и амплитуды сигнала от дна  $P_b$ , полученных с высоты 900 м при глубине дна 12,7 м (а) и с высоты 500 м при глубине дна 21,5 м (б)

Fig. 2. Examples of lidar echo signals illustrating the method for determining the bottom depth  $z_b$  and the amplitude of the bottom signal  $P_b$ , obtained from an altitude of 900 m at a bottom depth of 12.7 m (a) and from an altitude of 500 m at a bottom depth of 21.5 m (b)

### 3. Результаты и их обсуждение

Зависимость мощности лидарного эхо-сигнала  $P$  от времени  $t$  описывается лидарным уравнением [1, 26]. В общепринятой форме оно выглядит следующим образом:

$$P\left(t = \frac{2Z}{c_w}\right) = \frac{c_w W_0 A T_O (1-r)^2}{2(n_w H + Z)^2} \beta'(\pi, Z) \exp\left[-2 \int_0^Z \alpha(Z') dZ'\right], \quad (3)$$

где  $Z$  и  $H$  — протяженности подводного и надводного участков трассы зондирования,  $c_w$  — скорость света в морской воде,  $n_w$  — показатель преломления морской воды,  $W_0$  — энергия зондирующего импульса,

$A$  — площадь приемной апертуры,  $T_0$  — пропускание приемной системы,  $r$  — коэффициент отражения Френеля для границы раздела воздух–морская вода,  $\alpha(Z)$  — показатель ослабления лидарного эхо-сигнала,  $\beta'(\pi, Z)$  — эффективное значение показателя направленного рассеяния  $\beta(\theta, Z)$  (volume scattering function — VSF) при значении угла рассеяния  $\theta = 180^\circ$ . Истинная глубина  $z$  может быть пересчитана из  $Z$  с учетом угла зондирования  $\varphi$ . Момент времени  $t$  отсчитывается от момента пересечения зондирующим импульсом поверхности воды. В случае расчета эхо-сигнала, отраженного от дна, выражение  $\frac{c_w \Delta t}{2} \cdot 2\pi\beta'(\pi, Z)$  заменяется на коэффициент отражения дна  $R_b$ . Зависимость мощности эхо-сигнала  $P$  от протяженности трассы зондирования определяется так называемым геометрическим фактором  $(n_w H + Z)^{-2}$ .

Лидарное уравнение (3) записано в предположении однократного рассеяния назад. Предполагается также, что угол поля зрения приемника много больше начальной расходимости лазерного пучка  $\theta_1^2 \ll \theta_2^2$  и достаточно большой, чтобы перехватить все излучение, отраженное от слоя воды на соответствующей глубине. В природных условиях вследствие многократного рассеяния на пути от поверхности воды до объекта зондирования и обратно это предположение не всегда соблюдается. Необходима более универсальная формула, которая применима в случае, когда лазерное пятно на глубине зондируемого слоя полностью не укладывается в поле зрения фотоприемника. Удовлетворяющая этому требованию формула имеет вид [27]:

$$P(Z) = \frac{(c_w W_0 / 4\pi n_w^2) A \theta_2^2 T_0 (1-r)^2}{\theta_2^2 (H + Z / n_w)^2 + 2D(Z)} \cdot b_b(Z) \cdot \exp\left(-2 \int_0^Z \alpha(z) dz\right), \quad (4)$$

$$D(Z) = \frac{2}{q^2} \int_0^Z b_f(z) (Z - z)^2 dz, \quad (5)$$

где  $2\theta_2$  — угол поля зрения фотоприемника;  $b_b(Z) = 2\pi\beta'(\pi, Z)$  — показатель обратного рассеяния;  $\alpha(Z) = a(Z) + 2b_b(Z)$ ,  $a(Z)$  — показатель поглощения;  $D(Z)$  — дисперсия распределения освещенности в поперечном сечении бесконечно узкого пучка света, прошедшего через водный слой толщины  $Z$ ;  $b_f(Z) = b(Z) - 2b_b(Z)$  — показатель рассеяния «вперед»,  $b(Z)$  — полный показатель рассеяния;  $q$  — параметр передней части индикатрисы рассеяния, которая задается в виде:

$$x_f(\theta) = \frac{2q}{\theta} \exp(-q\theta). \quad (6)$$

Формула (4) получена при расчете мощности импульсного сигнала однократного обратного рассеяния с учетом многократного рассеяния света на малые углы (с использованием решения уравнения переноса излучения в малоугловом диффузионном приближении в качестве функции размытия пучка — beam spread function). Формула (4) отличается от формулы (3) наличием слагаемого  $2D(Z)$ , которое учитывает изменение ширины эффективных диаграмм направленности излучателя и приемника из-за многократного рассеяния света «вперед» при его двукратном прохождении через водный слой толщины  $Z$ . В случае  $b_1 = \text{const}$  функция  $D(Z)$  может быть представлена в виде:

$$D(Z) = \frac{2}{3q^2} b_1 Z^3. \quad (7)$$

Массив зарегистрированных в акватории Бечевинской бухты данных природных измерений позволяет оценить применимость форм записи лидарного уравнения с использованием уравнения (3) и уравнения (4) для описания мощности сигнала обратного рассеяния от дна и толщи воды на заданной глубине. Обработка экспериментальных данных проводилась для глубин дна 8, 10, 12, 15 и 17 м, зарегистрированных на высотах 500, 700, 900, 1200 м. Для каждой из четырех высот для заданных глубин подбирались точки зондирования, близкие по пространственному положению и по значению показателя ослабления лидарного эхо-сигнала  $\alpha$ , зависящего от гидрооптических характеристик. Предполагалось также, что коэффициент отражения дна  $R_b$  в выбранных точках не меняется. Амплитуда эхо-сигнала от дна  $P_b$  определялась для каждого зондирования. Методика определения  $P_b$  представлена в разделе 2.3. Для последующего анализа использовалась амплитуда эхо-сигнала  $P_b$ , усредненная по 10 последовательных зондированиям.

Для оценки затухания лидарного эхо-сигнала от глубины  $Z_b$  и протяженности атмосферного участка трассы зондирования  $H$  использовались две функции аппроксимации, вид которых следует из форм записи лидарного уравнения (3) и (4). Для удобства представим формулы (3) и (4) в виде:

$$P(H, z) = \frac{f_1(z)}{f_2(H, z)}, \quad (8)$$

$$P(H, z) = \frac{f_1(z)}{f_2(H, z) + f_3(z)}, \quad (9)$$

$$f_1(z) = \frac{c_w}{4n_w^2} W_0 A T_0 \theta_2^2 (1-r)^2 b_b(z) \exp\left(-2 \int_0^z \alpha(z') dz'\right), \quad (10)$$

$$f_2(H, z) = \theta_2^2 \left(H + \frac{z}{n_w}\right)^2, \quad (11)$$

$$f_3(z) = \frac{2}{3q^2} b_1 z^3. \quad (12)$$

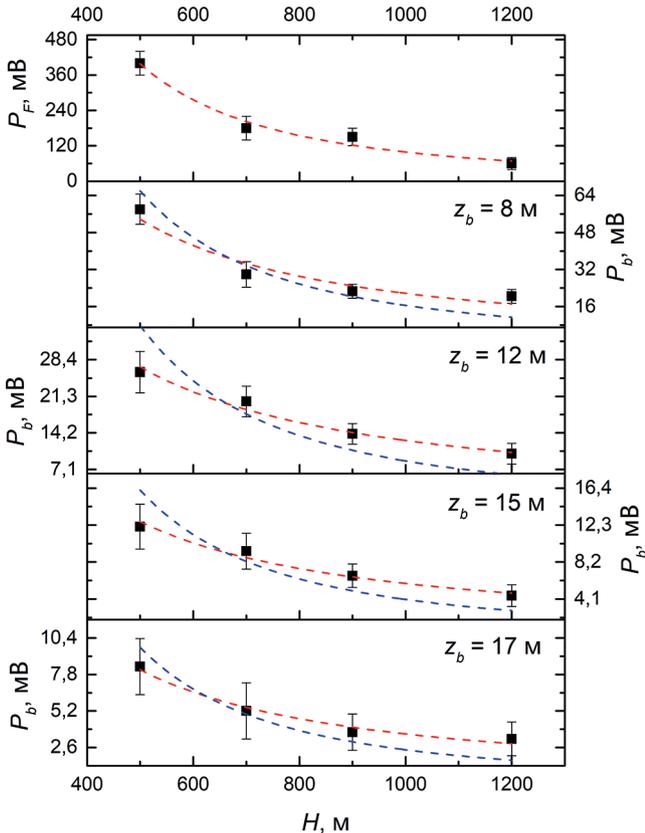
Для каждой заданной глубины  $z$  зависимость ослабления эхо-сигнала  $P$  от высоты полета определяется только геометрическим фактором  $f_2(H, z)$ . Таким образом, формулы (8) и (9) могут быть использованы для аппроксимации экспериментальных данных, полученных для заданных глубин  $z$  при различных высотах зондирования  $H$ . Значения функций  $f_1(z)$  и  $f_3(z)$  будут константами аппроксимации, определяемыми методом наименьших квадратов. На рис. 3 представлены усредненные значения амплитуд эхо-сигналов при френелевском отражении от поверхности воды  $P_F$ , а также значения  $P_b$  для глубин 8, 12, 15 и 17 м, зарегистрированные с различных высот зондирования. Синей пунктирной линией обозначена аппроксимация экспериментальных данных с использованием уравнения (8), красной — с использованием уравнения (9). Для случая френелевского отражения от поверхности воды  $P_F$  аппроксимационные кривые совпадают, в остальных случаях — различаются. Видно, что для дна с глубинами более 8 м аппроксимационная кривая, построенная с использованием уравнения (9), лучше описывает данные натурных измерений.

Аналогичная процедура была выполнена для амплитуд эхо-сигналов от слоев воды, расположенных на глубинах 3, 8, 10, 12, 15 м. Измерения значений амплитуд эхо-сигналов проводилось на участке входа в бухту, где глубина дна превышала 22 м. Для разных высот выбирались точки зондирования, близкие по пространственному положению. На рис. 4 представлены значения амплитуды эхо-сигнала для случая максимума от верхних слоев воды  $P_{max}$  (для кросс-поляризации максимум формируется на глубине около

3 м), а также значения амплитуды  $P$  для глубин 8, 12, и 15 м.

Уравнение (9) показывает, что имея две записи сигнала  $P(H, z)$  как функции глубины  $z$ , сделанные в близких местах с двух разных высот  $H_1$  и  $H_2$ , можно определить функцию  $f_3(z)$  следующим образом:

$$f_3(z) = \frac{f_2(H_1, z)P(H_1, z) - f_2(H_2, z)P(H_2, z)}{P(H_2, z) - P(H_1, z)}. \quad (13)$$

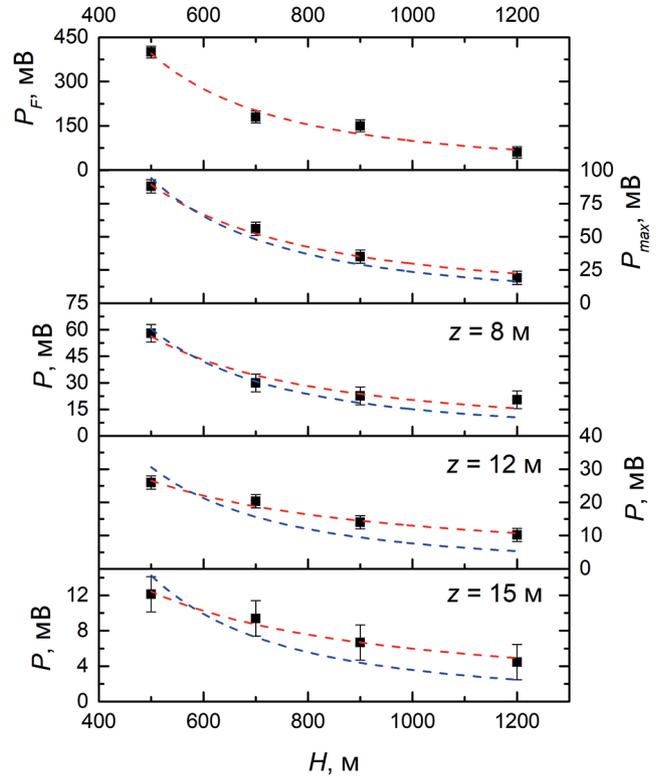


**Рис. 3.** Усредненные значения амплитуд эхо-сигналов при френелевском отражении от поверхности воды  $P_F$ , а также значения амплитуд эхо-сигналов от морского дна  $P_b$  для глубин 8, 12, 15 и 17 м, зарегистрированные с различных высот зондирования. Синей пунктирной линией обозначена аппроксимация экспериментальных данных с использованием формулы (8), красной — с использованием формулы (9)

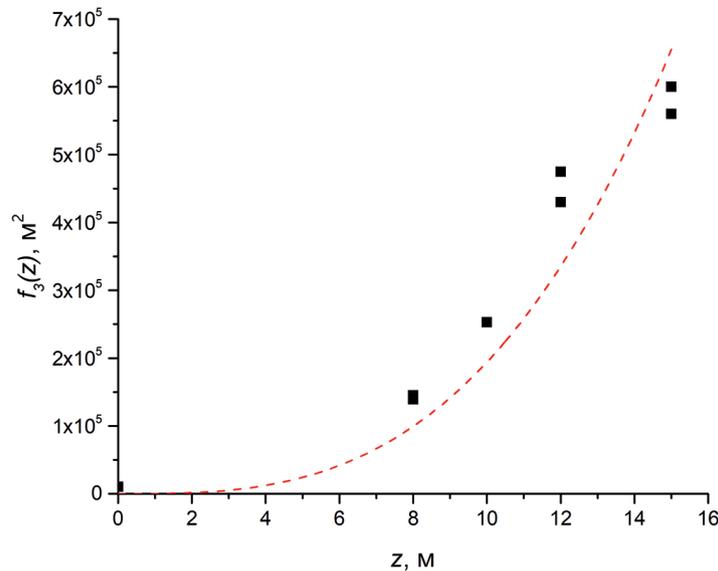
**Fig. 3.** Values of the echo signal amplitude for the case of Fresnel reflection from the water surface  $P_F$ , as well as values of  $P_b$  for depths of 8, 12, 15, and 17 m. The blue dashed line indicates the approximation of the experimental data using equation (8), while the red line represents the approximation using equation (9)

**Рис. 4.** Усредненные значения амплитуд эхо-сигналов для случая максимума от верхних слоев воды  $P_{\max}$ , а также значения  $P$  для глубин 8, 12 и 15 м, зарегистрированные с различных высот зондирования. Синей пунктирной линией обозначена аппроксимация экспериментальных данных с использованием формулы (8), красной — с использованием формулы (9)

**Fig. 4.** Values of the echo signal amplitude for the case of the maximum from the upper water layers  $P_{\max}$ , as well as values of  $P$  for depths of 8, 12, and 15 m. The blue dashed line indicates the approximation of the experimental data using equation (8), while the red line represents the approximation using equation (9)



На рис. 5 представлены оценки величины функции  $f_3(z)$  в зависимости от глубины зондирования, полученные для слоев воды с применением уравнения (13). Красным пунктиром обозначена аппроксимация полученных данных функцией типа (12), содержащей третью степень по  $z$ .



**Рис. 5.** Оценка величины функции  $f_3(z)$  в зависимости от глубины зондирования для слоев воды, полученные с применением уравнения (13)

**Fig. 5.** The assessment of the values of the function  $f_3(z)$  as a function of sounding depth, obtained using equation (13)

Для оценки вклада дисперсии распределения освещенности  $D(z)$  в затухание лидарного эхо-сигнала рассмотрим отношение значений функций  $f_3(z)$  и  $f_2(H, z)$  для разных высот зондирования в зависимости от глубины дна (рис. 6). Видно, что с увеличением глубины зондирования вклад функции  $D(z)$  по сравнению с геометрическим фактором становится существенным.

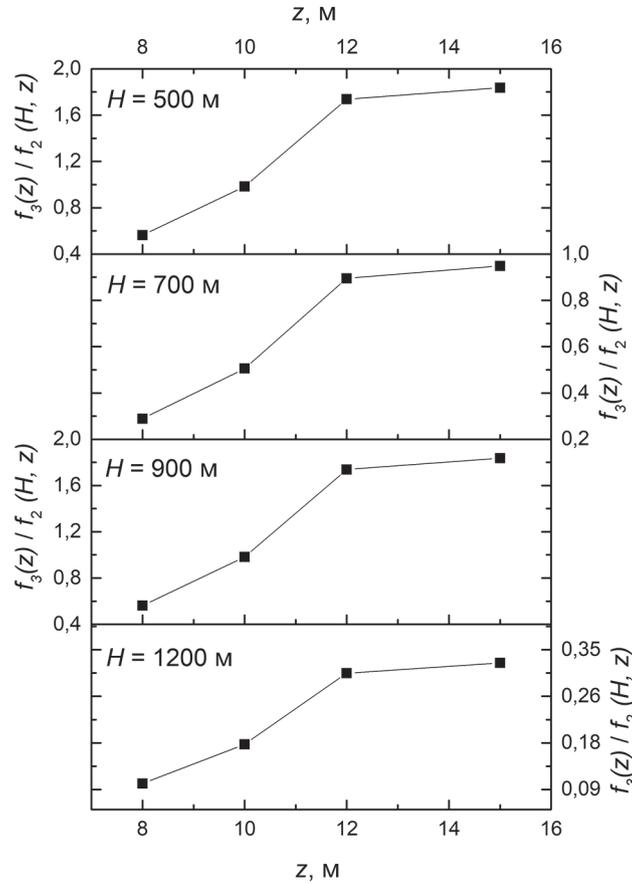


Рис. 6. Отношение значений функций  $f_2(H, z)$  и  $f_3(z)$  для разных высот зондирования в зависимости от глубины  $z$

Fig. 6. The ratio of the  $f_2(H, z)$  and  $f_3(z)$  function values for different sounding altitudes as a function of depth  $z$

Значение  $f_3(z) \approx 0$  получено в предположении, что эхо-сигнал формируется за счет однократного рассеяния от Ламбертовской поверхности, расположенной на глубине  $Z$ , при условии малой расходимости зондирующего пучка  $\theta_1$  и угла поля зрения приемной системы  $\theta_2$ , который существенно больше расходимости зондирующего пучка ( $\theta_1 \ll \theta_2$ ). В этом случае диаметр площадки на дне  $D_b$ , освещаемый зондирующим пучком, равен произведению протяженности трассы зондирования на расходимость зондирующего пучка. Этому условию удовлетворяет френелевское отражение от поверхности воды, когда диаметр освещенной площадки определяется только расходимостью зондирующего луча и достаточно мал. В случае, когда дно находится на глубине  $z_b$ , вклад многократного рассеяния на пути от поверхности воды до дна и обратно приводит к увеличению площадки на поверхности воды  $D_s$ , через которую выходит отраженное от дна и попадающее в приемник излучение. С увеличением  $z_b$  вклад многократного рассеяния увеличивается. Размер площадки  $D_s$  становится больше, чем размер площадки, попадающей в поле зрения приемника  $D_r$ . При увеличении высоты зондирования отношение диаметров площадок  $D_r/D_s$  уменьшается, что приводит к снижению скорости затухания лидарного эхо-сигнала и, соответственно, увеличению вклада функции  $D(z)$ . Аналогичные процессы происходят при отражении от слоев воды, расположенных на фиксированной глубине.

#### 4. Заключение

Результаты натурных экспериментов показали, что зависимость величины и формы лидарного эхо-сигнала от протяженности трассы зондирования при зондировании слоев воды и морского дна имеет более сложный вид, чем это следует из лидарного уравнения (3), записанного в общепринятой форме. По-видимому, это обусловлено вкладом многократного рассеяния на пути от поверхности воды до объекта зондирования и обратно из-за чего рассеяния лазерного пятна на глубине зондируемого слоя полностью

не укладывается в поле зрения фотоприемника. В этом случае введение дополнительного члена  $D(z)$  в лидарное уравнение, определяющего дисперсию распределения освещенности в поперечном сечении бесконечно узкого пучка света, прошедшего через водный слой толщины  $z$ , позволяет более точно описать полученные экспериментальные зависимости. Натурные эксперименты сложны и имеют высокую стоимость, поэтому эффективным инструментом для проверки точности использованной формы записи лидарного уравнения могут стать расчеты методом Монте-Карло. При продолжении работ в данном направлении интерес представляет исследование влияния указанного эффекта в зависимости от протяженности атмосферного и подводного участков в водах с различными значениями гидрооптических характеристик.

### **Благодарности**

Авторы благодарят М.Л. Сбитного за организацию полетов над акваторией Бечевинской бухты и Л.С. Долина за обсуждение и полезные рекомендации при подготовке настоящей работы.

### **Acknowledgments**

The authors gratefully acknowledge M.L. Sbitnoy for organizing the flights over Bechevinskaya Bay and L.S. Dolin for useful recommendations used in conducting this work.

### **Финансирование**

Работа была выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0028).

### **Funding**

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Shirshov Institute of Oceanology (IO RAS) (theme No. FMWE-2024-0028).

### **Литература**

1. *Churnside J.H.* Review of profiling oceanographic lidar // *Optical Engineering*. 2014. Vol. 53, No 5. P. 051405–051405. doi:10.1117/1.OE.53.5.051405 EDN: SOSNBF
2. *Chen W., Chen P., Zhang H.* et al. Review of airborne oceanic lidar remote sensing // *Intelligent Marine Technology Systems*. 2023. Vol. 1, N10. doi:10.1007/s44295-023-00007-y EDN: CKSHDC
3. *Глухов В.А., Гольдин Ю.А.* Морские радиометрические лидары и их использование для решения океанологических задач // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2024. Т. 17, No 1. С. 104–128. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(1)-9 EDN: YMUPXI
4. *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, N24. P. 4353–4364. doi:10.1364/AO.40.004353 EDN: LGLRSB
5. *Churnside J.H., Donaghay P.L.* Thin scattering layers observed by airborne lidar // *ICES Journal of Marine Science*. 2009. Vol. 66, No 4. P. 778–789. doi:10.1093/icesjms/fsp029 EDN: MYWKLP
6. *Collister B.L., Zimmerman R.C., Hill V.J.* et al. Polarized lidar and ocean particles: insights from a mesoscale coccolithophore bloom // *Applied Optics*. 2020. Vol. 59, No 15. P. 4650–4662. doi:10.1364/AO.389845 EDN: PWHSKU
7. *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. Vol. 254. P. 107201. doi:10.1016/j.jqsrt.2020.107201 EDN: DZGWAC
8. *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 EDN: ZXMTFQ
9. *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. No. 3. С. 32–43. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(3)-3 EDN: DEOVKB
10. *Churnside J.H., Marchbanks R.D., Le J.H.* et al. Airborne lidar detection and characterization of internal waves in a shallow fjord // *Journal of Applied Remote Sensing*. 2012. Vol. 6, No 1. P. 063611–063611. doi:10.1117/1.JRS.6.063611 EDN: UTDVV

11. Долин Л.С., Долина И.С., Савельев В.А. Лидарный метод определения характеристик внутренних волн // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 4. С. 501–501. EDN: PANHOZ
12. 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, No 3. С. 86–97. doi:10.7868/S2073667321030084 EDN: FZLYDG
13. Philpot W. Airborne Laser Hydrography II. 2019. doi:10.7298/JXM9-G971
14. Riegl VQ-880-G Data sheet [Электронный ресурс]. URL: [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegldownloads/Infosheet\\_VQ-880-G\\_2016-05-23.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/Infosheet_VQ-880-G_2016-05-23.pdf) (дата обращения: 21.02.2025).
15. Lin Wu, Yifu Chen, Yuan Le et al. A high-precision fusion bathymetry of multi-channel waveform curvature for bathymetric LiDAR systems // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2024. Vol. 128, No. 103770. doi:10.1016/j.jag.2024.103770 EDN: GPBYXD
16. Mandlbürger G. A review of active and passive optical methods in hydrography // The International Hydrographic Review. 2022. No. 28. P. 8–52. doi:10.58440/ihr-28-a15 EDN: AOUMWW
17. Mandlbürger G., Hauer C., Wieser M., Pfeifer N. Topo-Bathymetric LiDAR for Monitoring River Morphodynamics and In-stream Habitats – A Case Study at the Pielach River // Remote Sensing. 2015. Vol. 7. P. 6160–6195. doi:10.3390/rs70506160
18. Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Родионов М.А., Гуреев Б.А., Глитко О.В. Авиационная лидарная батиметрическая съемка прибрежных акваторий с большой высоты // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, No. 4. С. 85–93. doi:10.7868/S2073667319040105 EDN: ZCARMN
19. Churnside J. H., Hair J.W., Hostetler C.A., Scarino A.J. Ocean backscatter profiling using high-spectral-resolution lidar and a perturbation retrieval // Remote Sensing. 2018. Vol. 10, No. 12. P. 2003. doi:10.3390/rs10122003 EDN: YXVEZQ
20. Lu X., Hu Y., Trepte C., Zeng S., Churnside J.H. Ocean sub-surface studies with the CALIPSO spaceborne lidar // J. Geophys. Res. Oceans. 2014. Vol. 119. P. 4305–4317. doi:10.1002/2014JC009970 EDN: UVNTSD
21. Kim M., Kopilevich Y., Feygels V. et al. Modeling of airborne bathymetric lidar waveforms // Advances in Topobathymetric Mapping, Models, and Applications. Journal of Coastal Research, Special Issue. 2016. No. 76. P. 18–30. doi:10.2112/SI76-003 EDN: YUWOGX
22. Kim M. Airborne Waveform Lidar Simulator Using the Radiative Transfer of a Laser Pulse // Appl. Sci. 2019. Vol. 9, No. 12. P. 2452. doi:10.3390/app9122452 EDN: JRTWOA
23. Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Глитко О.В., Родионов М.А. Авиационный поляризационный лидар для съемки морских акваторий // Труды XXVIII Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», г. Томск, 04–08 июля 2022 г. Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2022. С. 187–190. EDN: OOMJPU
24. Глухов В.А. Закономерности формирования сигналов обратного рассеяния при лидарном зондировании приповерхностных слоев морской воды и дна: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2024. 115 с.
25. Wang C. K., Philpot W.D. Using airborne bathymetric lidar to detect bottom type variation in shallow waters // Remote sensing of Environment. 2007. Vol. 106, № 1. P. 123–135. doi:10.1016/j.rse.2006.08.003 EDN: LWZDYT
26. Gordon H.R. Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering // Applied Optics. 1982. Vol. 21, No 16. P. 2996–3001. doi: 10.1364/AO.21.002996
27. 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.

## References

1. Churnside JH. Review of profiling oceanographic lidar. *Optical Engineering*. 2014;53(5): 051405–051405. doi:10.1117/1.OE.53.5.051405
2. Chen W, Chen P, Zhang H. et al. Review of airborne oceanic lidar remote sensing. *Intelligent Marine Technology Systems*. 2023;1(10). doi:10.1007/s44295-023-00007-y
3. Glukhov VA, Goldin YuA. 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
4. Vasilkov AP, Goldin YuA, Gureev BA. et al. Airborne polarized lidar detection of scattering layers in the ocean. *Applied Optics*. 2001;40(24):4353–4364. doi:10.1364/AO.40.004353
5. Churnside JH, Donaghay PL. Thin scattering layers observed by airborne lidar. *ICES Journal of Marine Science*. 2009;66(4):778–789. doi:10.1093/icesjms/fsp029
6. Collister BL, Zimmerman RC, Hill VJ. et al. Polarized lidar and ocean particles: insights from a mesoscale coccolithophore bloom. *Applied Optics*. 2020;59(15):4650–4662. doi:10.1364/AO.389845
7. 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

**Исследование зависимости характеристик лидарного эхо-сигнала от протяженности трассы зондирования**  
**Investigation of the Dependence of Lidar Echo Signal Characteristics on the Length of the Sounding Path**

8. Glukhov VA, Goldin YuA, Glitko OV. et al. Investigation of the Relationships between the Parameters of Lidar Echo Signals and Hydrooptical Characteristics in the Western Kara Sea. *Oceanology*. 2023;63(S1): S119–S130. doi:10.1134/S0001437023070044
9. Glukhov VA, Goldin YuA, Glitko OV, Glukhovets DI, Rodionov MA. 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
10. Churnside JH, Marchbanks RD, Le JH. et al. Airborne lidar detection and characterization of internal waves in a shallow fjord. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2012;6(1):063611–063611. doi:10.1117/1.JRS.6.063611
11. Dolin LS, Dolina IS, Savel'ev VA. A lidar method for determining internal wave characteristics. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012;48(4):444–453. doi:10.1134/S0001433812040068
12. Glukhov VA., Goldin YuA., Rodionov MA. 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).
13. Philpot W. Airborne Laser Hydrography II. 2019. doi:10.7298/JXM9-G971
14. Riegl VQ-880-G Data sheet. URL: [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegldownloads/Infosheet\\_VQ-880-G\\_2016-05-23.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/Infosheet_VQ-880-G_2016-05-23.pdf) (Accessed: 21.02.2025).
15. Lin Wu, Yifu Chen, Yuan Le et al. A high-precision fusion bathymetry of multi-channel waveform curvature for bathymetric LiDAR systems. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2024;128(103770). doi:10.1016/j.jag.2024.103770
16. Mandlbürger G. A review of active and passive optical methods in hydrography. *The International Hydrographic Review*. 2022;28:8–52. doi:10.58440/ihr-28-a15
17. Mandlbürger G, Hauer C, Wieser M, Pfeifer N. Topo-Bathymetric LiDAR for Monitoring River Morphodynamics and Instream Habitats — A Case Study at the Pielach River. *Remote Sensing*. 2015;7:6160–6195. doi:10.3390/rs70506160
18. Glukhov VA, Goldin YuA, Rodionov MA, Gureev BA, Glitko OV. Airborne lidar bathymetry of coastal areas at night flight altitude. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2019;12(4):85–93. doi:10.7868/S2073667319040105 (In Russian)
19. Churnside JH, Hair JW, Hostetler CA, Scarino AJ. Ocean backscatter profiling using high-spectral-resolution lidar and a perturbation retrieval. *Remote Sensing*. 2018;10(12):2003. doi:10.3390/rs10122003
20. Lu X, Hu Y, Trepte C, Zeng S, Churnside JH. Ocean sub-surface studies with the CALIPSO spaceborne lidar. *Journal of Geophysical Research. Oceans*. 2014;119:4305–4317. doi:10.1002/2014JC009970
21. Kim M, Kopilevich Y, Feygels V. et al. Modeling of airborne bathymetric lidar waveforms. *Advances in Topobathymetric Mapping, Models, and Applications. Journal of Coastal Research, Special Issue*. 2016;76:18–30. Coconut Creek (Florida), doi:10.2112/SI76-003
22. Kim M. Airborne Waveform Lidar Simulator Using the Radiative Transfer of a Laser Pulse. *Appl. Sci*. 2019;9(12):2452. doi:10.3390/app9122452
23. Glukhov V.A., Goldin Yu.A., Glitko O.V., Rodionov M.A. Airborne polarizing lidar for surveying marine areas. *Proceedings of the XXVIII International Symposium “Optics of the atmosphere and ocean. Atmospheric Physics”, Tomsk, July 04–08, 2022*. Tomsk, Publishing House of IOA SB RAS, 2022, 187–190 (in Russian).
24. Glukhov VA. The patterns of backscatter signal formation in LIDAR sounding of the near-surface layers of seawater and the seafloor. *Diss. ... kand. fiz.-mat. nauk. M.*, 2024. 115 p. (in Russian).
25. Wang CK, Philpot WD. Using airborne bathymetric lidar to detect bottom type variation in shallow waters. *Remote Sensing of Environment*. 2007;106(1):123–135. doi:10.1016/j.rse.2006.08.003
26. 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
27. Dolina IS, Dolin LS, Levin IM, Rodionov AA, Savel'ev VA. 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.

**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