

УДК 551.463.5:535.36.01:551.466.8

© И. С. Долина, Л. С. Долин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

dolina@hydro.appl.sci.nnov.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИДАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В МЕЛКОМ МОРЕ

Статья поступила в редакцию 30.06.2016, после доработки 22.12.2016.

Проведено исследование особенностей формирования лидарных изображений нелинейных внутренних волн в условиях, приближенных к реальным. Выполнен анализ зависимости структуры изображения внутренних волн от характера стратификации показателя ослабления света (приповерхностный и придонный мутные слои, линейная стратификация, тонкая структура показателя ослабления). Показано, что в прибрежных районах Баренцева моря имеются условия для получения контрастных изображений нелинейных внутренних волн. Относительные изменения интенсивности эхо-сигнала, возникающие под влиянием внутренней волны, могут достигать десяти децибел. Максимальное изменение эхо-сигнала наблюдается при наличии слоя мутности в районе пикноклина, при этом в лидарном изображении хорошо отображаются вертикальные перемещения слоя мутности под влиянием внутренней волны. При существенном различии прозрачности воды над пикноклином и под ним формируется теневое изображение внутренней волны, знак контраста которого зависит от полярности солитона и того, какой из слоев верхний или нижний является более мутным. В жидкости с линейной стратификацией показателя ослабления пространственные вариации мощности эхо-сигнала почти линейно воспроизводят поле вертикальных смещений жидкости во внутренней волне. Полученные результаты могут быть использованы для решения задач дистанционной диагностики внутренних волн.

Ключевые слова: лидар, первичные гидрооптические характеристики, внутренние волны, слои мутности.

I. S. Dolina, L. S. Dolin

Institute of applied physics of RAS, Nizhny Novgorod

SIMULATION OF LIDAR IMAGES OF NONLINEAR INTERNAL WAVES IN THE SHALLOW SEA

Received 30.06.2016, in final form 22.12.2016.

An investigation of the peculiarities in shaping of lidar images of nonlinear internal waves is performed in the conditions approaching the actual. The analysis of the dependence of internal wave images structure on the character the attenuation coefficient stratification is made (surface and bottom turbid layers, linear stratification, fine structure of the attenuation coefficient). It is shown that the conditions for obtaining contrast images of nonlinear internal waves are existent in coastal zones of the Barents Sea. The relative variations of the echo-signal power in the internal wave field may run to ten decibel. The maximum variation of the echo-signal is observed with a turbid layer in a pycnocline region, in this case the vertical displacements of the turbid layer in the internal wave field are effectively manifests. The shadow image of the internal wave is formed with essential distinctions in fluid transparency over and under pycnocline, the contrast sign of this image depends on the polarity of soliton and the fact of what layer (upper or lower) is more turbid. In the case of linear stratification of the attenuation coefficient the spatial variations of the echo-signal power reproduce the field of vertical displacements in the internal wave. These results can be used for solution the problems of lidar remote sensing of internal waves.

Key words: lidar, inherent optical properties, internal waves, turbid layers.

Ссылка для цитирования: Долина И. С., Долин Л. С. Моделирование лидарных изображений нелинейных внутренних волн в мелком море // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 1. С. 31—36.

For citation: Dolina I. S., Dolin L. S. Simulation of lidar images of nonlinear internal waves in the shallow sea. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2017, 10, 1, 31—36.

DOI: 10.7868/S207366731701004X.

Внутренние волны (ВВ) могут наблюдаться лидаром благодаря тому, что под их влиянием вертикальные неоднородности первичных гидрооптических характеристик трансформируются в горизонтальные, что приводит к изменению мощности эхо-сигнала, приходящего с заданной глубины. Наиболее контрастно ВВ проявляются в искажениях формы подповерхностных светорассеивающих слоев (слоев мутности), которые наблюдались с помощью самолетных лидаров [1—5]. Подробный обзор этих исследований представлен в работах [4, 5]. Внутренние волны наблюдались и судовым лидаром [6, 7]. Возможность его использования в качестве регистратора ВВ была подтверждена в [6] измерениями колебаний звукорассеивающего слоя с помощью гидролокатора.

Математическая модель лидарного изображения ВВ малой амплитуды была представлена в [8], а в [9] разработана модель лидарного изображения уединенной нелинейной внутренней волны, описываемой уравнением Кортевега—де Вриза (КдВ). Коэффициенты уравнения КдВ определялись через заданные вертикальные распределения плотности жидкости и сдвигового течения. Рассматривались различные модели стратификации жидкости по плотности, а также изучалось влияние сдвиговых течений [9—11]. В настоящей работе лидарные изображения нелинейных ВВ моделируются для двухслойной плотностной модели океана. Основное внимание уделено изучению влияния стратификации показателя ослабления света на структуру изображения ВВ, рассмотрены случаи стратификации, характерные для прибрежной зоны.

Модель отраженного сигнала. Внутренние волны могут обнаруживаться лидаром благодаря тому, что они искажают вертикальные распределения первичных гидрооптических характеристик (ПГХ), что приводит к изменению мощности эхо-сигнала, приходящего с заданной глубины. Наиболее контрастно ВВ проявляются в лидарном сигнале при наличии слоев мутности в области пикноклина. При этом с помощью лидара можно наблюдать искривления слоев мутности под влиянием ВВ, которые и несут информацию о ее пространственной структуре. Математические модели лидарных изображений линейных и нелинейных внутренних волн были разработаны нами ранее и подробно описаны в работах [8—11].

Лидарным изображением мы называем мощность эхо-сигнала как функцию горизонтальной координаты лидара x и глубины z , с которой приходит сигнал. Для моделирования изображений используются формулы [8]

$$P(x, z) = (1/8) v_w W (r_r \vartheta_r)^2 b_b(x, z) T_a(x, z) T_b(x, z), \quad (1)$$

$$T_a = \exp \left[-2 \int_0^z a_{\text{eff}}(x, z) dz \right], \quad (2)$$

$$T_b = \int_0^\infty \exp \left\{ - (r_r^2 + \vartheta_r^2 z^2) (k/2)^2 - 2 \int_0^z b_f(x, z - z') \left[1 - \left(1 + 0.5 \cdot d_x(x, z - z') (kz')^2 \right)^{-1/2} \right] dz' \right\} k dk, \quad (3)$$

где v_w — скорость света в воде; W — энергия зондирующего импульса; $2r_r$ — диаметр входного зрачка приемника; $2\vartheta_r$ — апертурный угол приемника; b_b — показатель обратного рассеяния; $a_{\text{eff}} = a + 2b_b$ — эффективный показатель поглощения; a — показатель поглощения; $b_f = b - 2b_b$ — показатель рассеяния «вперед»; b — показатель рассеяния; d_x — параметр (дисперсия) остронаправленной части индикатрисы рассеяния. Приведенные формулы применимы при условии, что лидар располагается под границей раздела воздух-вода (например, в шахте судна), а длительность зондирующего импульса удовлетворяет условию $\Delta t \ll 2\Delta z/v_w$, Δz — характерный масштаб вертикальной неоднородности ПГХ.

Согласно формулам (1)—(3) мощность обратно рассеянного сигнала может быть представлена в виде произведения трех функций, первая из которых описывает пространственное распределение коэффициента обратного рассеяния $b_b(x, z)$ в поле ВВ. Множитель T_a описывает ослабление сигнала из-за поглощения и обратного рассеяния света при его прямом и обратном прохождении через водный слой толщины z . Множитель T_b учитывает влияние эффектов многократного рассеяния света вперед на мощность обратно рассеянного сигнала. Именно он усложняет модель сигнала, поскольку имеет вид двукратного интеграла, зависящего от показателя рассеяния вперед, параметра индикатрисы рассеяния и параметров лидара. Однако, как было показано в [8], модуляция сомножителя T_b полем ВВ становится заметной только на достаточно больших глубинах, а непосредственно под пикноклином она практически отсутствует. Поэтому расчеты лидарных изображений ВВ на мелководье выполнялись без учета

влияния этого множителя на структуру изображения ВВ. Для упрощения модели изображения использовались эмпирические корреляционные связи между различными оптическими характеристиками, которые были получены в [12] для морских вод типа «Case 2».

На основе приведенных выше формул было показано, что лидарное изображение ВВ представляет собой суперпозицию двух изображений — отражательного и теневого. Первое из них несет информацию о локальных возмущениях профиля показателя обратного рассеяния в поле ВВ. Второе изображение формируется в результате горизонтально неоднородного ослабления лазерного импульса при двукратном прохождении через водный слой, в котором ВВ нарушила горизонтальную однородность оптических характеристик. Оно несет информацию о возмущениях коэффициента пропускания этого слоя.

Модель поля ВВ и возмущений профиля показателя ослабления света в поле ВВ. Для простейшей двухслойной модели стратификации, когда $\rho(z) = \rho_1$ для $0 \leq z \leq h_1$ и $\rho(z) = \rho_2 > \rho_1$ для $h_1 \leq z \leq H$ ($H = h_1 + h_2$ — полная глубина жидкости) используем солитонное решение уравнения КдВ [13]:

$$\eta(x, t) = \eta_0 \operatorname{sech}^2 \frac{x - Vt}{\Delta}.$$

Скорость солитона V и его характерный полуразмер Δ связаны с линейной скоростью v и амплитудой смещения η_0 формулами $V = v + \alpha\eta_0/3$, $\Delta^2 = 12\beta/\alpha\eta_0$, где $v \approx (g\Delta\rho h_1 h_2/\rho(h_1 + h_2))^{1/2}$, $\alpha \approx 3v(h_1 - h_2)/2 h_1 h_2$, $\beta \approx v h_1 h_2/6$.

Зависимость возмущения от глубины определяется структурой моды в линейном приближении. Для двухслойной стратификации она имеет вид:

$$\varphi(z) = \begin{cases} z/h_1, & 0 \leq z \leq h_1 \\ (H - z)/(H - h_1), & h_1 \leq z \leq H. \end{cases}$$

Таким образом, вертикальное смещение элемента жидкости с заданного горизонта определяется формулой

$$\zeta(x, z, t) = \eta(x, t)\varphi(z).$$

Заметим еще, что в сопровождающей системе координат $x - Vt$ решение не зависит от t , штрихи для x далее опускаем.

Возмущения показателя ослабления, создаваемые ВВ, рассчитываются аналогично тому, как это делалось в [9—11]. Если элемент жидкости под влиянием ВВ перемещается с горизонта z' в точку с координатами x , $z = z' + \zeta(x, z')$, сохраняя свои оптические свойства, то распределение показателя ослабления света $c(x, z)$ в водной толще выражается через невозмущенный профиль показателя ослабления $c_0(z)$ с помощью соотношения

$$c(x, z) = c_0(z') \quad (4)$$

и уравнения

$$z' + \zeta(x, z') = z, \quad (5)$$

из которого определяется функция $z'(x, z)$.

В рассматриваемом нами случае уравнение (5) решается аналитически и дает:

$$z'(x, z) = \begin{cases} \frac{z}{1 + \eta(x)/h_1}, & 0 < z < h_1 + \eta(x), \\ \frac{z - \eta(x)H / (H - h_1)}{1 - \eta(x)/(H - h_1)}, & h_1 + \eta(x) < z < H. \end{cases} \quad (6)$$

При моделировании лидарных изображений нелинейных ВВ распределения $c(x, z)$ находились путем подстановки выражения (6) в правую часть формулы (4).

Результаты моделирования. При расчетах использовались профили показателя ослабления света $c(z)$, типичные для прибрежных районов Баренцева моря (например, станции 1124, 1138, 1099, 1148 экспедиции НИС «Академик Сергей Вавилов» [14]).

Параметры плотностной стратификации, которые использовались в расчетах, приведены в таблице. Там же приведены соответствующие значения скорости волны v и коэффициентов α , β , а также значения полуширины солитона Δ с заданной амплитудой η_0 . Обратим внимание на то, что коэффициент отрицателен, вследствие чего солитон в этом случае представляет собой впадину.

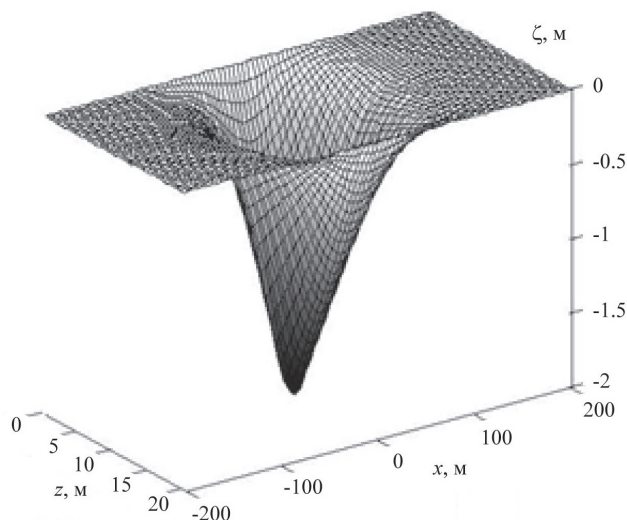


Рис. 1. Поле вертикальных смещений жидкости $\zeta(x, z)$ во внутренней волне.

Расчеты проводились для лидара с параметрами: энергия зондирующего импульса $W = 0.4$ Дж, диаметр входного зрачка приемника $2r_r = 20$ см, угол поля зрения приемника $2\theta_r = 4^\circ$. Предполагалось, что лидарное изображение ВВ формировалось путем записи мощности эхо-сигнала $P(x, z)$ как функции глубины z , с которой он приходит, и координаты x , определяющей положение лидара в горизонтальной плоскости. Отраженный от дна сигнал не рассчитывался, поскольку он приходит после сигнала обратного объемного рассеяния и не портит изображение ВВ. На рис. 1 изображено поле вертикальных смещений жидкости $\zeta(x, z)$ во внутренней волне для параметров указанных в таблице. На рис. 2—6 для различных профилей $c(z)$ изображены поверхности возмущений функции $L(x, z) = 10 \lg P(x, z)$, где P — мощность эхо-сигнала, Вт. Кроме того, для

оценки контрастности изображения ВВ и относительного вклада возмущений показателя обратного рассеяния b_b и эффективного показателя поглощения $a_{eff} = a + 2b_b$ в наблюдаемые вариации эхо-сигнала рассчитывались функции

$$\delta P(z) = 10 \lg [P(0, z) / P(200, z)] = \delta P_{bb}(z) + \delta P_a(z),$$

$$\delta P_{bb}(z) = 10 \lg [b_b(0, z) / b_b(200, z)], \quad \delta P_a(z) = 10 \lg [T_a(0, z) / T_a(200, z)].$$

Рис. 2 иллюстрирует ситуацию, когда в лидарном изображении присутствуют обе компоненты — отражательная и теневая. Отражательное изображение сформировано одиночным мутным слоем. Теневое изображение проявляется в ослаблении сигналов, приходящих из придонного водного слоя с однородными оптическими свойствами. Оно возникает вследствие увеличения толщины верхнего более мутного слоя под влиянием ВВ. Теневое и отражательное изображения хорошо разделяются по глубине в данном случае, так как мутный слой расположен между двумя плато с различными примерно постоянными значениями $c(z)$.

При отсутствии одиночного мутного слоя (рис. 3) в верхней части водного слоя наблюдается слабое отражательное изображение, а в нижней половине — теневое. Отражательное изображение

Значения параметров, используемых в вычислениях

$\rho_1, \text{г/см}^3$	$\rho_2, \text{г/см}^3$	$h_1, \text{м}$	$h_2, \text{м}$	$\eta_0, \text{м}$	$v, \text{м/с}$	$\alpha/v, \text{м}^{-1}$	$\beta/v, \text{м}^2$	$\Delta, \text{м}$
1.022	1.027	8.5	12.4	2	0.5	-0.055	17.6	43.8

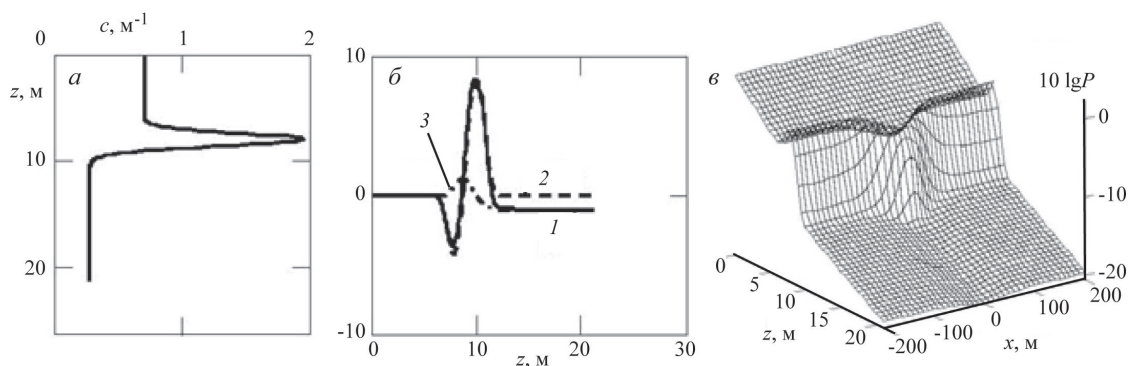


Рис. 2. Результаты расчетов эхо-сигнала для различных распределений показателя ослабления света.

a — вертикальное распределение показателя ослабления; $б$ — относительные сигналы: δP , дБ (1); δP_{bb} , дБ (2); δP_a , дБ (3); $в$ — поверхности возмущений функции $L(x, z) = 10 \lg P(x, z)$, дБ.

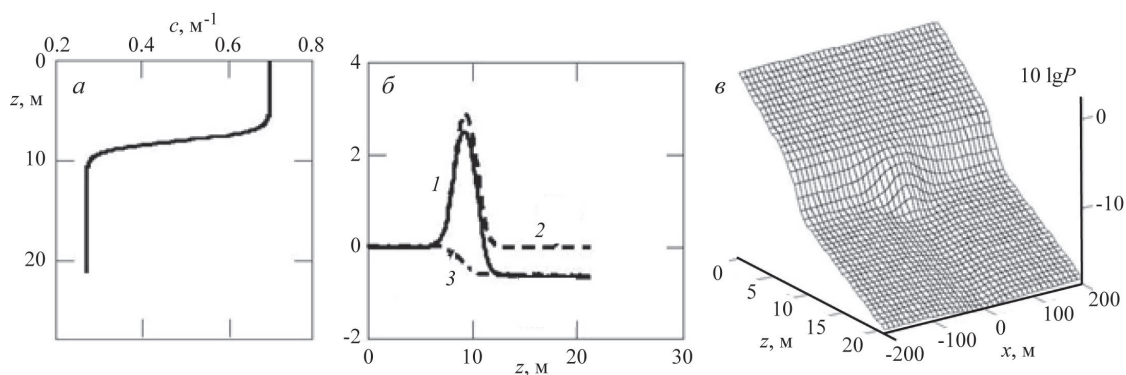


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но при отсутствии одиночного мутного слоя.

сформировано перепадом $c(z)$ и этот перепад хорошо проявился потому, что максимальный градиент $c(z)$ расположен в области максимума моды ВВ. Структура теневого изображения полностью аналогична рассмотренной выше.

Рис. 4 соответствует случаю, когда оптические свойства воды над пикноклином и под ним одинаковы, а на самом пикноклине располагается одиночный слой мутности. При этом формируется очень контрастное отражательное изображение мутного слоя, а теневое изображение отсутствует.

При наличии придонного мутного слоя (слоя воды между пикноклином и дном с повышенным значением c) знак контраста теневого сигнала изменяется на противоположный (рис. 5). Это связано с уменьшением толщины нижнего более мутного слоя.

На рис. 6 представлены результаты расчета лидарных сигналов для случая линейного изменения профиля показателя ослабления с глубиной. Как видно из рисунков, сигнал, несущий информацию об изменениях профиля $b_b(z)$, повторяет структуру моды, но он «замазывается» более сильным сигналом, связанным с изменением потерь при прямом и обратном прохождении сигнала через водный слой. Полный относительный сигнал монотонно спадает с глубиной.

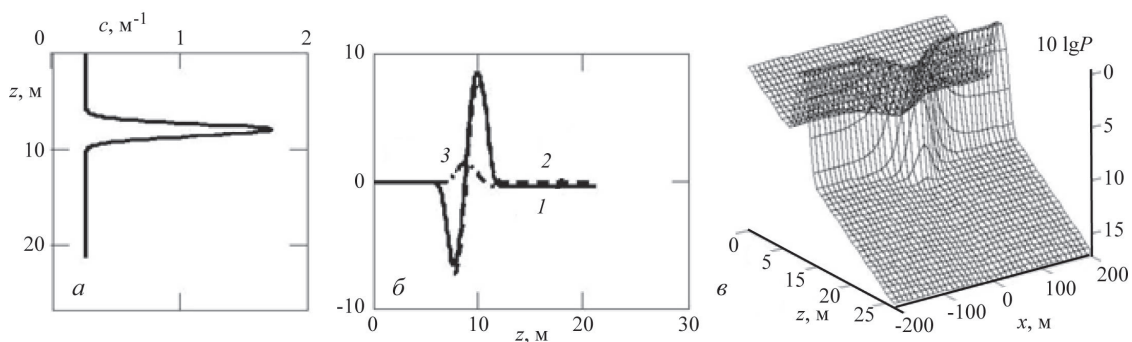


Рис. 4. То же, что на рис. 2, но при отсутствии приповерхностного мутного слоя.

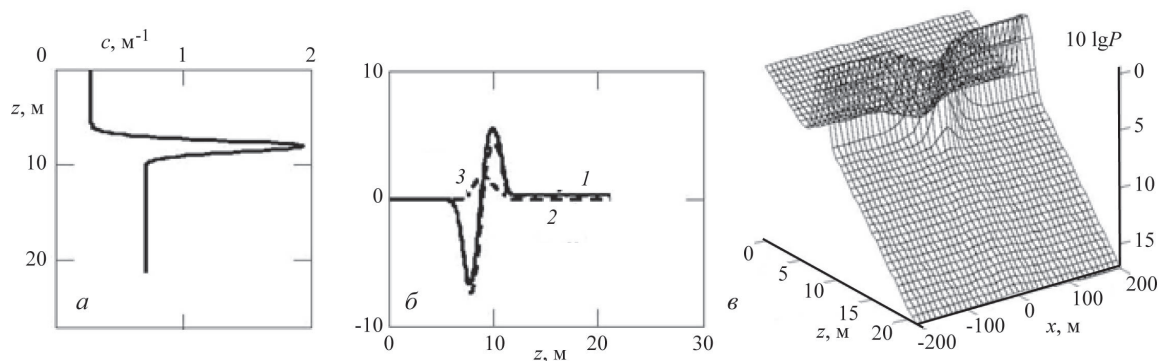


Рис. 5. То же, что на рис. 2, но при наличии придонного мутного слоя.

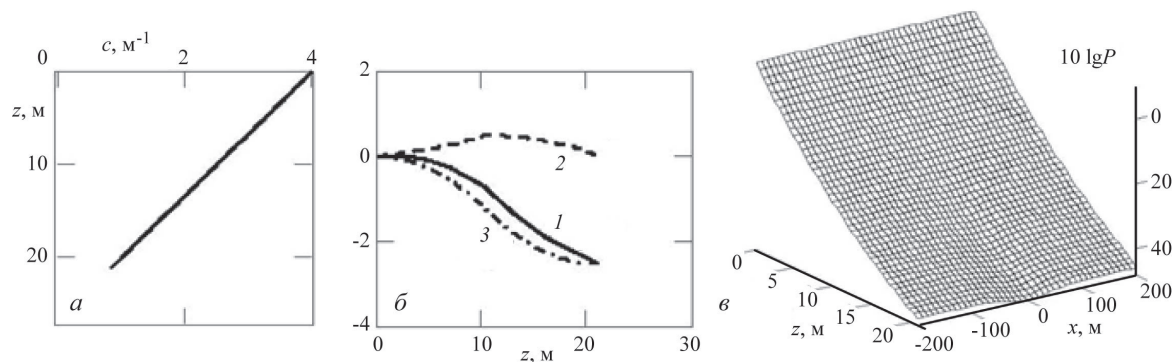


Рис. 6. То же, что на рис. 2, но для линейной стратификации $c(z)$.

Результаты расчетов показывают, что в прибрежных районах Баренцева моря имеются условия для получения контрастных изображений нелинейных внутренних волн. Относительные изменения интенсивности эхо-сигнала, возникающие под влиянием внутренней волны, могут достигать десяти децибел. При этом структура изображения волны с заданными параметрами может существенно меняться в зависимости от вертикального профиля показателя ослабления. Максимальное изменение эхо-сигнала наблюдается при наличии слоя мутности в районе пикноклина, при этом в лидарном изображении хорошо отображаются вертикальные перемещения слоя мутности под влиянием ВВ. При существенном различии прозрачности воды над пикноклином и под ним формируется теневое изображение ВВ, знак контраста которого зависит от полярности солитона и того, какой из слоев верхний или нижний является более мутным. В жидкости с линейной стратификацией показателя ослабления пространственные вариации мощности эхо-сигнала почти линейно воспроизводят поле вертикальных смещений жидкости во внутренней волне.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-05-00138).

Литература

1. 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. V. 27, N 19. P. 3969—3977.
2. Vasilkov P. A., Goldin Y. A., Gureev B. A., Hoge R. F., Swift R. N., Wright C. W. Airborne polarized lidar detection of scattering layers in the ocean // *Applied Optics*. 2001. V. 40, N 24. P. 4353—4364.
3. Churnside J. H., Donaghay P. L. Thin scattering layers observed by airborne lidar // *ICES J. Mar. Sci.* 2009. V. 66. P. 778—789.
4. Churnside J. H., Ostrovsky L. A. Lidar observation of a strongly nonlinear wave train in the Gulf of Alaska // *Int. Journ. of Remote Sensing*. 2005. V. 26, N 1. P. 167—177.
5. Churnside J. H., Marchbanks R. D., Lee J. H., Shaw J. A., Weidemann A., Donaghay P. L. Airborn lidar detection and characterization of internal waves in a shallow fiord // *J. Appl. Remote Sens.* 2012. V. 6. P. 63611—63615.
6. 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.
7. Walker R. E., Fraser A. B., Mastracci L., Hochheimer B. F. Optical sounding for internal waves on the ocean thermocline // *Oceans 82 Conference Record*, 20—22 September 1982 (Washington, DC: American Geophysical Union). P. 247—250.
8. Долин Л. С., Долина И. С., Савельев В. А. Лидарный метод определения характеристик внутренних волн // *Известия РАН, ФАО*. 2012. Т. 48, № 4. С. 501—511.
9. Долин Л. С., Долина И. С. Модель лидарных изображений нелинейных внутренних волн // *Известия РАН, ФАО*. 2014. Т. 50, № 2. С. 224—231.
10. Долин Л. С., Долина И. С. Лидарные изображения нелинейных внутренних волн в океане, стратифицированном по плотности, течению и оптическим свойствам // *Тр. 12-й всеросс. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2014)*. СПб.: Наука, 2014. С. 199—202.
11. Долин Л. С., Долина И. С. Влияние сдвиговых течений на структуру лидарных изображений нелинейных внутренних волн // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2014. Т. 7, № 4. С. 49—56.
12. Левин И. М., Копелевич О. В. Корреляционные связи между первичными гидрооптическими характеристиками в диапазоне 550 нм // *Океанология*. 2007. Т. 47, № 3. С. 344—348.
13. Пелиновский Е. Н., Полухина О. Е., Лэмб К. Нелинейные внутренние волны в океане, стратифицированном по плотности и течению // *Океанология*. 2000. Т. 40, № 6. С. 805—815.
14. Опыт системных океанологических исследований в Арктике / Под ред. А. Л. Лисицына, М. Е. Виноградова, Е. А. Романкевича. М.: Научный мир, 2001. 644 с.