

УДК 535.36

© Л. С. Долин<sup>1,2\*</sup>, 2023

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, 603950, ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603950, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, Россия

\*lev.dolin@ipfran.ru

## О ВЛИЯНИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ЭНЕРГИЮ ПРИХОДЯЩЕГО ИЗ ВОДОЕМА ЛИДАРНОГО ЭХО-СИГНАЛА

Статья поступила в редакцию 08.11.2022, после доработки 08.01.2023, принята в печать 16.01.2023

### Аннотация

Разработаны теоретические модели статистических характеристик лидарного эхо-сигнала, предназначенные для интерпретации результатов оптического зондирования сильно эвтрофированных водоемов. Получены формулы для расчета статистически среднего значения и коэффициента вариации энергии сигнала упругого обратного рассеяния, приходящего из приповерхностного слоя воды со случайно-неоднородными показателями поглощения и рассеяния. Приведены примеры зависимости указанных характеристик сигнала от коэффициентов вариации оптических характеристик воды. Установлено, что флуктуации показателя поглощения приводят к увеличению средней энергии принимаемого сигнала, а флуктуации показателя рассеяния — к ее небольшому уменьшению. Значительное уменьшение средней энергии эхо-сигнала может наблюдаться при взаимно коррелированных флуктуациях показателей поглощения и рассеяния, т. е. в случае, когда флуктуирует показатель ослабления при неизменном альбедо однократного рассеяния. Высказаны соображения о том, каким образом могут быть построены алгоритмы оценки средних значений оптических характеристик воды и параметров их неоднородностей по среднему значению и коэффициенту вариации энергии эхо-сигнала.

**Ключевые слова:** лидар, вода, упругое рассеяние света, флуктуации гидрооптических характеристик, статистические свойства лидарных эхо-сигналов

© L. S. Dolin<sup>1,2\*</sup>, 2023

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics RAS, 603950, Ulyanova Str., 46, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup>Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950, Gagarin Avenue, 23, Nizhny Novgorod, Russia

\*lev.dolin@ipfran.ru

## ON THE INFLUENCE OF SPATIAL FLUCTUATIONS OF THE WATER INHERENT OPTICAL PROPERTIES ON THE ENERGY OF A LIDAR ECHO SIGNAL COMING FROM A WATER

Received 08.11.2022, Revised 08.01.2023, Accepted 16.01.2023

### Abstract

Theoretical models of the statistical characteristics of the lidar echo signal have been developed to interpret the results of optical sounding of heavily eutrophicated water bodies. Formulas are obtained for calculating the statistically average value and coefficient of variation of the energy of the elastic backscattering signal coming from the near-surface layer of water with randomly inhomogeneous absorption and scattering coefficients. Examples of the dependence of the indicated signal characteristics on the coefficients of variation of the optical characteristics of water are given. It has been established that fluctuations in the absorption coefficient lead to an increase in the average energy of the received signal, and fluctuations in the scattering coefficient to its slight decrease. A significant decrease in the average echo signal energy can be observed with cross-correlated fluctuations in the absorption and scattering coefficients, i. e. in the case when the attenuation coefficient fluctuates

Ссылка для цитирования: Долин Л.С. О влиянии пространственных флуктуаций гидрооптических характеристик на энергию приходящего из водоема лидарного эхо-сигнала // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16, № 1. С. 35–47. doi:10.48612/fpg/1gan-g7mu-dk9p

For citation: Dolin L.S. On the Influence of Spatial Fluctuations of the Water Inherent Optical Properties on the Energy of a Lidar Echo Signal Coming from a Water. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023, 16, 1, 35–47. doi:10.48612/fpg/1gan-g7mu-dk9p

at a constant single scattering albedo. Considerations are made on how algorithms for estimating the average values of the optical characteristics of water and the parameters of their inhomogeneities from the average value and the coefficient of variation of the echo signal energy can be constructed.

**Keywords:** lidar, water, elastic light scattering, fluctuations in hydrooptical characteristics, statistical properties of lidar echoes

## 1. Введение

Существующие методы интерпретации результатов лазерного зондирования морей и внутренних водоемов базируются на теории распространения света в водах с однородными или горизонтально однородными оптическими свойствами, которые характеризуются заданными профилями первичных гидрооптических характеристик (ПГХ) [1–26]. Между тем, в реальных условиях оптические характеристики воды — показатели поглощения и рассеяния, могут заметно флуктуировать, т. е. случайным образом изменяться во времени и пространстве. Особенно большие флуктуации ПГХ (с пространственными масштабами порядка дециметра и более<sup>1</sup>) наблюдаются во внутренних водоемах в период цветения воды [27–31], и эти флуктуации должны учитываться при построении алгоритмов определения концентрации растворенного и взвешенного в воде вещества по лидарным эхо-сигналам. Известно, что слой мутной среды с заданным количеством поглощающего вещества имеет минимальную прозрачность при однородном распределении поглотителя в слое, а флуктуации его концентрации увеличивают среднюю прозрачность слоя (эффект «решета») [32–34]. Этот эффект наряду с эффектом образования теней за неоднородностями ПГХ должен проявляться и при лазерном зондировании водной среды со случайно-неоднородными оптическими свойствами. Цель данной работы заключается в теоретическом исследовании влияния флуктуаций показателей поглощения и рассеяния воды на характеристики сигнала упругого обратного рассеяния — статистически средний сигнал и дисперсию его относительных флуктуаций. Изложенная в работе теория в определенной степени подобна теории пространственных шумов, возникающих в оптических томограммах биотканей из-за флуктуаций их оптических характеристик [35–37]. Различие между двумя теориями обусловлено в основном тем, что в работах по томографии анализировался двумерный пространственный сигнал, а здесь будет исследоваться одномерный сигнал — энергия принимаемого светового импульса как функция горизонтальной координаты лидара. С такими сигналами приходится иметь дело в случаях, когда лидар не позволяет разделять отклик среды на парциальные эхо-сигналы, приходящие с различных глубин, как это имеет место при зондировании вод с очень низкой прозрачностью или при регистрации сигналов флуоресценции.

## 2. Постановка задачи

Считаем, что лидар располагается на высоте  $H$  над плоской водной поверхностью, а диаграммы направленности излучателя и приемника имеют общую ось, ориентированную вертикально<sup>2</sup>. При написании формул используем следующие обозначения:  $W(\mathbf{r})$  — энергия сигнала упругого обратного рассеяния как функция координат точки пересечения оси лазерного пучка с водной поверхностью  $\mathbf{r}(x, y)$ ;  $W_1$  — энергия зондирующего импульса;  $2r_1$  и  $2\theta_1$  — диаметр и угол расходимости лазерного пучка;  $2r_2$  и  $2\theta_2$  — диаметр входного зрачка и угол поля зрения приемника;  $R_F$  — коэффициент отражения Френеля водной поверхности;  $n_w = 1,33$  — показатель преломления воды;  $a(\mathbf{r}, z)$ ,  $b(\mathbf{r}, z)$  и  $c(\mathbf{r}, z) = a + b$  — показатели поглощения, рассеяния и ослабления света в точке воды с координатами  $x, y, z$ . Индикатрису рассеяния задаем в виде комбинации узкой  $P^\uparrow(\theta)$  и изотропной  $P^\circ(\theta) = 1$  индикатрис с весовыми множителями, зависящими от вероятности обратного рассеяния  $p_b$ :

$$P(\theta) = (1 - 2p_b)P^\uparrow(\theta) + 2p_bP^\circ(\theta), \quad p_b = (1/2) \int_{\pi/2}^{\pi} P(\theta) \sin \theta d\theta. \quad (1)$$

Предполагаем выполненными условия  $(1/2) \int_0^{\pi} P(\theta) \sin \theta d\theta = 1$ ,  $P^\uparrow(\theta > \pi/2) \ll p_b \ll 1$ ,

<sup>1</sup>Наиболее быстрые временные изменения ПГХ возникают в результате переноса неоднородностей ПГХ течениями. Характерное время этих изменений равно отношению пространственного масштаба неоднородностей к скорости течения.

<sup>2</sup>В реальных условиях зондирование осуществляется под некоторым углом к вертикали, чтобы отражения от водной поверхности не попадали в фотоприемник. Однако к заметным изменениям сигнала, приходящего из водной толщи, это не приводит.

$$\overline{\theta^2} = (1/2) \int_0^{\pi/2} \theta^2 P^\uparrow(\theta) \sin \theta d\theta \ll 1. \quad (2)$$

Показатели поглощения и рассеяния представляем в виде

$$a(\mathbf{r}, z) = \bar{a} [1 + \delta a(\mathbf{r}, z)], \quad b(\mathbf{r}, z) = \bar{b} [1 + \delta b(\mathbf{r}, z)], \quad (3)$$

где  $\bar{a}$  и  $\bar{b}$  — их статистически средние значения, а  $\delta a$  и  $\delta b$  — случайные относительные отклонения от средних значений. Флуктуации ПГХ считаем пространственно однородными и характеризуем корреляционными функциями вида

$$B_a(\rho, \varsigma) = \overline{\delta a(\mathbf{r} + \boldsymbol{\rho}, z + \varsigma) \delta a(\mathbf{r}, z)} = \overline{(\delta a)^2} \cdot R(\rho) Z(\varsigma), \quad (4)$$

$$B_b(\rho, \varsigma) = \overline{\delta b(\mathbf{r} + \boldsymbol{\rho}, z + \varsigma) \delta b(\mathbf{r}, z)} = \overline{(\delta b)^2} \cdot R(\rho) Z(\varsigma), \quad (5)$$

$$R(\rho) = \exp(-\rho^2 / \rho_0^2), \quad Z(\varsigma) = ch^{-2}(\varsigma / \varsigma_0), \quad (6)$$

где  $\overline{(\delta a)^2}$  и  $\overline{(\delta b)^2}$  — дисперсии относительных флуктуаций показателей поглощения и рассеяния, параметры  $\varsigma_0$  и  $\rho_0$  — радиусы вертикальной и горизонтальной корреляции флуктуаций указанных ПГХ. Заметим, что функция  $ch^{-2}(\varsigma / \varsigma_0)$  в (6) очень мало отличается от  $\exp(-\varsigma^2 / \varsigma_0^2)$ , но ее использование вместо гауссовой функции позволяет существенно упростить аналитические выражения для статистических характеристик эхо-сигнала.

### 3. Модель случайной реализации эхо-сигнала

Модель обратно рассеянного сигнала строилась в предположении, что радиус горизонтальной корреляции флуктуаций ПГХ превышает горизонтальный размер освещаемого объема воды, а радиус вертикальной корреляции их флуктуаций может быть любым. При сделанном предположении формулу для расчета энергии сигнала  $W(\mathbf{r})$  можно получить, проинтегрировав по времени известное выражение для мощности импульсного сигнала упругого обратного рассеяния, приходящего из водной среды с горизонтально однородными ПГХ, произвольно зависящими от глубины [1, 8, 38]. Эта формула имеет вид

$$W(\mathbf{r}) = (\pi W_1 / 4) r_2^2 \theta_2^2 \int_0^\infty 2b_b(\mathbf{r}, z) \left[ \iint_{-\infty}^\infty E_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}', z) E_2(\mathbf{r}, \mathbf{r}', z) d^2 \mathbf{r}' \right] dz, \quad (7)$$

$$b_b(\mathbf{r}, z) = p_b b(\mathbf{r}, z), \quad (8)$$

где  $b_b$  — показатель обратного рассеяния,  $E_1$  — облученность в точке  $(\mathbf{r}', z)$  от вспомогательного непрерывного источника излучения с единичной мощностью и такими же, как у реального источника, параметрами  $2r_1$  и  $2\theta_1$ , а  $E_2$  — распределение облученности в воде от вспомогательного непрерывного источника с единичной мощностью, диаметром апертуры  $2r_2$  и шириной диаграммы направленности  $2\theta_2$ .

Влияние стратифицированной водной среды на структуру лазерного пучка с хорошей точностью описывается решением уравнения переноса излучения в малоугловом приближении [39]. Однако, это решение представляется в виде интеграла Фурье, что усложняет расчет статистических моментов сигнала  $W$ . Поэтому здесь мы воспользуемся менее точной, но очень простой, моделью полей облученности  $E_{1,2}$ , построенной на основе решения уравнения переноса излучения в малоугловом диффузионном приближении [39]:

$$E_i(\mathbf{r}, \mathbf{r}', z) = \frac{1 - R_F}{\pi d_i(z)} \exp \left[ -\int_0^z \alpha(\mathbf{r}, z') dz' - (\mathbf{r}' - \mathbf{r})^2 / d_i(z) \right], \quad i = 1, 2, \quad (9)$$

$$\alpha(\mathbf{r}, z) = a(\mathbf{r}, z) + 2b_b(\mathbf{r}, z), \quad (10)$$

$$d_i(z) = r_i^2 + \theta_i^2 (H + z / n_w)^2 + \frac{1}{3} \bar{b} (1 - 2p_b) \overline{\theta^2} \cdot z^3. \quad (11)$$

В соответствии с этой моделью распределение облученности в поперечном сечении светового пучка описывается функцией Гаусса, а показатель экспоненциального ослабления полной мощности пучка  $\alpha$  равен сумме показателей поглощения и изотропного рассеяния. Эффект уширения пучка из-за многократного

рассеяния света «вперед» учитывается третьим слагаемым в правой части формулы (11). При этом влияние флуктуаций показателя рассеяния на дисперсию распределения облученности  $d_i$  считается пренебрежимо малым. После подстановки выражений (9)–(11) в уравнение (7) оно принимает вид

$$W(\mathbf{r}) = A \int_0^\infty 2b_b(\mathbf{r}, z) \cdot \exp \left[ -2 \int_0^z \alpha(\mathbf{r}, z') dz' \right] \frac{dz}{d(z)}, \quad (12)$$

$$A = (1 - R_F)^2 W_1 r_2^2 \theta_2^2 / 4.$$

$$d(z) = (r_1^2 + r_2^2) + (\theta_1^2 + \theta_2^2)(H + z/n_w)^2 + \frac{2}{3} \bar{b}(1 - 2p_b) \bar{\theta}^2 \cdot z^3.$$

#### 4. Формулы для расчета статистических характеристик эхо-сигнала

Пространственный сигнал  $W(\mathbf{r})$  будем характеризовать его статистическими моментами первого и второго порядка — средним значением  $\bar{W}$  и корреляционной функцией

$$B_W(\rho) = \overline{W(\mathbf{r} + \rho)W(\mathbf{r})}, \quad (13)$$

а также функцией корреляции

$$B_{\Delta W}(\rho) = \overline{\Delta W(\mathbf{r} + \rho) \Delta W(\mathbf{r})} = B_W(\rho) - \bar{W}^2 \quad (14)$$

флуктуаций сигнала  $\Delta W(\mathbf{r}) = W(\mathbf{r}) - \bar{W}$ , дисперсией его флуктуаций

$$d_W = B_{\Delta W}(0), \quad (15)$$

коэффициентом пространственной корреляции флуктуаций

$$K(\rho) = B_{\Delta W}(\rho) / B_{\Delta W}(0) \quad (16)$$

и коэффициентом вариации сигнала

$$\delta_W = \sqrt{d_W} / \bar{W}. \quad (17)$$

Для лучшего понимания того, почему флуктуации различных ПГХ по-разному проявляются в эхо-сигнале, расчет его статистических характеристик был выполнен для случаев, когда флуктуирует либо один из параметров  $a$  и  $b$ , или флуктуирует показатель ослабления  $c = a + b$  при сохранении альбедо однократного рассеяния  $\omega_0 = b/c$ .

**А. Флуктуирует только показатель поглощения.** При условии  $\delta b = 0$  уравнение (12) принимает вид

$$W(\mathbf{r}) = 2p_b \bar{b} A \int_0^\infty \exp[-2\Delta\tau_a(\mathbf{r}, z)] F_a(z) dz, \quad (18)$$

$$\Delta\tau_a(\mathbf{r}, z) = \bar{a} \int_0^z \delta a(\mathbf{r}, z') dz', \quad F_a(z) = \exp[-2(\bar{a} + 2p_b \bar{b})z] / d(z). \quad (19)$$

Если считать, что показатель экспоненты  $\varphi = -2\Delta\tau_a(\mathbf{r}, z)$  в правой части уравнения (18) распределен по нормальному закону, то статистическое усреднение функции  $W$  можно выполнить с помощью соотношения

$$\overline{\exp(\varphi)} = \exp[\overline{\varphi^2} / 2]. \quad (20)$$

Это соотношение можно использовать и для нахождения функции  $B_W(\rho)$ , полагая  $\varphi = -2[\Delta\tau_a(\mathbf{r} + \rho, z_1) + \Delta\tau_a(\mathbf{r}, z_2)]$ . В результате находим:

$$\bar{W} = 2p_b \bar{b} A \int_0^\infty \exp\left[2\overline{(\Delta\tau_a(\mathbf{r}, z))^2}\right] F_a(z) dz, \quad (21)$$

$$B_{\Delta W}(\rho) = (2p_b \bar{b} A)^2 \int_0^\infty \int_0^\infty \left[ \exp\left(4\overline{\Delta\tau_a(\mathbf{r} + \rho, z_1) \Delta\tau_a(\mathbf{r}, z_2)}\right) - 1 \right] \times \\ \times \left[ \exp\left(2\overline{(\Delta\tau_a(\mathbf{r}, z_1))^2} + 2\overline{(\Delta\tau_a(\mathbf{r}, z_2))^2}\right) \right] F_a(z_1) F_a(z_2) dz_1 dz_2, \quad (22)$$

$$\overline{\Delta\tau_a(\mathbf{r} + \mathbf{p}, z_1)\Delta\tau_a(\mathbf{r}, z_2)} = \overline{(\delta a)^2} R(\rho)(\bar{a}\zeta_0)^2 \ln \frac{ch(z_1/\zeta_0)ch(z_2/\zeta_0)}{ch[(z_1 - z_2)/\zeta_0]}, \quad (23)$$

$$\overline{(\Delta\tau_a(\mathbf{r}, z))^2} = 2\overline{(\delta a)^2}(\bar{a}\zeta_0)^2 \ln[ch(z/\zeta_0)]. \quad (24)$$

**В. Флуктуирует только показатель рассеяния.** При условии  $\delta a = 0$  уравнение (12) и формулы для расчета статистических моментов энергии эхо-сигнала могут быть записаны в виде

$$W(\mathbf{r}) = A \int_0^\infty 2b_b(\mathbf{r}, z) \exp\left(-4 \int_0^z b_b(\mathbf{r}, z') dz'\right) \frac{\exp(-2\bar{a}z) dz}{d(z)} =$$

$$= (A/2) \int_0^\infty \left\{1 - \exp\left[-4p_b(\bar{b}z + \Delta\tau_b(\mathbf{r}, z))\right]\right\} F_b(z) dz, \quad (25)$$

$$\Delta\tau_b(\mathbf{r}, z) = \bar{b} \int_0^z \delta b(\mathbf{r}, z') dz', \quad F_b(z) = -\frac{d}{dz} \left[ \frac{\exp(-2\bar{a}z)}{d(z)} \right], \quad (26)$$

$$\bar{W} = (A/2) \int_0^\infty \left\{1 - \exp\left[-4p_b\bar{b}z + 8p_b^2 \overline{(\Delta\tau_b(\mathbf{r}, z))^2}\right]\right\} F_b(z) dz, \quad (27)$$

$$B_{\Delta W}(\rho) = (A^2/4) \int_0^\infty \int_0^\infty \left[ \exp\left(16p_b^2 \overline{\Delta\tau_b(\mathbf{r} + \mathbf{p}, z_1)\Delta\tau_b(\mathbf{r}, z_2)}\right) - 1 \right] \times$$

$$\times \left[ \exp\left(-4p_b\bar{b}(z_1 + z_2) + 8p_b^2 \overline{(\Delta\tau_b(\mathbf{r}, z_1))^2} + 8p_b^2 \overline{(\Delta\tau_b(\mathbf{r}, z_2))^2}\right) \right] F_b(z_1) F_b(z_2) dz_1 dz_2. \quad (28)$$

Выражения для статистических моментов функции  $\Delta\tau_b(\mathbf{r}, z)$  получаются из формул (23) и (24) путем замены  $\overline{(\delta a)^2} \rightarrow \overline{(\delta b)^2}$ ,  $\bar{a} \rightarrow \bar{b}$ .

**С. Флуктуирует показатель ослабления при неизменном значении альбеда однократного рассеяния.** Если предположить, что выполняется условие  $\omega_0 = b/c = \bar{b}/\bar{c} = \text{const}$ , и флуктуации показателя ослабления  $c = a + b$  описываются формулами

$$c(\mathbf{r}, z) = \bar{c}[1 + \delta c(\mathbf{r}, z)], \quad (29)$$

$$B_c(\rho, \varsigma) = \overline{\delta c(\mathbf{r} + \mathbf{p}, z + \varsigma)\delta c(\mathbf{r}, z)} = \overline{(\delta c)^2} \cdot R(\rho)Z(\varsigma), \quad (30)$$

то уравнение (12) и формулы для расчета статистических моментов энергии эхо-сигнала могут быть записаны в виде

$$W(\mathbf{r}) = C \int_0^\infty \left\{1 - \exp\left[-2k(\bar{c}z + \Delta\tau(\mathbf{r}, z))\right]\right\} F_c(z) dz, \quad (31)$$

$$k = 1 - (1 - 2p_b)\omega_0, \quad C = \omega_0 p_b A / k, \quad (32)$$

$$\Delta\tau(\mathbf{r}, z) = \bar{c} \int_0^z \delta c(\mathbf{r}, z') dz', \quad F_c(z) = -\frac{d}{dz} (d(z))^{-1}, \quad (33)$$

$$\bar{W} = C \int_0^\infty \left[1 - \exp\left(-2k\bar{c}z + 2k^2 \overline{(\Delta\tau(\mathbf{r}, z))^2}\right)\right] F_c(z) dz, \quad (34)$$

$$B_{\Delta W}(\rho) = C^2 \int_0^\infty \int_0^\infty \left[ \exp\left(4k^2 \overline{\Delta\tau(\mathbf{r} + \mathbf{p}, z_1)\Delta\tau(\mathbf{r}, z_2)}\right) - 1 \right] \times$$

$$\times \left[ \exp\left(-2k\bar{c}(z_1 + z_2) + 2k^2 \overline{(\Delta\tau(\mathbf{r}, z_1))^2} + 2k^2 \overline{(\Delta\tau(\mathbf{r}, z_2))^2}\right) \right] F_c(z_1) F_c(z_2) dz_1 dz_2. \quad (35)$$

Выражения для статистических моментов функции  $\Delta\tau(\mathbf{r}, z)$  получаются из формул (23) и (24) путем замены  $\overline{(\delta a)^2} \rightarrow \overline{(\delta c)^2}$ ,  $\bar{a} \rightarrow \bar{c}$ .

## 5. Численный анализ статистических характеристик эхо-сигнала

Как следует из формул (12)–(35), выражения для статистических характеристик эхо-сигнала могут быть представлены в виде функций безразмерной переменной  $\bar{c}r$  и безразмерных параметров  $\hat{\omega}_0 = \bar{b} / \bar{c}$ ,  $\bar{c}r_0$ ,  $\bar{c}\zeta_0$ ,  $(\delta a)^2$ ,  $(\delta b)^2$ ,  $(\delta c)^2$ ,  $\bar{c}(r_1^2 + r_2^2)^{1/2}$ ,  $\bar{c}H$ . На рис. 1, а, рис. 2, а и рис. 3, а представлены результаты расчета параметра

$$N = \frac{\bar{W} - W_0}{W_0}, \quad (36)$$

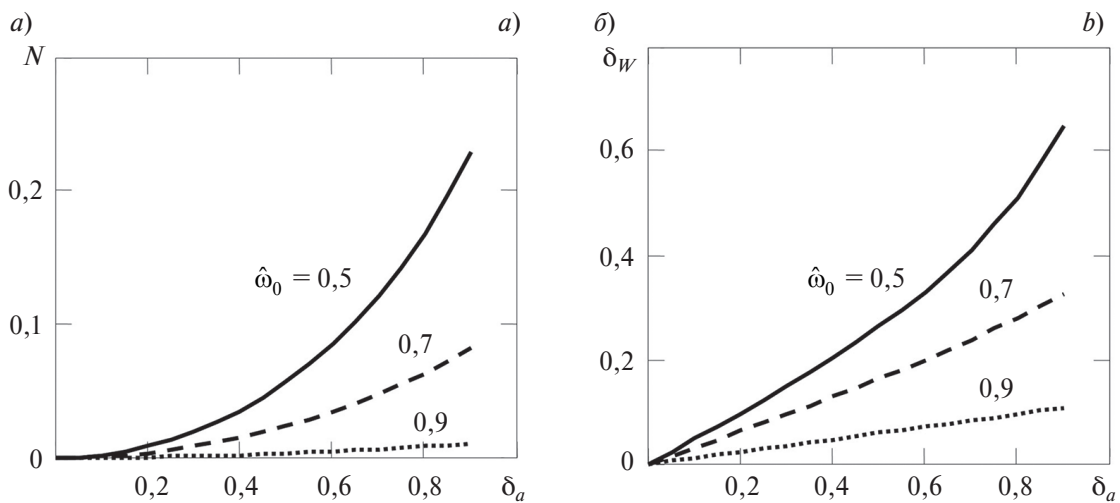
характеризующего отличие статистически средней энергии  $\bar{W}$  флуктуирующего эхо-сигнала от энергии  $W_0$  регулярного сигнала, который должен бы приходиться из водной среды с пространственно однородными оптическими характеристиками  $a = \bar{a}$ ,  $b = \bar{b}$ . Кривые этих рисунков изображают зависимость параметра  $N$  от коэффициентов вариации

$$\delta_a = \sqrt{(\delta a)^2}, \quad \delta_b = \sqrt{(\delta b)^2}, \quad \delta_c = \sqrt{(\delta c)^2} \quad (37)$$

показателей поглощения, рассеяния и ослабления при трех различных значениях параметра  $\hat{\omega}_0$  и при условиях  $\bar{c}\zeta_0 = 0,75$ ,  $\bar{c}(r_1^2 + r_2^2)^{1/2} = 0,175$ ,  $\bar{c}H = 5$ . Рис. 1, б, рис. 2, б и рис. 3, б иллюстрируют зависимость коэффициента вариации  $\delta_W$  энергии эхо-сигнала (формула (17)) от величины параметров (37) и  $\hat{\omega}_0$  при указанных выше значениях трех других параметров.

Из рисунков видно, что пространственные флуктуации различных ПГХ по-разному проявляются в эхо-сигнале. Флуктуации показателя поглощения (при его заданном среднем значении) могут приводить к существенному увеличению статистически среднего сигнала (рис. 1, а), тогда как флуктуации показателя рассеяния его уменьшают, но очень незначительно (рис. 2, а). При взаимно коррелированных флуктуациях показателей поглощения и рассеяния (т.е. флуктуациях показателя ослабления при заданном альбедо однократного рассеяния) средний сигнал может уменьшаться существенно (рис. 3, а).

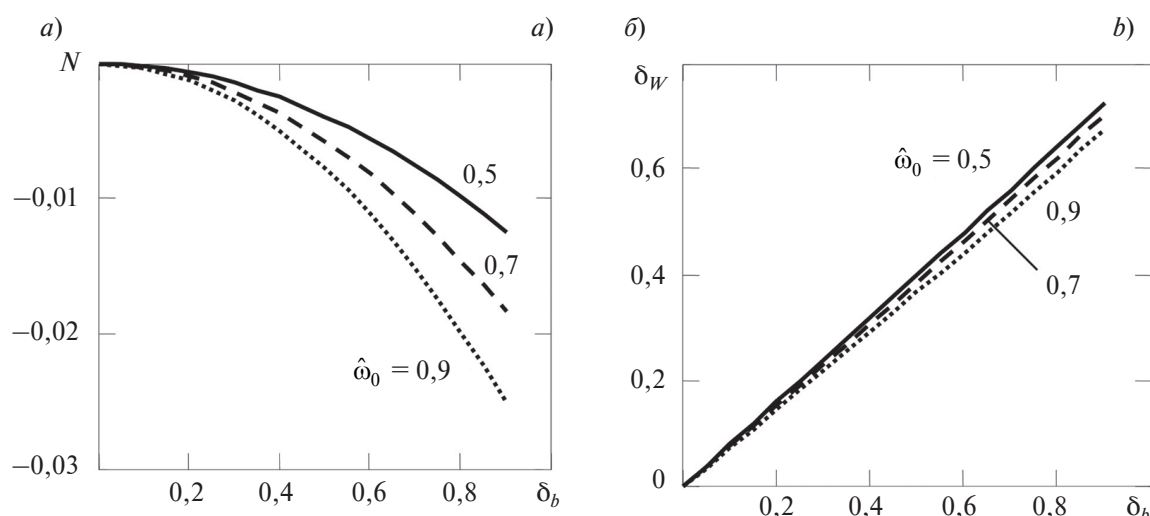
В рассматриваемых трех случаях численные значения коэффициента вариации сигнала  $\delta_W$  (при условии  $\delta_a = \delta_b = \delta_c$ ) тоже различаются (рис. 1, б, рис. 2, б и рис. 3, б), но не так существенно, как значения параметра  $N$ , характеризующего влияние флуктуаций ПГХ на среднюю энергию сигнала. Кривые рис. 1, а и б, изображающие зависимость параметров  $N$  и  $\delta_W$  от коэффициента вариации показателя поглощения  $\delta_a$ , очень между собой похожи, чего нельзя сказать о соответствующих кривых рис. 2 и 3. Пространственные флуктуации показателя рассеяния вызывают сильные флуктуации эхо-сигнала (рис. 2, б), но не оказывают заметного влияния на его среднее значение. Зависимость  $\delta_W(\delta_c)$  при  $\hat{\omega}_0 = 0,5$  (рис. 3, б) подобна зависимости  $\delta_W(\delta_a)$  (рис. 1, б), а при  $\hat{\omega}_0 = 0,9$  она почти совпадает с зависимостью  $\delta_W(\delta_b)$  (рис. 2, б).



**Рис. 1.** Зависимость параметров  $N$  (а) и  $\delta_W$  (б) (см. формулы (36) и (17)) от коэффициента вариации показателя поглощения  $\delta_a$  при значениях параметра  $\hat{\omega}_0$ , указанных на рисунках, и при условиях  $\bar{c}\zeta_0 = 0,75$ ,  $\bar{c}(r_1^2 + r_2^2)^{1/2} = 0,175$ ,  $\bar{c}H = 5$ .

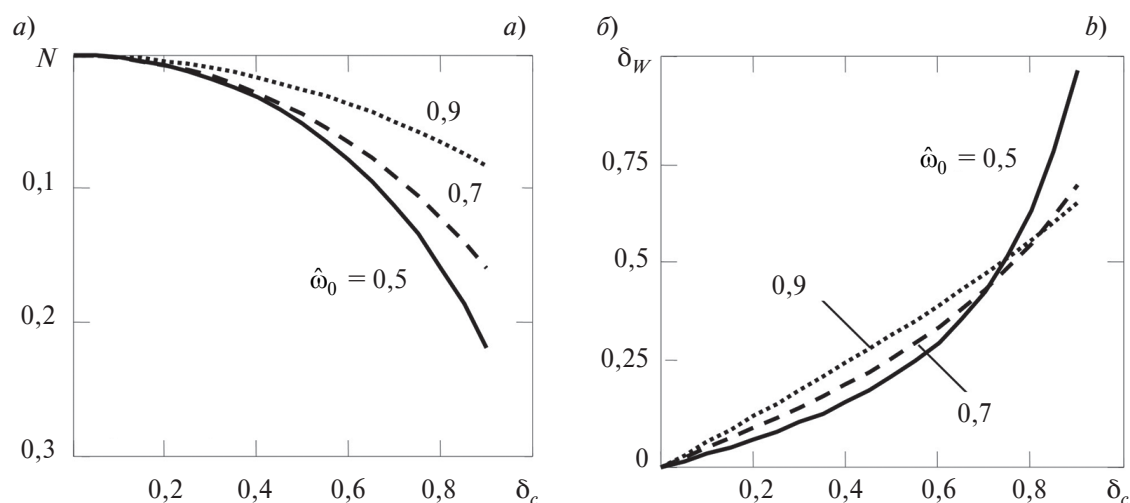
**Fig. 1.** Dependence of the parameters  $N$  (a) and  $\delta_W$  (b) (see eq. (36) and (17)) on the absorbance variation coefficient  $\delta_a$  at the values of the parameter  $\hat{\omega}_0$ , indicated in the figures and assuming  $\bar{c}\zeta_0 = 0,75$ ,  $\bar{c}(r_1^2 + r_2^2)^{1/2} = 0,175$ ,  $\bar{c}H = 5$ .





**Рис. 2.** Зависимость параметров  $N$  (а) и  $\delta_W$  (б) от коэффициента вариации показателя рассеяния  $\delta_b$  при условиях, указанных в подписи к рисунку 1

**Fig. 2.** Dependence of the parameters  $N$  (a) and  $\delta_W$  (b) on the variation coefficient  $\delta_b$  of the scattering coefficient under the conditions indicated in the caption to Fig. 1

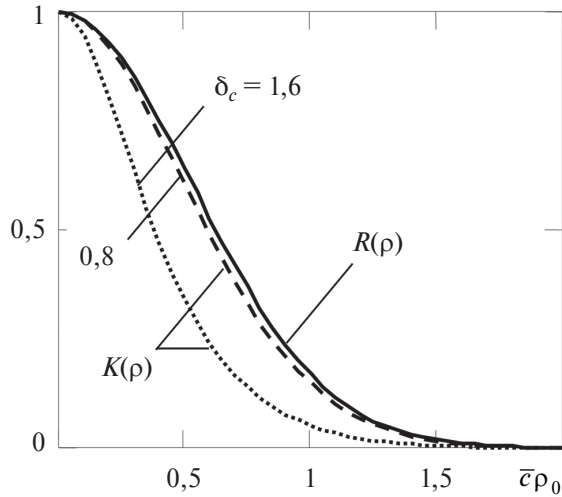


**Рис. 3.** Зависимость параметров  $N$  (а) и  $\delta_W$  (б) от коэффициента вариации показателя ослабления  $\delta_c$  при условиях, указанных в подписи к рисунку 1

**Fig. 3.** Dependence of the parameters  $N$  (a) and  $\delta_W$  (b) on the variation coefficient  $\delta_c$  of the attenuation coefficient under the conditions indicated in the caption to Fig. 1

Заметим, что увеличение средней энергии эхо-сигнала из-за флуктуаций показателя поглощения является непосредственным проявлением эффекта «решета», приводящего к увеличению толщины водного слоя, из которого приходит сигнал. А ее уменьшение из-за флуктуаций показателя ослабления или показателя рассеяния происходит в результате того, что верхняя часть каждого из сгустков поглощающего и рассеивающего вещества затеняет его нижнюю часть.

На рис. 4 приведены результаты расчета коэффициента пространственной корреляции  $K(\rho)$  флуктуаций энергии эхо-сигнала, порождаемых неоднородностями показателя ослабления воды (формулы (16), (35)). Рисунок показывает, что в рассматриваемом случае функция  $K(\rho)$  заметно отличается от коэффициента горизонтальной корреляции  $R(\rho)$  флуктуаций показателя ослабления только при очень больших значениях его коэффициента вариации  $\delta_c$ .



**Рис. 4.** Коэффициент пространственной корреляции флуктуаций эхо-сигнала  $K(\rho)$  при значениях коэффициента вариации показателя ослабления  $\delta_c = 0,8, 1,6$ ;  $R(\rho)$  — коэффициент горизонтальной корреляции флуктуаций показателя ослабления;  $\bar{c}\rho_0 = 0,75$ ,  $\omega_0 = 0,7$ , прочие параметры указаны в подписи к рисунку 1

**Fig. 4.** The spatial correlation coefficient  $K(\rho)$  of the echo signal fluctuations for the variation coefficient of the attenuation coefficient  $\delta_c = 0.8, 1.6$ ;  $R(\rho)$  is the horizontal correlation coefficient of attenuation coefficient fluctuation;  $\bar{c}\rho_0 = 0.75$ ;  $\omega_0 = 0.7$ ;  $R(\rho)$  — see equation (6); other parameters are indicated in the caption to Figure 1

## 6. Возможный способ оценки оптических свойств воды по среднему значению и коэффициенту вариации энергии эхо-сигнала

Если для определенности считать, что флуктуирующей характеристикой воды является показатель ослабления, то вид функций  $N$  и  $\delta_W$ , изображенных на рис. 3, будет зависеть от средних значений  $\bar{c}$ ,  $\bar{b}$  показателей ослабления и рассеяния, вероятности обратного рассеяния  $p_b$ , параметра индикатрисы рассеяния  $\bar{\theta}^2$  и вертикального радиуса корреляции  $\zeta_0$  флуктуаций показателя ослабления. Измерив два статистических параметра сигнала  $\bar{W}$  и  $\delta_W$ , мы можем составить только два уравнения для решения обратной задачи, что указывает на невозможность ее решения без использования некоторой априорной информации об оптических характеристиках воды.

Как видно из рис. 4, при условии  $\delta_c < 1$  радиус корреляции флуктуаций энергии эхо-сигнала  $\rho_W$  (ширина функции  $K(\rho)$  по уровню  $1/e$ ) практически не отличается от горизонтального радиуса корреляции  $\rho_0$  флуктуаций показателя ослабления (ширины функции  $R(\rho)$  по уровню  $1/e$ ). Поэтому, если флуктуации показателя ослабления считать изотропными, то для оценки вертикального радиуса их корреляции можно воспользоваться соотношением  $\zeta_0 = \rho_W$ .

Для уменьшения числа неизвестных параметров в моделях эхо-сигнала можно было бы использовать эмпирические корреляционные связи между различными ПГХ, подобные регрессиям Левина — Копелевича [40, 41], которые позволяют выразить параметры  $\bar{b}$ ,  $p_b$  и  $\bar{\theta}^2$  через показатель ослабления  $\bar{c}$ . Эти регрессии были получены для морских вод с показателем ослабления  $\bar{c} = (0,3 \div 1) \text{ м}^{-1}$  на длине волны 500 нм. Поиск аналогичных регрессий для вод внутренних водоемов в период их цветения сейчас тоже ведется [29]. Если бы параметры  $\bar{b}$ ,  $p_b$  и  $\bar{\theta}^2$  были удалены из теоретических выражений для  $\bar{W}$ ,  $W_0$ ,  $N$  и  $\delta_W$  с помощью эмпирических регрессий, то для нахождения оставшихся двух параметров  $\bar{c}$  и  $\delta_c$  можно было бы использовать уравнения

$$W_0(\bar{c})[1 + N(\bar{c}, \delta_c)] = \bar{W}', \quad \delta_W(\bar{c}, \delta_c) = \delta_W', \quad (38)$$

где  $\bar{W}'$  и  $\delta_W'$  — измеренные значения статистических характеристик сигнала;  $W_0 = \bar{W}(\delta_c = 0)$  — энергия сигнала, приходящего из водоема с однородными оптическими свойствами. После нахождения параметра  $\bar{c}$  остальные ПГХ определяются с помощью тех же самых регрессий, которые использовались для получения уравнений (38).

## 7. Заключение

Основная цель этой работы заключалась в исследовании механизмов воздействия пространственных флуктуаций различных ПГХ на лидарные эхо-сигналы, что потребовало максимального упрощения используемых моделей оптических свойств воды. Однако предлагаемый метод расчета статистических характеристик эхо-сигналов вполне пригоден и для развития теории лидарного зондирования реальных водоемов. Проведенное исследование показало, что флуктуации показателей поглощения, рассеяния



и показателя ослабления (при неизменном альбедо однократного рассеяния) примерно одинаково проявляются во флуктуациях эхо-сигнала, но по-разному изменяют его среднюю энергию. Под влиянием флуктуаций показателя поглощения она увеличивается, а в результате флуктуаций показателя ослабления и рассеяния средняя энергия сигнала уменьшается, но в существенно разной степени. Такие проявления флуктуаций ПГХ качественно объясняются двумя эффектами — увеличением средней прозрачности водного слоя из-за флуктуаций показателя поглощения («эффект решета») и образованием теней за неоднородностями показателя ослабления, благодаря которым отражательная способность водного слоя уменьшается. Эти эффекты следует учитывать при построении алгоритмов определения оптических характеристик сильно эвтрофированных вод по лидарным сигналам.

Заметим, что при надводном расположении лидара наблюдение указанных эффектов может потребовать принятия специальных мер для устранения негативного влияния водной поверхности на принимаемый сигнал. Наиболее очевидный (но не всегда доступный) способ решения этой проблемы — работа в условиях штиля. При наличии волнения водная поверхность определенным образом модулирует мощность и энергию эхо-сигнала и становится источником мультипликативной помехи, которая затрудняет измерение ПГХ. По-видимому, с этой помехой можно было бы бороться тем же способом, который предлагается использовать для улучшения видимости подводных объектов через взволнованную водную поверхность в условиях естественного освещения [42]. Он заключается в устранении искажений сигнала с помощью информации о рельефе того участка поверхности, через который рассеянный свет поступает на фотоприемник. Данные о рельефе поверхности могут быть получены путем обработки ее изображений, формируемых специальной видеокамерой [43].

### Финансирование

Работа выполнена в рамках реализации Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» ННГУ (№ темы Н-468–99\_2021–2023) и по государственному заданию (тема № 0030–2021–0006).

### Funding

The work was carried out as part of the implementation of the Strategic Academic Leadership Program “Priority 2030” of UNN (direction № N-468-99\_2021–2023) and according to the State assignment (theme № 0030-2021–0006).

### Литература

1. 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.
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. Под ред. А.С. Монины, К.С. Шифрина. М.: Наука, 1974. С. 153–158.
3. Оптика океана / Под ред. А.С. Монины. М.: Наука, 1983. Т. 1. Физическая оптика океана. 371 с.
4. Billard B., Abbot R.H., Penny M.F. Airborne estimation of sea turbidity parameters from the WRELANDS laser airborne depth sounder // Applied Optics. 1986. Vol. 25. P. 2080–2088.
5. Браво-Животовский Д.М., Долин Л.С., Савельев В.А., Фадеев В.В., Щегольков Ю.Б. Оптические методы диагностики океана. Лазерное дистанционное зондирование // «Дистанционные методы изучения океана». Горький: ИПФ АН СССР, 1987. С. 84–125.
6. Hoge F.E., Wright C.W., Krabill W.B., Buntzen R.R., Gilbert G.D., Swift R.N., Yungel J.K., Berry R.E. Airborne lidar detection of subsurface oceanic scattering layers // Applied Optics. 1988. Vol. 27. P. 3969–3977.
7. 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.
8. Долин Л.С., Левин И.М. Справочник по теории подводного видения. Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. 230 с.
9. Dolin L.S., Levin I.M. Optics, Underwater // Encyclopedia of Applied Physics, VCH Publishers, 1995. Vol. 12. P. 571–601.
10. Васильков А.П., Гольдин Ю.А., Гуреев Б.А. Определение вертикального распределения показателя рассеяния морской воды с помощью авиационного поляризационного лидара // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1997. Т. 33, № 4. С. 563–569.

11. Vasilkov A.P., Goldin Y.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
12. Bissonnette L.R., Roy G., Poutier L., Cober S.G., Isaac G.A. Multiple-scattering lidar retrieval method: tests on Monte Carlo simulations and comparisons with *in situ* measurements // *Applied Optics*. 2002. Vol. 41, N 30. P. 6307–6324. doi:10.1364/AO.41.006307
13. Feygels V.I., Kopilevich Y.I., Surkov A., Yangel J.K., Behrenfeld M.J. Airborne lidar system with variable field-of-view receiver for water optical measurements // *Proceedings of SPIE. Ocean Remote Sensing and Imaging II*. 2003. Vol. 5155. P. 12–21.
14. Коханенко Г.П., Крекова М.М., Пеннер И.Э., Шаманаев В.С. Обнаружение неоднородностей гидрозоля поляризационным лидаром // *Оптика атмосферы и океана*. 2004. Т. 17, № 9. С. 750–758.
15. Kopilevich Yu., Feygels V.I., Tuell G.H., Surkov A. Measurement of ocean water optical properties and seafloor reflectance with scanning hydrographic operational airborne lidar survey (SHOALS): I. Theoretical background // *Proceedings of SPIE*. 2005. Vol. 5885. 9 p.
16. Tuell G.H., Feygels V., Kopilevich Yu., Weidemann A.D., Cunningham A.G., Mani R., Podoba V., Ramnath V., Park J.Y., Aitken J. Measurement of ocean water optical properties and seafloor reflectance with scanning hydrographic operational airborne lidar survey (SHOALS): II. Practical results and comparison with independent data // *Proceedings of SPIE*. 2005. Vol. 5885. 13 p.
17. Hoge F.E. Oceanic inherent optical properties: proposed single laser lidar and retrieval theory // *Applied Optics*. 2005. Vol. 44, N 34. P. 7483–7486. doi:10.1364/AO.44.007483
18. Churnside J.H., Thorne R.E. Comparison of airborne lidar measurements with 420 kHz echo-sounder measurements of zooplankton // *Applied Optics*. 2005. Vol. 44, N 26. P. 5504–5514. doi:10.1364/AO.44.005504
19. Zege E., Katsev I., Prikhach A. Retrieval of seawater inherent optical properties profiles from lidar waveforms // *Proceedings of SPIE*. 2007. Vol. 6615, 66150B, 10 p.
20. Dolina I.S., Dolin L.S., Levin I.M., Rodionov A.A., Savel'ev V.A. Inverse problems of lidar sensing of the ocean. In: *Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters* // *Proceeding of SPIE*. 2007. Vol. 6615, 66150C — 1–10.
21. Долин Л.С. Лидарный метод измерения частотно-контрастной характеристики водных слоев // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2010. Т. 3, № 3 (9). С. 62–71.
22. 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.
23. Palmer S.C.J., Pelevin V.V., Goncharenko I., Kovács A.W., Zlinszky A., Présing M., Horváth H., Nicolás-Perea V., Balzter H., Tóth V.R. Ultraviolet Fluorescence LiDAR (UFL) as a Measurement Tool for Water Quality Parameters in Turbid Lake Conditions // *Remote Sensing*. 2013. Vol. 5. P. 4405–4422. doi:10.3390/rs5094405
24. Пелевин В.В., Завьялов П.О., Коновалов Б.В., Абрамов О.И., Грабовский А.Б., Гончаренко И.В. Дистанционное лазерное зондирование морей и внутренних водоемов портативными ультрафиолетовыми лидарами // *Труды VIII международной конференции «Современные проблемы оптики естественных вод»*. 2015. С. 179–184.
25. 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
26. 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
27. Леднёв В.Н., Гришин М.Я., Першин С.М., Бункин А.Ф., Капустин И.А., Мольков А.А., Ермаков С.А. Лидарное зондирование пресноводной акватории с высокой концентрацией фитопланктона // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса*. 2016. Т. 13, № 1. С. 119–134. doi:10.21046/2070-7401-2016-13-1-119-134
28. Grishin M. Ya., Lednev V.N., Pershin S.M., Bunkin A.F., Kobyl'anskij V.V., Ermakov S.A., Kapustin I.A., Molkov A.A. Laser remote sensing of an algal bloom in a freshwater reservoir // *Laser Physics*. 2016. Vol. 26. 125601 (8pp). doi:10.1088/1054-660X/26/12/125601
29. Мольков А.А., Капустин И.А., Щегольков Ю.Б., Воденеева Е.Л., Калашиников И.Н. Взаимосвязь первичных гидрооптических характеристик на 650 нм с глубиной видимости диска Секки и концентрацией сине-зеленых водорослей в Горьковском водохранилище // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 3. С. 26–33. doi:10.7868/S2073667318030036
30. Molkov A.A., Fedorov S.V., Pelevin V.V., Korchemkina E.N. On regional models for high-resolution retrieval of Chlorophyll a and TSM Concentrations in the Gorky Reservoir by Sentinel-2 Imagery // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 10, N 11. P. 1215–1241. doi.org/10.3390/rs11101215

31. Мольков А.А., Пелевин В.В., Корчемкина Е.Н. Оригинальная методика валидации спутниковых данных в условиях сильной пространственно-временной изменчивости оптических свойств воды внутренних эвтрофных водоемов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 2. С. 60–67. doi:10.7868/S2073667320020070
32. *Fukshansky L.* Absorption statistics in turbid media // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1987. Vol. 38. P. 389–406.
33. *McClendon J.H., Fukshansky L.* On the interpretation of absorption spectra of leaves — II. The non-absorbed ray of the sieve effect and the mean optical pathlength in the remainder of the leaf // *Photo-chem Photobiol*. 1990. Vol. 51. P. 211–216.
34. *Anisimov O., Fukshansky L.* Stochastic radiation in macroheterogeneous random optical media // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1992. Vol. 48. P. 169–186.
35. Долин Л.С., Сергеева Е.А., Турчин И.В. Теневые шумы в оптических томограммах биотканей // *Квантовая электроника*. 2008. Т. 38, № 6. С. 543–550.
36. Долин Л.С. Развитие теории переноса излучения в приложении к задачам инструментального видения в мутных средах // *Успехи физических наук*. 2009. Т. 179, № 5. С. 553–560. doi:10.3367/UFNe.0179.200905k.0553
37. *Dolin L.S., Sergeeva E.A., Turchin I.V.* Correlation characteristics of optical coherence tomography images of turbid media with statistically inhomogeneous optical parameters // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2012. Vol. 113, N 9. P. 691–703. doi:10.1016/j.jqsrt.2012.02.004
38. 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. 501–511.
39. Долин Л.С., Савельев В.А. К теории распространения узкого пучка света в стратифицированной рассеивающей среде // *Известия вузов. Радиофизика*. 1979. Т. 22, № 11. С. 1310–1317.
40. Левин И., Копелевич О. Корреляционные соотношения между первичными гидрооптическими характеристиками в спектральном диапазоне около 550 нм. // *Океанология*. 2007. № 3, С. 374–379.
41. Левин И.М. Малопараметрические модели первичных оптических характеристик морской воды // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2014. Т. 7, № 3, С. 3–22.
42. Турлаев Д.Г., Долин Л.С. О наблюдении подводных объектов через взволнованную водную поверхность: новый алгоритм коррекции изображений и лабораторный эксперимент // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49, № 3. С. 370–376.
43. Турлаев Д.Г. Нахождение вектора уклонов взволнованной водной поверхности по ее изображению в условиях естественного освещения // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 3. С. 91–96. doi:10.7868/S20736673180300115

## References

1. *Dolin L.S., Savel'ev V.A.* Backscattering signal characteristics at pulse narrow beam illumination of a turbid medium. *Izvestiya Academy of Science USSR, Atmospheric and Oceanic Physics*. 1971, 7, 5, 505–510 (in Russian).
2. *Bravo-Zhivotovsky D.M., Gordeev L.B., Dolin L.S., Mochenev S.B.* Determining the absorption and scattering coefficients of sea water by some characteristics of a light field of artificial light sources. *Hydrophysical and hydrooptics investigations in the Atlantic and the Pacific Oceans* / Ed. By Monin A.S., Shifrin K.S. M., Nauka, 1974, 153–158 (in Russian).
3. *Ocean optics* / Ed. By Monin A.S. M., Nauka, 1983. Vol. 1. Physical optics of the ocean. 371 p. (in Russian).
4. *Billard B., Abbot R.H., Penny M.F.* Airborne estimation of sea turbidity parameters from the WRELANDS laser airborne depth sounder. *Applied Optics*. 1986, 25, 2080–2088.
5. *Bravo-Zhivotovsky D.M., Dolin L.S., Savel'ev V.A., Fadeev V.V., Shchegol'kov Yu.B.* Optical methods for sounding of the ocean: laser remote sensing. *Methods of Remote Sensing of the Ocean* / Ed. By Bravo-Zhivotovsky D.M., Dolin L.S. *Institute of Applied Physics, Gorky, USSR*, 1987, 84–125 (in Russian).
6. *Hoge F.E., Wright C.W., Krabill W.B., Buntzen R.R., Gilbert G.D., Swift R.N., Yungel J.K., Berry R.E.* Airborne lidar detection of subsurface oceanic scattering layers. *Applied Optics*. 1988, 27, 3969–3977.
7. *Vasilkov A.P., Kondranin T.V., Myasnikov E.V.* Determination of the profile of the light scattering index from the polarization characteristics of back-reflected radiation in pulsed sounding of the ocean. *Izvestiya Academy of Science USSR, Atmospheric and Oceanic Physics*. 1990, 26, 3, 307–312 (in Russian).
8. *Dolin L.S., Levin I.M.* Handbook on the Theory of Underwater Vision. *Leningrad, Gidrometeoizdat*, 1991. 230 p. (in Russian).
9. *Dolin L.S., Levin I.M.* Optics, Underwater. *Encyclopedia of Applied Physics. VCH Publishers*, 1995, 12, 571–601.
10. *Vasilkov A.P., Goldin Yu.A., Gureev B.A.* Determination of the vertical distribution of the seawater scattering index using an aviation polarization lidar. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 1997, 33, 4, 563–569 (in Russian).

11. Vasilkov A.P., Goldin Y.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
12. Bissonnette L.R., Roy G., Poutier L., Cober S.G., Isaac G.A. Multiple-scattering lidar retrieval method: tests on Monte Carlo simulations and comparisons with *in situ* measurements. *Applied Optics*. 2002, 41, 30, 6307–6324. doi:10.1364/AO.41.006307
13. Feygels V.I., Kopilevich Y.I., Surkov A., Yangel J.K., Behrenfeld M.J. Airborne lidar system with variable field-of-view receiver for water optical measurements. *Proceedings of SPIE. Ocean Remote Sensing and Imaging II*. 2003, 5155, 12–21.
14. Kokhanenko G.P., Krekova M.M., Penner I.E., Shamanaev V.S. Detection of hydrosol inhomogeneities by a polarizing lidar. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2004, 17, 9, 750–758. (in Russian).
15. Kopilevich Yu., Feygels V.I., Tuell G.H., Surkov A. Measurement of ocean water optical properties and seafloor reflectance with scanning hydrographic operational airborne lidar survey (SHOALS): I. Theoretical background. *Proceedings of SPIE*. 2005, 5885, 9 p.
16. Tuell G.H., Feygels V., Kopilevich Yu., Weidemann A.D., Cunningham A.G., Mani R., Podoba V., Ramnath V., Park J.Y., Aitken J. Measurement of ocean water optical properties and seafloor reflectance with scanning hydrographic operational airborne lidar survey (SHOALS): II. Practical results and comparison with independent data. *Proceedings of SPIE*. 2005, 5885, 13 p.
17. Hoge F.E. Oceanic inherent optical properties: proposed single laser lidar and retrieval theory. *Applied Optics*. 2005, 44, 34, 7483–7486. doi:10.1364/AO.44.007483
18. Churnside J.H., Thorne R.E. Comparison of airborne lidar measurements with 420 kHz echo-sounder measurements of zooplankton. *Applied Optics*. 2005, 44, 26, 5504–5514. doi:10.1364/AO.44.005504
19. Zege E., Katsev I., Prikhach A. Retrieval of seawater inherent optical properties profiles from lidar waveforms. *Proceedings of SPIE*. 2007, 6615, 66150B, 10 p.
20. Dolina I.S., Dolin L.S., Levin I.M., Rodionov A.A., Savel'ev V.A. Inverse problems of lidar sensing of the ocean In: Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters. *Proceeding of SPIE*. 2007, 6615, 66150C — 1–10.
21. Dolin L.S. Lidar method for measurement of the modulation transfer function of water layers. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2010, 3(9), 62–71 (in Russian).
22. Kokhanenko G.P., Balin Yu.S., Penner I.E., Shamanaev V.S. Lidar and *in situ* measurements of optical parameters of water surface layers in Lake Baikal. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2011, 24, 478–486. doi:10.1134/S1024856011050083
23. Palmer S.C.J., Pelevin V.V., Goncharenko I., Kovács A.W., Zlinszky A., Présing M., Horváth H., Nicolás-Perea V., Balzter H., Tóth V.R. Ultraviolet fluorescence LiDAR (UFL) as a measurement tool for water quality parameters in turbid lake conditions. *Remote Sensing*. 2013, 5, 4405–4422. doi:10.3390/rs5094405
24. Pelevin V., Zavialov P., Kononov B., Abramov O., Grabovskiy A., Goncharenko I. Remote Laser Sensing of the Seas and Inland Waters Bodies using Portable Fluorescent Lidars (UFL series). *Proceedings of VIII International Conference "Current problems in optics of natural waters"* (ONW'2015). St. Petersburg, 2015, 179–184 (in Russian).
25. 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).
26. 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).
27. Lednev V.N., Grishin M. Ya., Pershin S.M., Bunkin A.F., Kapustin I.A., Molkov A.A., Ermakov S.A. Laser remote probing of freshwater reservoir with high phytoplankton concentration. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2016, 13, 1, 119–134 (in Russian). doi:10.21046/2070-7401-2016-13-1-119-134
28. Grishin M. Ya., Lednev V.N., Pershin S.M., Bunkin A.F., Kobylanskiy V.V., Ermakov S.A., Kapustin I.A., Molkov A.A. Laser remote sensing of an algal bloom in a freshwater reservoir. *Laser Physics*. 2016, 26, 125601 (8pp). doi:10.1088/1054-660X/26/12/125601
29. Molkov A.A., Kapustin I.A., Shchegolkov Yu.B., Vodeneva E.L., Kalashnikov I.N. On correlation between inherent optical properties at 650 nm, Secchi depth and blue-green algal abundance for the Gorky reservoir. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2018, 11, 3, 26–33. doi:10.7868/S2073667318030036
30. Molkov A.A., Fedorov S.V., Pelevin V.V., Korchemkina E.N. On regional models for high-resolution retrieval of Chlorophyll a and TSM concentrations in the Gorky Reservoir by Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*. 2019, 10, 11, 1215–1241. doi:10.3390/rs11101215
31. Molkov A.A., Pelevin V.V., Korchemkina E.N. Approach of non-station-based *in situ* measurements for high resolution satellite remote sensing of productive and highly changeable inland waters. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2020, 13(2), 60–67. doi:10.7868/S2073667320020070



32. *Fukshansky L.* Absorption statistics in turbid media. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1987, 38, 389–406.
33. *McClendon J.H., Fukshansky L.* On the interpretation of absorption spectra of leaves — II. The non-absorbed ray of the sieve effect and the mean optical pathlength in the remainder of the leaf. *Photo-chem Photobiol.* 1990, 51, 211–216.
34. *Anisimov O., Fukshansky L.* Stochastic radiation in macroheterogeneous random optical media. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1992, 48, 169–186.
35. *Dolin L.S., Sergeeva E.A., Turchin I.V.* Shadow noise in OCT images of biological tissues. *Quantum Electronics*. 2008, 38, 6, 543–550. doi:10.1070/QE2008v038n06ABEH013839
36. *Dolin L.S.* Development of the radiative transfer theory as applied to instrumental imaging in turbid media. *Physics — Uspekhi*. 2009, 52, 5, 519–526. doi:10.3367/UFNe.0179.200905k.0553
37. *Dolin L.S., Sergeeva E.A., Turchin I.V.* Correlation characteristics of optical coherence tomography images of turbid media with statistically inhomogeneous optical parameters. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2012, 113, 9, 691–703. doi:10.1016/j.jqsrt.2012.02.004
38. *Dolin L.S., Dolina I.S., Savelyev V.A.* A lidar method for determining internal wave characteristics. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012, 48, 4, 444–453. doi:10.1134/S0001433812040068
39. *Dolin L.S., Savel'ev V.A.* Theory of the propagation of a narrow light beam in a stratified scattering medium. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1979, 22, 11, 911–917.
40. *Levin I.M., Kopelevich O.V.* Correlations between the inherent hydrooptical characteristics in the spectral range close to 550 nm. *Oceanology*. 2007, 47, 3, 344–349. doi:10.1134/S000143700703006X
41. *Levin I.M.* Few-parameter optical models of seawater inherent optical properties. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2014, 7, 3, 3–22 (in Russian).
42. *Turlaev D.G., Dolin L.S.* On observing underwater objects through a wavy water surface: a new algorithm for image correction and laboratory experiment. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013, 49, 3, 339–345. doi:10.1134/S0001433813030158
43. *Turlaev D.G.* Determining the vector of slopes of the water surface from its image under natural illumination. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2018, 11, 3, 91–96 (in Russian). doi:10.7868/S20736673180300115

#### **Об авторе**

**ДОЛИН Лев Сергеевич**, РИНЦ Author ID: 18674, ORCID ID: 0000-0002-0043-8972,  
Scopus Author ID: 7003454310, lev.dolin@ipfran.ru