

УДК 551.465

© М.А. Родионов, 2011

Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им.П.П.Ширшова РАН
maxim_rodionov@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИДАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВНУТРЕННИХ ВОЛН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ ГИДРООПТИЧЕСКИХ И ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В СЕВЕРНЫХ МОРЯХ

На основе проведенных натурных измерений глубинных профилей гидрофизических и гидрооптических характеристик в Белом, Баренцевом и Карском морях проведено моделирование лидарных изображений внутренних волн (зависимостей эхо-сигнала лидара от его горизонтальных координат, глубины, с которой приходит сигнал и параметров внутренних волн). Показано, что изображения внутренних волн, в зависимости от вертикального распределения гидрофизических и гидрооптических параметров и их сочетания, имеют достаточно сложную и разнообразную структуру.

Ключевые слова: лидар, внутренние волны, гидрооптика, гидрофизические параметры.

Важной задачей экспериментальной океанологии является исследование оптических проявлений гидрологических структур и процессов в морской толще. Конечной целью этих исследований является решение обратной задачи: восстановление гидрофизических полей (внутренних волн, турбулентности) по измеренным пространственным распределениям первичных гидрооптических характеристик (ПГХ).

В настоящее время получили широкое распространение методы дистанционного лазерного (лидарного) зондирования океана, которые в отличие от контактных методов позволяют получать информацию о пространственной изменчивости ПГХ на больших акваториях с малыми затратами времени. В частности, лидарные методы удалось использовать для регистрации внутренних волн (ВВ), которые обнаруживаются лидаром благодаря тому, что они нарушают горизонтальную однородность профилей ПГХ (см., например, [1]). Проблема количественной оценки параметров ВВ лидарным методом исследовалась в работах [2–4], где были предложены аналитические модели лидарных изображений ВВ и алгоритмы восстановления поля ВВ по этим изображениям с использованием данных о невозмущенных профилях ПГХ и плотностной стратификации.

Лидарным изображением называют [2–4] эхо-сигнал $P(r, z_t)$ как функцию горизонтальных координат лидара r и глубины $z_t = vt/2$, с которой сигнал приходит. При фиксированном положении лидара он формирует одномерное изображение водной среды $P(z_t)$, которое несет определенную информацию о вертикальной неоднородности ПГХ. При горизонтальном перемещении лидара в направлении x и фиксированной ориентации его оптической оси формируется двухмерное изображение $P(x, z_t)$, позволяющее рассчитывать горизонтальную изменчивость профилей ПГХ.

В отсутствие гидрофизических возмущений и при постоянстве ПГХ на фиксированной глубине функция $P(x, z_t)$ на данной глубине z_t – константа.

Внутренние волны и другие гидрофизические возмущения могут наблюдаться лидаром благодаря тому, что под их влиянием вертикальные неоднородности ПГХ транс-

формируются в горизонтальные. Ясно, что если бы стратификация ПГХ отсутствовала, вертикальное смещение жидкости не привело бы к изменению сигнала при движении лидара и ВВ были бы не видны. Если $\sigma(z)$ – исходное (не возмущенное внутренней волной) вертикальное распределение некоторой ПГХ (например, показателя обратного рассеяния $b_b(z)$), а $\zeta(x, z, t)$ – поле вертикального смещения жидкости, то пространственное распределение этого параметра в поле ВВ будет иметь вид [2]:

$$\sigma'(\vec{r}, z, t) \approx \sigma[z - \zeta(\vec{r}, z, t)], \quad (1)$$

т.е. воздействие ВВ на распределение σ проявляется в «искривлении» изолиний этого распределения. А искривление изолиний ПГХ, в свою очередь, проявляется в лидарном изображении – мощности эхо-сигнала. Таким образом, чтобы восстановить поле ВВ ζ , надо из лидарного сигнала P найти распределение некоторой ПГХ $\sigma'(z)$, а затем решить уравнение (1) относительно ζ . Однако для решения этой обратной задачи необходимо сначала решить прямую задачу: моделирование лидарных изображений ВВ по заданным распределениям ПГХ и функции $\zeta(x, z, t)$. Эта прямая задача и решалась в данной работе по результатам измерений гидрооптических и гидрофизических параметров в Баренцевом, Белом и Карском морях. При этом для расчета мощности эхо-сигнала, приходящего из водного слоя использовалась формула, полученная Л.С. Долиным с учетом поля ВВ $\zeta(x, z, t)$ [3, 5]:

$$P(x, z_t) = (vW\pi r_2^2 \vartheta_2^2 / 4) b'_b(x, z_t) F(x, z_t), \quad z_t = vt/2, \quad (2)$$

$$F(x, z_t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty k \cdot \exp[-S(z_t) \cdot k^2 - 2\tau'(x, z_t) + 2 \int_0^{z_t} \frac{b'_1(x, z_t - z)}{(1 + k^2 z^2 < \gamma^2 >^{1/2})} dz] dk,$$

$$S(z_t) = \frac{1}{4} [r_1^2 + r_2^2 + (\vartheta_1^2 + \vartheta_2^2) z_t^2], \quad \tau'(x, z_t) = \int_0^{z_t} c'(x, z) dz;$$

здесь v – скорость света в воде, м/с; W – энергия зондирующего импульса, Дж; r_1, r_2 – радиусы пучка и входного зрачка приемника, м; $2\vartheta_1, 2\vartheta_2$ – апертурные углы источника и приемника (рад.);

$$\begin{aligned} c'(x, z, t) &\approx c[z - \zeta(\vec{r}, z, t)]; \\ b'_b(x, z, t) &\approx b_b[z - \zeta(\vec{r}, z, t)]; \\ b'_1(x, z, t) &\approx b_1[z - \zeta(\vec{r}, z, t)]; \\ < \gamma^2 >'(x, z, t) &\approx < \gamma^2 > [z - \zeta(\vec{r}, z, t)], \end{aligned} \quad (3)$$

где b_b – показатель обратного рассеяния, м^{-1} ; c – показатель ослабления, м^{-1} ; $b_1 = b - 2b_b$ – показатель «малоуглового» рассеяния, м^{-1} ; b – показатель рассеяния, $< \gamma^2 >$ – дисперсия индикатрисы малоуглового рассеяния. Формулы (3) следуют из (1).

Метод измерения гидрооптических и гидрофизических параметров. Как видно из формулы (2), лидарный сигнал зависит от нескольких ПГХ: показателей ослабления (c), рассеяния (b) и обратного рассеяния (b_b), а также дисперсии индикатрисы $< \gamma^2 >$. По-

видимому, проблема восстановления глубинных профилей ПГХ не имела бы однозначного решения, если бы эти ПГХ изменялись бы с глубиной независимо. Однако, как показано в [6], все они в середине видимой области спектра, где работают все океанические лидары, могут быть выражены через показатель ослабления c :

$$b = 0.94 c - 0.048, b_b = 0.018 c, \langle \gamma^2 \rangle = 0.021 + 0.7656 b_b / b. \quad (4)$$

Формулы (4) справедливы в диапазоне $c = 0.3 - 2.5 \text{ м}^{-1}$, т.е. для прозрачностей воды по белому диску порядка 2–20 м, в пределах которых изменяется прозрачность в северных морях.

Таким образом, для расчета лидарного сигнала достаточно измерить глубинный профиль показателя ослабления, а остальные ПГХ рассчитать по формулам (4).

Для измерения показателя ослабления использовался разработанный нами прозрачномер, предназначенный для измерений в прибрежных водах. Пределы измерения c – от 0.3 до 6.0 м^{-1} , предельная точность – около 1 % для $c = 1 \text{ м}^{-1}$ (прозрачность по белому диску $z_b \approx 6 \text{ м}$), около 2 % для $c = 0.5 \text{ м}^{-1}$ ($z_b \approx 12 \text{ м}$) и около 4 % для $c = 0.25 \text{ м}^{-1}$ ($z_b \approx 20 \text{ м}$). Подробное описание прозрачномера дано в [7].

Для измерения температуры и электрической проводимости морской воды использовались серийные зонды отечественного и западного производства (ОЛД-1 – НПО «МАРС», SBE-19 – Германия, FSI – США).

Давление, температура, электропроводность и показатель ослабления регистрировались при погружении от поверхности до дна соединенных вместе и закрепленных на тросе зондов. Одновременно проводился замер глубины видимости диска Секки. Данные гидрологических зондирований обрабатывались с использованием стандартных пакетов программ, входящих в комплект зондов; также при их помощи измеренные температура и электропроводность пересчитывались в плотность. Гидрооптические измерения обрабатывались при помощи программ Measurement Studio и Microsoft Excel. Осреднение данных проводилось с дискретностью по глубине через 1 м. Окончательная обработка океанологической информации выполнялась на персональном компьютере с помощью прикладной программы Surfer.

Всего с 2006 по 2010 г. в 10 экспедициях автором было выполнено 285 совместных измерений гидрологических и гидрооптических характеристик: в центральной и юго-восточной частях Баренцева моря – 80, в Белом море – 150, в юго-западной части Карского моря и проливе Карские Ворота – 55.

Метод и алгоритм расчета лидарных изображений. Метод и алгоритм расчета основан на моделировании лидарных изображений одномодового поля ВВ $\zeta(\vec{r}, z, t)$ с заданной амплитудой на основе данных об измеренных вертикальных профилях температуры, солености и плотности воды и показателя ослабления. Для описания ВВ, так же как и в [2–4], использовалась модель Грена, в соответствии с которой структура 1-й моды ВВ характеризуется функцией

$$\zeta(x, z, t) = \zeta_0 \left[\text{sech}^{kd} \left(\frac{z-h}{d} \right) - \text{sech}^{kd} \left(\frac{z+h}{d} \right) \right] \sin(\omega t - kx) \quad (5)$$

с двумя параметрами плотностной стратификации, один из которых (d) характеризует толщину пикноклина, а другой (h) – глубину его залегания; ζ_0 – максимальная амплитуда первой моды (в случае синусоидальной волны $\zeta_0 = \text{cont}$; при цуговом строении волн размах колебаний меняется от нуля до максимального значения – в работе модуляция цуга принята синусоидальной), ω – частота ВВ, $\lambda = 2\pi/k$ – длина ВВ. Расчеты прово-

дились для длины волны $\lambda = 20$ м при разных значениях ω/N_0 , где N_0 – максимальное значение частоты Вайсяля $N = \sqrt{(g/\rho)(d\rho/dz)}$, ρ – плотность воды, $\zeta_0 = 2$ м. Волновое число $k = 2\pi/\lambda$ определялось из дисперсионного соотношения $\omega/N_0 = \frac{kd}{\sqrt{(kd+m-1)(kd+m)}}$ (m – номер моды), период волны $T = 2\pi/\omega$.

Структура алгоритма моделирования лидарного изображения поля ВВ с заданной амплитудой показана на рис. 1.

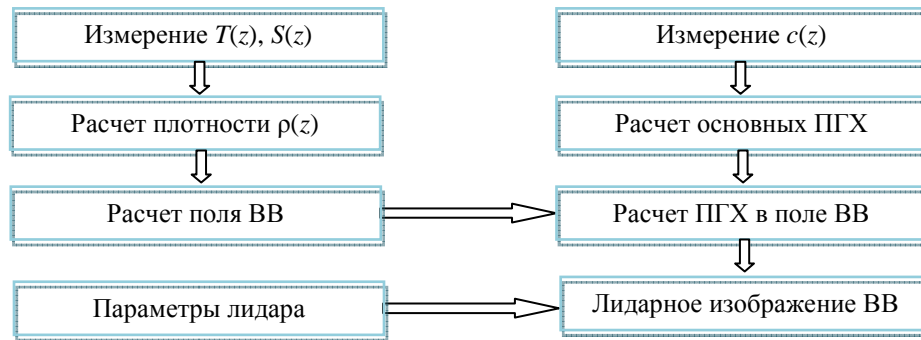


Рис. 1. Схема алгоритма моделирования лидарных изображений внутренних волн.

Исходными данными для моделирования служат профили показателя ослабления света $c(z)$, температуры $T(z)$ и электропроводности $S(z)$ воды; амплитуда и номер моды ВВ; параметры лидара (W – энергия зондирующего импульса, Дж; r_1, r_2 – радиусы пучка и входного зрачка приемника, м; $2\vartheta_1, \vartheta_2$ – апертурные углы источника и приемника, рад. Расчеты проводились для параметров, соответствующих реальному лидару, имеющемуся в Лаборатории оптики Института океанологии РАН: $W = 0.4$ Дж, $r_2 = 0.1$ м, $\vartheta_2 = 0.035$ (2 град.), $r_1 = 0.005$ м, $\vartheta_1 = 0.003$. Предполагалось, что лидар перемещается в направлении волнового вектора (ось x) со скоростью, существенно превышающей скорость распространения ВВ, так что структура изображения определяется распределением ζ при $t = 0$.

Структура лидарного изображения ВВ определяется возмущениями, вносимыми ВВ в пространственное распределение ПГХ, которое зависит как от невозмущенных профилей ПГХ, так и от поля вертикальных смещений жидкости в ВВ. Поэтому алгоритм моделирования включает гидрооптическую и гидродинамическую части.

Гидродинамическая часть алгоритма включает: расчет глубинного профиля плотности воды $\rho(z)$ по измеренным профилям температуры и электропроводности; определение параметров пикноклина (с глубиной h и толщиной d), профиля частоты Вайсяля $N(z)$ и, после задания амплитуды, – частоты и номера моды ВВ, а также расчет поля вертикальных смещений жидкости $\zeta(x, z, t)$.

Гидрооптическая часть алгоритма предусматривает: определение показателей полного b , обратного b_b и малоуглового b_1 рассеяния и дисперсии индикатрисы малоуглового рассеяния $\langle \gamma^2 \rangle$ по измеренным профилям $c(z)$ с помощью корреляционных связей между различными ПГХ – формулы (4); расчет пространственного распределения ПГХ в поле ВВ по (3) в предположении о малости амплитуды ВВ по сравнению с вертикальным масштабом неоднородности поля $\zeta(x, z, t)$; расчет лидарного изображения ВВ по (2).

Алгоритм реализован в виде компьютерной программы в среде MATHCAD. Время счета отдельной реализации сигнала обратного рассеяния в зависимости от требуемой дискретизации по глубине и максимального значения глубины в конкретных расчетах составляло от нескольких минут до одного часа.

Результаты измерений и расчетов. Были проведены расчеты для 30 станций в Белом, Баренцевом и Карском морях, на которых измерялись профили температуры, солености и показателя ослабления.

На рис. 2, *а–ж* приведены примеры результатов моделирования лидарных изображений внутренних волн в виде линий уровня величины $L(x, z) = 10 \log P(x, z)$ (P – мощность эхо-сигнала, Вт) (справа), а также исходные данные – профили условной плотности воды, показателя ослабления света и температуры (слева) – для типичных станций в Белом, Баренцевом и Карском морях.

Ниже в таблице приведены параметры модели Грена для указанных станций.

Параметры модели Грена для выбранных станций, м

Станция, год	Пикноклин		ω/N_0
	глубина	толщина	
Белое море: № 10, 2010	9	6	0.8
№ 15, 2010	5	6	0.8
Баренцево море: № 1, 2006	40	10	0.87
№ 49, 2009	7	6	0.8
Карское море: № 59, 2010	12	4	0.75
№ 60, 2010	20	10	0.87
№ 68, 2010	11	8	0.84

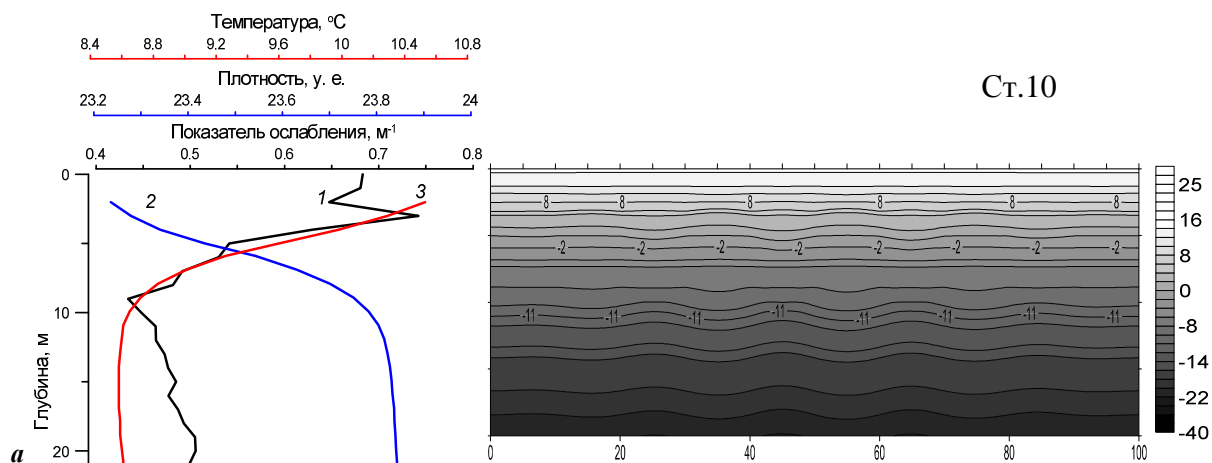
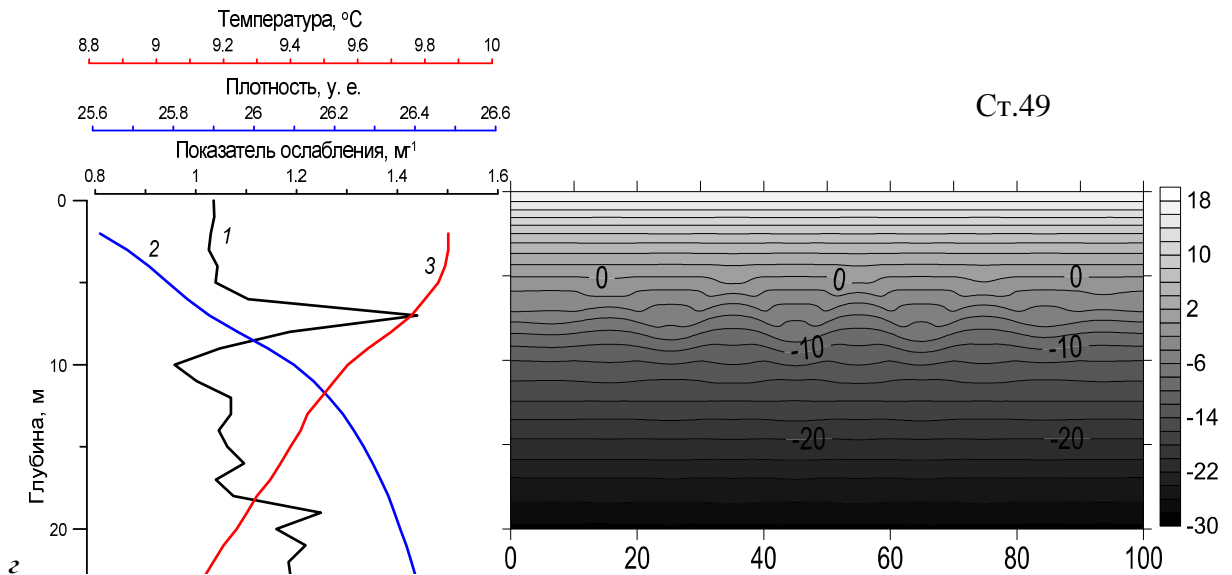
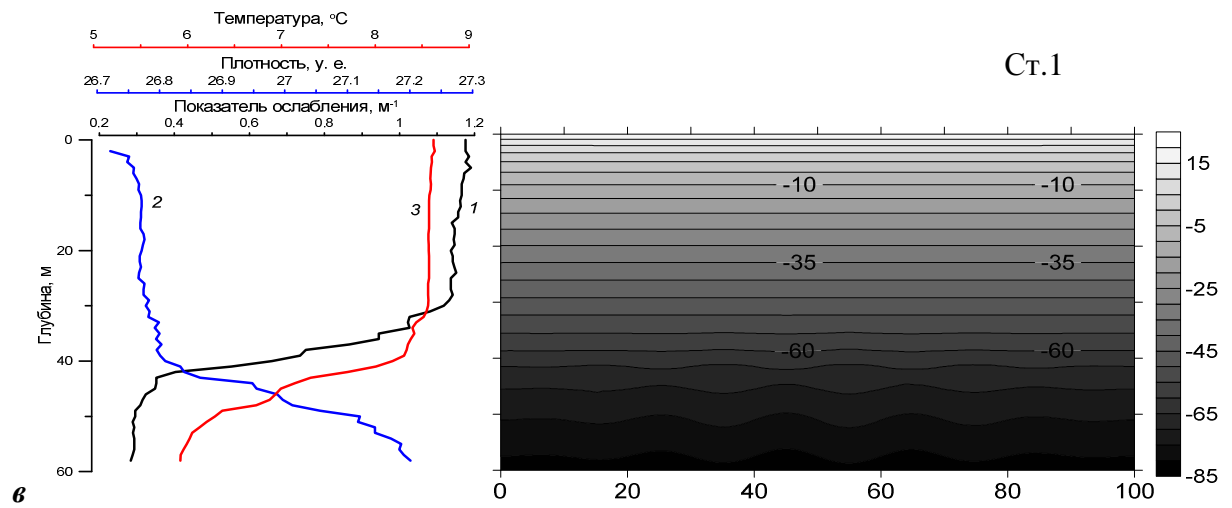
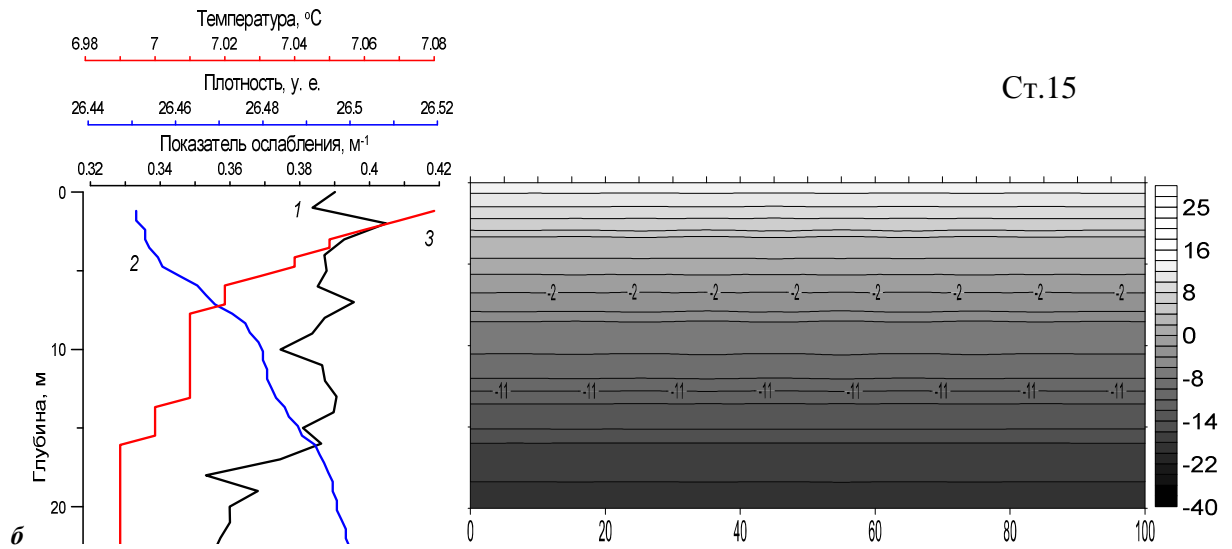


Рис. 2. Результаты моделирования лидарных изображений внутренних волн.

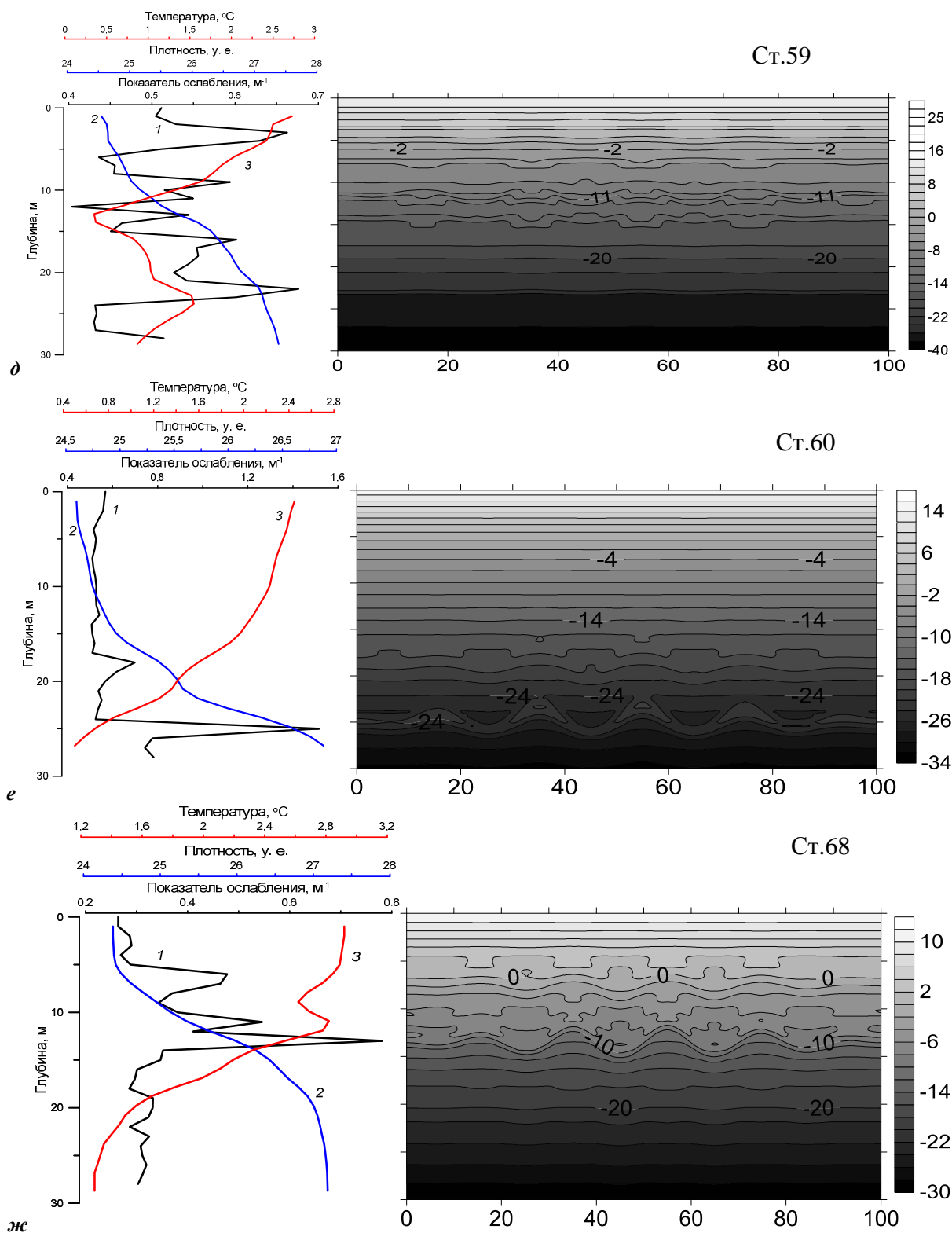
Слева – профили плотности, температуры, показателя ослабления, справа – соответствующие им результаты расчета лидарных изображений внутренних волн в виде линий уровня величины

$$L(x, z) = 10 \log P(x, z).$$

а, б – Белое море, *в, г* – Баренцево море, *д, е, ж* – Карское море.



Продолжение рис. 2.



Окончание рис. 2.

По результатам проведенных расчетов можно выделить несколько типовых случаев:

1. Распределение плотности имеет ярковыраженный скачок, а показатель ослабления мало меняется от поверхности до дна. Такая ситуация приведена на рис. 2, **б** (ст.15 в Белом море – показатель ослабления меняется от 0.4 м⁻¹ у поверхности до 0.36 м⁻¹ у дна).

В этом случае внутренние волны не проявляются в сигнале обратного рассеяния или проявляются очень слабо.

2. Распределения плотности и показателя ослабления имеют ярко выраженные скачки. Такая ситуация приведена на рис. 2, *а, в* (ст.10 в Белом море и ст.1 в Баренцевом). В этом случае ВВ проявляются в виде синусоидальных кривых в слое скачка и кривых в противофазе ниже слоя скачка.

3. Распределение плотности имеет ярко выраженный скачок, а в распределении показателя ослабления имеются отдельные ярко выраженные слои. Такие ситуации приведены на рис. 2, *г, д, е, ж* (ст.49 в Баренцевом море и ст.59, 60, 68 в Карском). В этом случае ВВ проявляются в эхо-сигнале наиболее сложным образом. Непосредственно в выделенном слое внутренние волны проявляются в виде синусоидальных структур, над слоем – в виде нерегулярных бочкообразных структур, ниже выделенного слоя – в виде синусоидальных структур, колеблющихся в противофазе. Наиболее сложная ситуация наблюдается на рис. 2, *д*, когда в распределении показателя ослабления имеется множество отдельных ярко выраженных слоев. Внутренние волны проявляются в виде сложных нерегулярных структур.

Проведенные расчеты показывают, что изображения ВВ в зависимости от распределения гидрофизических и гидрооптических параметров и их сочетания имеют достаточно сложную и разнообразную структуру. Можно также заключить, что приведенный метод и алгоритм моделирования изображений ВВ являются эффективным средством прогностических оценок возможностей лидарного наблюдения ВВ малой амплитуды в заданных районах и уточнения механизмов формирования изображений ВВ. Алгоритм и программа могут также послужить основой для разработки методов восстановления поля ВВ по его лидарному изображению.

*Автор выражает благодарность И.М. Левину за полезные советы и замечания.
Работа поддержана РФФИ, грант 10-05-00311а.*

Литература

1. Браво-Животовский Д.М., Долин Л.С. и др. Оптические методы диагностики океана. Лазерное зондирование // Дистанционные методы исследования океана. Горький: ИПФ АН СССР, 1987. С.84–125.
2. Dolina I.S., Dolin L.S., Levin I.M., Rodionov A.A. Diagnostic abilities of oceanic lidars // Proc. of the III Intern. Conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters» (ONW'2005). Eds. I.Levin, G.Gilbert. SPb.: D.S.Rozhdestvensky Optical Society, 2005. P.220–225.
3. 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 water. SPIE Proceedings. 2007. V.6615. 66150C. 10 p.
4. Dolin L.S., Dolina I.S., Savel'ev V.A. The model of lidar images of internal waves // Proc. IV Int. Conf. ONW. 2007. P.124–128.
5. Левин И.М., Долин Л.С., Французов О.Н. и др. Глубинные профили гидрофизических параметров в Баренцевом море применительно к проблеме лидарного зондирования // Сб. научн. тр. «Фундаментальная и прикладная гидрофизика. СПб.: Наука, 2009. № 4(7). С.16–24.
6. Левин И., Копелевич О. Корреляционные соотношения между первичными гидрооптическими характеристиками в спектральном диапазоне около 550 нм // Океанология, 2007. № 3. С.374–379.
7. Левин И.М., Родионов М.А., Французов О.Н. Погружаемый измеритель показателя ослабления света морской водой // Оптический журнал, 2011. № 5. С.59–63.

Статья поступила в редакцию 20.11.2011 г.

