

УДК 551.465

© М.А.Родионов<sup>1</sup>, И.С.Долина<sup>2</sup>, И.М.Левин<sup>1</sup>, 2012

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН

<sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
maxim\_rodionov@mail.ru

## КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМИ ПОКАЗАТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ СВЕТА И ПЛОТНОСТИ ВОДЫ В СЕВЕРНЫХ МОРЯХ

Приводятся данные измерений вертикальных распределений показателя ослабления света и плотности воды в Баренцевом, Белом и Карском морях и результаты анализа корреляционных связей между этими распределениями. Установлено, что в ряде случаев наблюдается высокая корреляция между параметрами функций, которые использовались для аппроксимации указанных распределений: горизонтом максимального изменения показателя ослабления и глубиной залегания пикноклина, толщиной пикноклина и слоя скачка показателя ослабления, а также между градиентом показателя ослабления и частотой Вэйсяля–Брента.

**Ключевые слова:** корреляции, глубинные профили, показатель ослабления, плотность воды.

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

В настоящее время для получения информации о пространственной изменчивости ПГХ получили широкое распространение методы дистанционного лазерного зондирования океана. В частности, эти методы удалось использовать для регистрации внутренних волн (ВВ) [1]. Проблема количественной оценки параметров ВВ лидарным методом исследовалась в работах [2, 3], где были предложены аналитические модели лидарных изображений внутренних волн и алгоритмы восстановления поля ВВ по этим изображениям, с использованием данных о невозмущенных профилях ПГХ и плотностной стратификации. Заметим, что сигнал обратного рассеяния океанического лидара зависит от вертикальных профилей нескольких ПГХ (показатели ослабления  $c$ , рассеяния  $b$ , обратного рассеяния  $b_b$ ). Однако для его расчета необходимо знать прежде всего вертикальный профиль показателя ослабления света  $c(z)$  на длине волны 550 нм, поскольку другие ПГХ с достаточно хорошей точностью могут быть определены по измеренной зависимости  $c(z)$  с помощью корреляционных соотношений [4].

Распределения по глубине  $z$  (вертикальные профили) гидрооптических и гидрологических характеристик (температура, соленость, плотность), вообще говоря, являются зависимыми, поскольку светорассеивающие свойства морской воды определяются в основном взвешенными органическими и минеральными веществами, а распределение взвеси по вертикали тесно связано с плотностью воды. В настоящей работе исследуются корреляционные связи между вертикальными распределениями показателя ослабления света  $c$  и плотности воды  $\rho$  по результатам измерений, проведенных в Баренцевом, Белом и Карском морях (частично эти результаты докладывались на конференциях [5, 6]). Как и в [5, 6], использовалась аппроксимация этих профилей аналитической функцией в

виде гиперболического тангенса и коэффициенты корреляции определялись между параметрами этих функций. Заметим, что именно эти аналитические функции и входят в модель лидарных изображений внутренних волн [3].

Наличие корреляционных связей между гидрооптическими и гидрологическими параметрами позволит использовать лидарные методы для определения характеристик плотностной стратификации: глубины залегания пикноклина, его характерной ширины и значения максимальной частоты Вьяйсяля–Брента.

Показатель ослабления света морской водой измерялся специально разработанным погружаемым прибором [7]. Для измерения гидрологических характеристик (температуры, электропроводности, давления) использовались аттестованные приборы как отечественного (ОЛД-1, «НПО Марс»), так и зарубежного (Seabird, FSI) производства. Плотность воды вычислялась по измеренным значениям температуры и электропроводности с помощью стандартной процедуры.

**Баренцево море.** На рис.1 сплошными линиями представлены примеры результатов измерений зависимости показателя ослабления и плотности воды от глубины в Баренцевом море, выполненных в июне–августе 2010 г. в районе с координатами ~68–69°с.ш. и ~39–44°в.д. Видно, что для всех представленных станций характерна ярковыраженная стратификация плотности и показателя ослабления, при этом между профилями  $\sigma(z)$  и  $c(z)$  существует корреляция (если не обращать внимание на некоторые тонкие слои мутности).

Аппроксимируем зависимости  $\sigma(z)$  и  $c(z)$  следующими функциями:

$$\begin{aligned}\sigma(z) &= \sigma_0 + \alpha_\sigma \operatorname{th}(\beta_\sigma(z - h_\sigma)), \\ c(z) &= c_0 - \alpha_c \operatorname{th}(\beta_c(z - h_c)),\end{aligned}\tag{1}$$

где  $\sigma(z) = (\rho - 1)1000$  – условная плотность.

Эти зависимости изображены на рис.1 штриховыми линиями. При подборе параметров аппроксимации мы добивались совпадения аппроксимирующих функций и реальных распределений в области их максимального изменения.

Корреляционная связь определялась между следующими параметрами: 1) горизонтами  $h_\sigma$  и  $h_c$ ; 2) характерной шириной  $l$  аппроксимирующих кривых (1), которая определялась по уровню  $\operatorname{th}x = 0.9$ , что соответствует формулам  $l_\sigma = 1.5/\beta_\sigma$ ,  $l_c = 1.5/\beta_c$ ; 3) частотой Вьяйсяля  $N = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}}$  и величиной, характеризующей градиент показателя ослабления  $(\alpha_c \beta_c)^{1/2}$ .

Облако значений параметров аппроксимирующих функций и линейные регрессии (сплошные линии) для Баренцева моря представлены на рис.2, а–в. Там же приведены значения коэффициентов корреляции. Измерения проводились в июне–августе 2006 г. на 14 станциях в южной части Баренцева моря в районе с координатами 69–71°с.ш. и 32–34°в.д.

Из рисунков видно, что высокая корреляция ( $k = 0.9$ ) достигается между горизонтом максимального изменения показателя ослабления и глубиной залегания пикноклина. Неплохая корреляция между шириной аппроксимирующих кривых (0.85), несколько хуже между параметром  $(\alpha_c \beta_c)^{1/2}$  и частотой Вьяйсяля (0.65).

**Белое море.** Работы велись в южной части Белого моря (Онежский залив) с 23 по 24 июня 2009 г. Измерения проводились в одной точке, через каждые полчаса – с 16.00 до 15.30 следующего дня. Полная глубина в районе измерений составляла 47–50 м. Примеры представлены на рис.3.

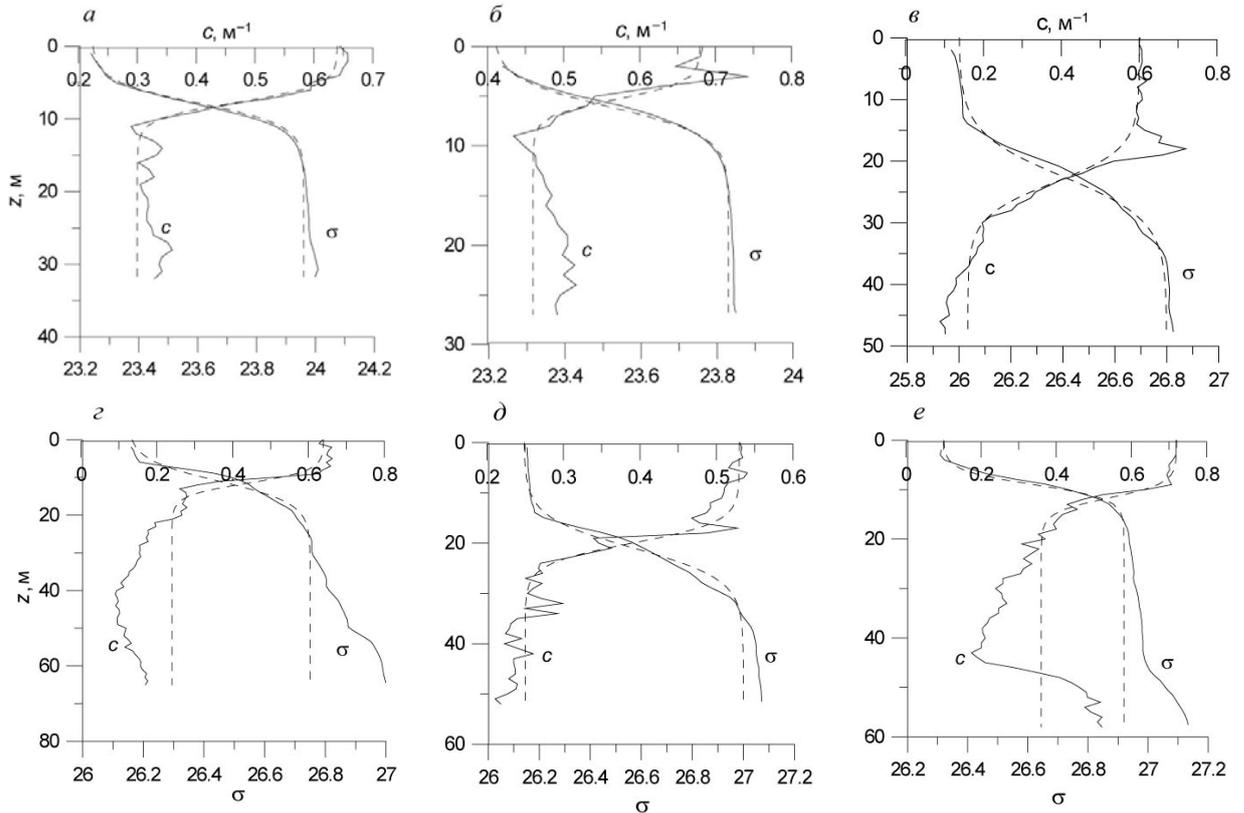


Рис.1. Зависимость показателя ослабления и плотности жидкости (сплошные линии) и их аппроксимации (штриховые линии) от глубины в Баренцевом море (2010).  
 а – ст.9, б – ст.10, в–д – ст.47, 48, 49 соответственно,  
 е – ст.52;  $\sigma(z) = (\rho - 1)1000$  – условная плотность.

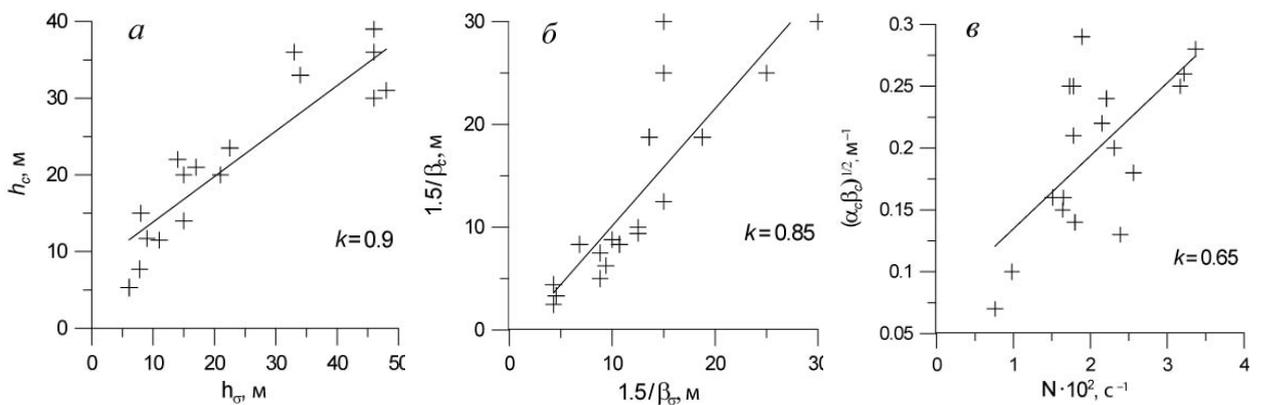


Рис.2. Корреляция между параметрами зависимостей  $\sigma(z)$  и  $c(z)$  в Баренцевом море.  
 Между: а – горизонтами  $h_\sigma$  и  $h_c$ ; б – характерной шириной аппроксимирующих кривых;  
 в – частотой Вэйсяля и параметром  $(\alpha_c \beta_c)^{1/2}$ .

Отличительная особенность измерений в Белом море заключается в возможности проследить изменения стратификации плотности воды и показателя ослабления света в зависимости от времени суток. Согласно полученным данным, во второй половине дня (с 16.00 до 20.00) в районе измерений существовал достаточно выраженный пикноклин и наблюдались профили  $c(z)$ , которые наряду с профилями  $\sigma(z)$  можно было аппроксимировать функциями вида (1) (см. рис.3, а). Результаты статистической обработки

данных, относящихся к этому временному интервалу, приведены на рис.4. Они указывают на высокую корреляцию между профилями  $\sigma(z)$  и  $c(z)$ .

В период времени с 21.00 регистрировались профили  $\sigma(z)$  и  $c(z)$ , которые в первом приближении можно было аппроксимировать линейными функциями (см. рис.3, б):  $\sigma(z) = \sigma_0 + az$ ,  $c(z) = c_0 - bz$ . Корреляция между параметрами  $a$  и  $b$  этих аппроксимаций (градиентами показателя ослабления и плотности жидкости) показана на рис.5. Уравнение регрессии имеет вид:  $b = 0.13a + 0.003$ , коэффициент корреляции составляет  $\sim 0.65$ , число измерений 35.

Как видно из рис.3, б, разрушение пикноклина сопровождалось ростом «изрезанности» вертикального распределения  $c(z)$ . Наличие тонкой структуры в профиле  $c(z)$  является одним из факторов, определяющих информативность лидарного метода зондирования океана: слои мутности с резкими границами хорошо проявляются в обратно рассеянном лидарном сигнале и повышают контрастность лидарных изображений внутренних волн. Поэтому при обработке профилей  $c(z)$  был выполнен расчет функции корреляции

$$R(z_v) = \frac{1}{N - \nu} \sum_{n=1}^{N-\nu} \delta c(z_n) \delta c(z_{n+\nu}), \quad (2)$$

относительных отклонений  $\delta c(z) = (c(z) - \bar{c}(z)) / \bar{c}(z)$ , показателя ослабления  $c(z)$  от среднего профиля  $\bar{c}(z)$ . Эта зависимость представлена на рис.6. В формуле (2) использованы обозначения  $z_n = n\Delta z$ ,  $z_\nu = \nu\Delta z$ ,  $\Delta z$  – интервал между отсчетами глубины,  $N$  – полное число отсчетов,  $n$  – номер отсчета,  $\nu$  – число отсчетов в заданном интервале глубин  $z_\nu$ . По максимальному значению функции (2) оценивалась дисперсия относительных флуктуаций показателя ослабления  $R(0)$ , а за характерную толщину слоя мутности  $\Delta z$  принималась ширина этой функции по уровню 01.

Сравнение кривых (рис.6) показывает, что в течение суток дисперсия относительных флуктуаций показателя ослабления менялась примерно в 3 раза, а характерная толщина слоев мутности – примерно в 5 раз. Одной из причин сильных изменений показателя ослабления могут быть приливы. Измеритель скорости течения с датчиком давления, установленный на дне в 1 км от судна, зарегистрировал полусуточные приливы с амплитудой около 0.5 м.

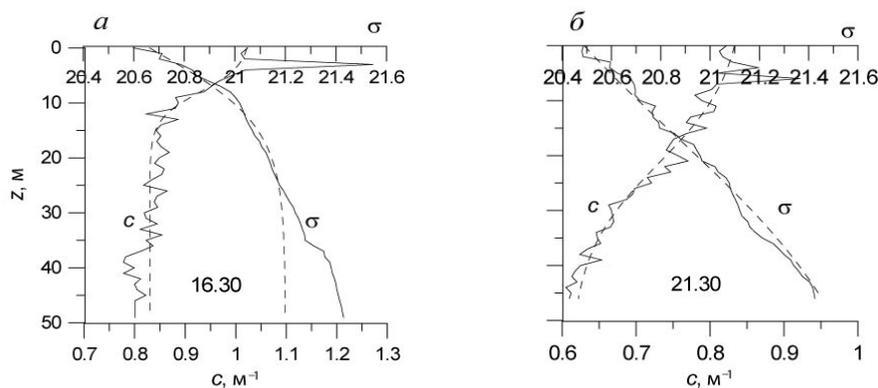


Рис.3. Зависимость показателя ослабления и плотности жидкости (сплошные линии) и их аппроксимации (штриховые линии) от глубины в Белом море:  
 а – стратификация  $\sigma(z)$  и  $c(z)$  вида функции (1), б – «линейная» стратификация  $\sigma(z)$  и  $c(z)$ .

**Карское море.** Измерения проводились в проливах Карские Ворота и Югорский Шар, у восточного побережья о-вов Вайгач и Южный архипелага Новая Земля с 11 по 23 августа 2010 г. Результаты измерений зависимости показателя ослабления, темпера-

туры и плотности жидкости на шести станциях в Карском море представлены на рис.7. Как видно из рисунков, в Карском море существует ярко выраженный мутный слой и аппроксимация функциями вида (1) вертикального распределения показателя ослабления невозможна.

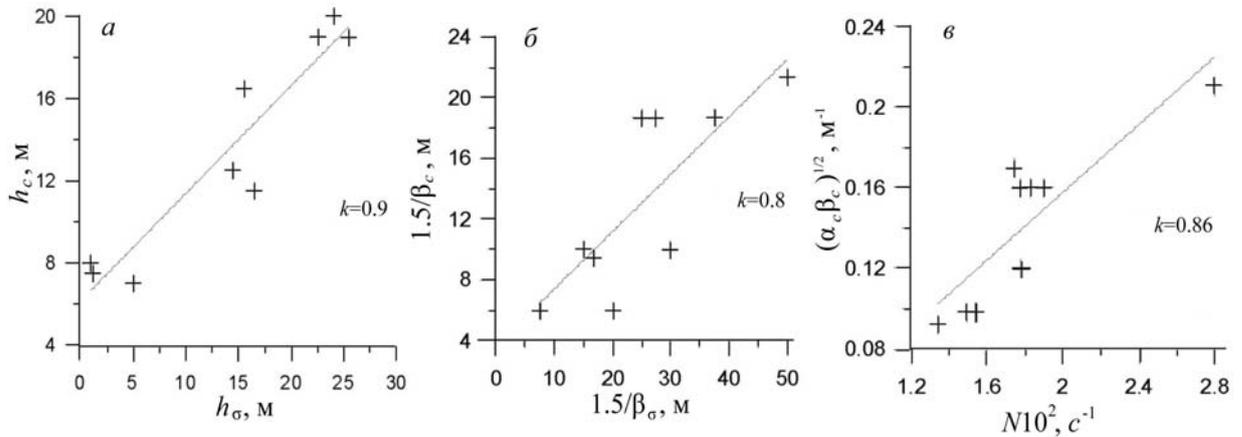


Рис.4. Корреляция между параметрами зависимостей  $\sigma(z)$  и  $c(z)$  в Белом море. *a* – между горизонтами  $h_\sigma$  и  $h_c$ , *б* – характерной шириной аппроксимирующих кривых, *в* – частотой Вайсяля и величиной  $(\alpha_c \beta_c)^{1/2}$ .

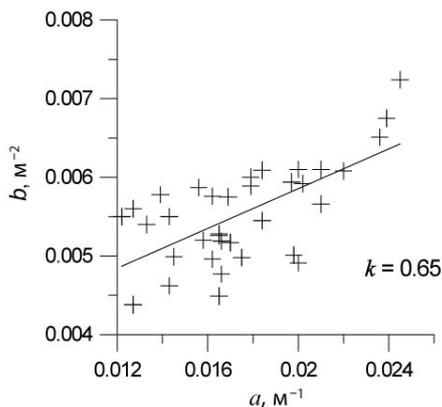


Рис.5. Корреляция между градиентами показателя ослабления и плотности жидкости в случае «линейной» стратификации  $\sigma(z)$  и  $c(z)$ .

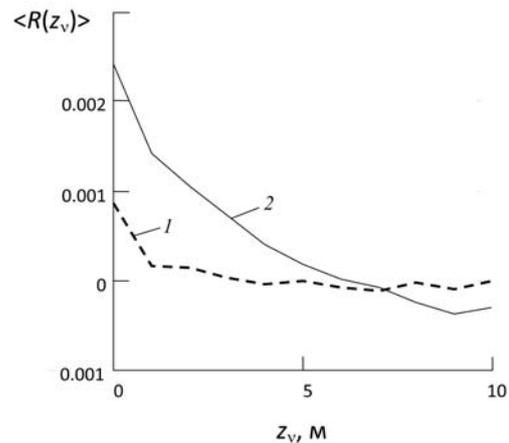


Рис.6. Функции корреляции относительных отклонений показателя ослабления от среднего профиля, усредненные по результатам шести зондирований. Кривые измерений: 1 – с 19.00 до 21.30 (23.06.09); 2 – с 2.00 до 4.30 (24.06.09).

Результаты анализа данных и линейные регрессии для Карского моря представлены на рис.8, где приведены результаты обработки измерений для 13 станций (55, 56–58, 60, 63–65, 68, 70, 74, 76, 79; ст.60 и 79 характеризуются наличием придонного слоя мутности). На рис.8, *a* показана зависимость между глубиной залегания слоев мутности ( $h_1$ ) и пикноклина ( $h_c$ ), а на рис.8, *б* – корреляция между максимумами показателя ослабления и частоты плавучести. Из рисунков видно, что обе корреляции достаточно высокие. Заметим, что этот результат находится в противоречии с утверждением [8], что величина максимума  $c$  не коррелирует с максимальной величиной градиента температуры.

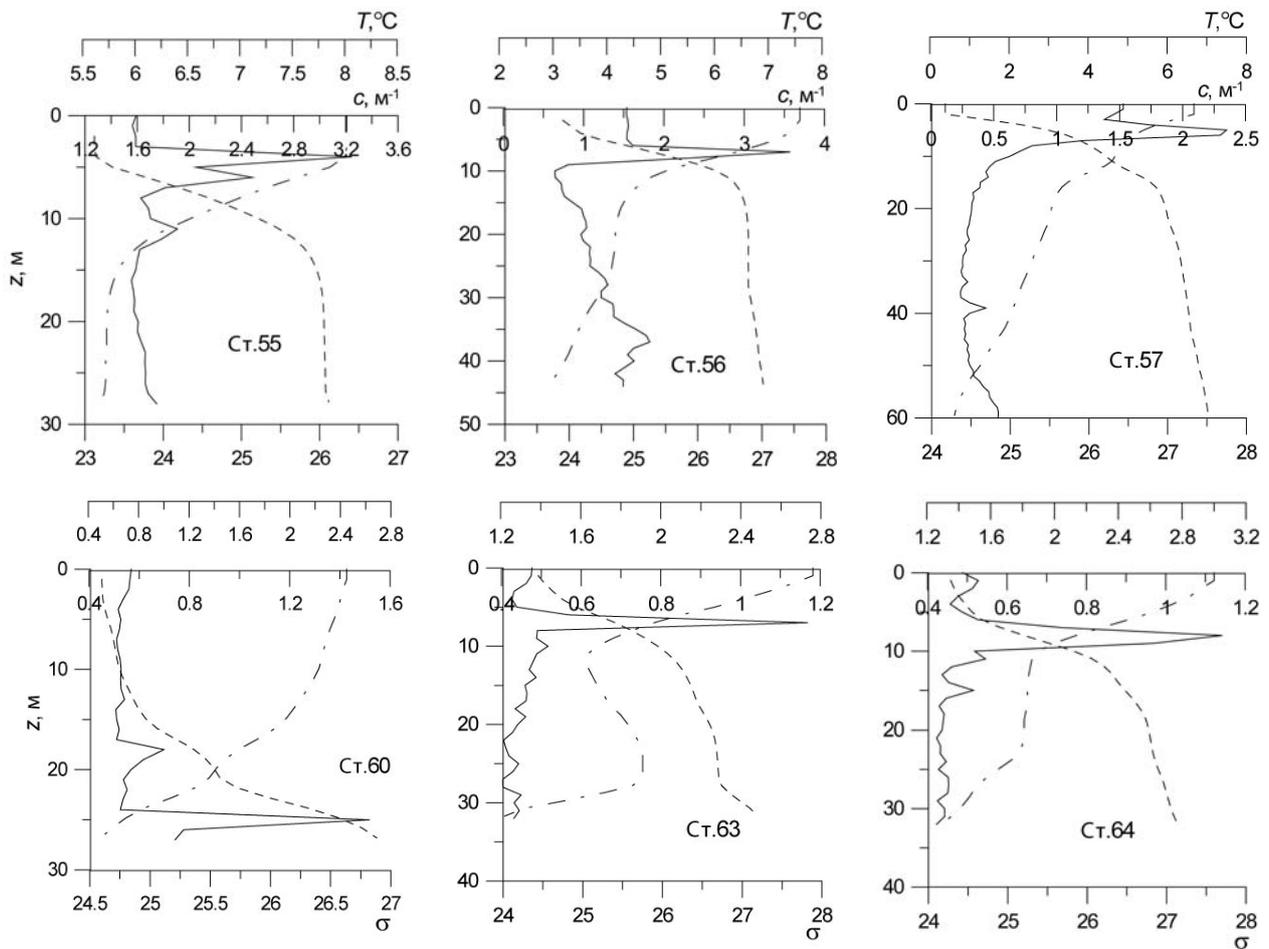


Рис.7. Зависимость показателя ослабления (сплошные линии), температуры (штрихпунктирные) и плотности жидкости (штриховые) от глубины в Карском море (2010 г.).

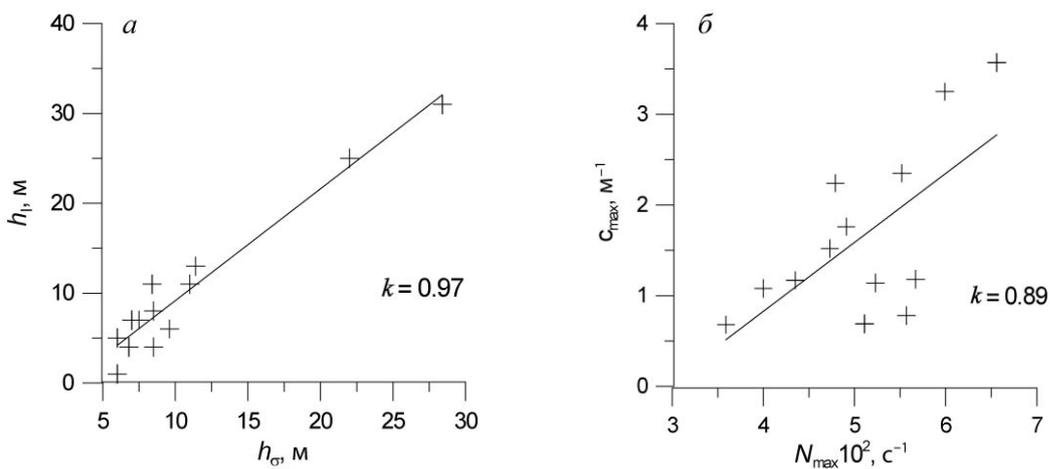


Рис.8. Корреляция между параметрами зависимостей  $\sigma(z)$  и  $c(z)$  в Карском море и горизонтами  $h_\sigma$  и  $h_l$  (а), максимальными значениями показателя ослабления и частоты Вайсяля (б).  
Прямые линии – линейные регрессии.

Был проведен также анализ корреляций непосредственно между профилями показателя ослабления и градиента плотности жидкости  $d\sigma/dz$  в Карском море. Было получено, что коэффициент корреляции изменяется в широких пределах (0.03–0.83). Заме-

тим, что коэффициент корреляции между профилями гораздо более чувствителен к их взаимному сдвигу, чем тот же коэффициент между параметрами профилей. На рис.9 представлены экспериментальные данные и линейные регрессии для двух станций (приведены значения коэффициентов корреляции).

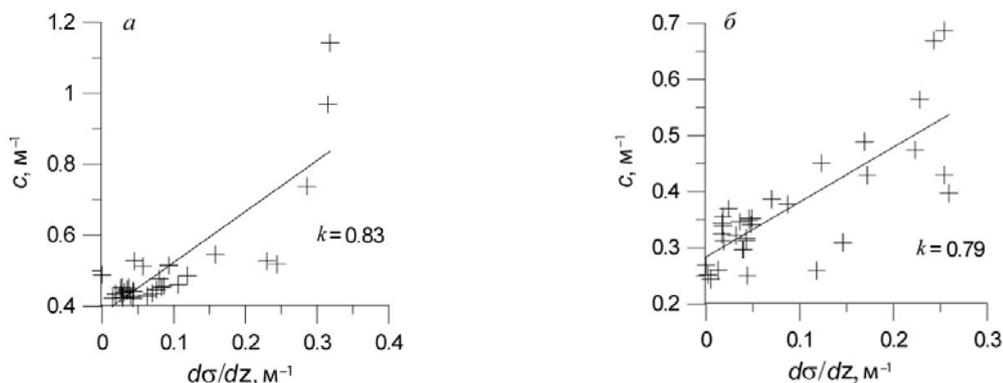


Рис.9. Корреляции между профилями показателя ослабления и градиентом плотности для ст.64 (а) и ст.74 (б).  
Сплошные линии – линейные регрессии.

\*\*\*

В статье показано, что при определенных условиях в целом ряде районов Мирового океана может существовать высокая корреляция между параметрами вертикальных распределений показателя ослабления света и плотности воды. По результатам наших измерений существенной разницы в уровнях коэффициентов корреляции в Баренцевом, Белом и Карском морях не обнаружено. Конечно, проведенных измерений недостаточно для полноценного анализа взаимосвязей между гидрооптическими и гидрологическими характеристиками в северных морях, и эти исследования будут продолжены.

Наличие высокой корреляции позволяет использовать лидарные методы для определения характеристик плотностной стратификации (профиль частоты Вьяйсяля–Брента), что создает предпосылки для дистанционного определения параметров пикноклина с помощью лидара.

По профилю частоты Вьяйсяля–Брента могут быть рассчитаны характеристики внутренних волн в данном районе (дисперсионные характеристики, структура мод). Знание этих характеристик необходимо при изучении динамики внутренних волн, а также для создания алгоритмов и методик восстановления полей внутренних волн по их лидарным изображениям, что имеет практическое значение для решения ряда задач прикладной гидрофизики, связанных с проектированием и эксплуатацией подводных аппаратов и шельфовых сооружений. Кроме того, результаты работы имеют практическую ценность для оперативного мониторинга экологического состояния морской среды.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 10-05-00311, 11-05-00384).*

## Литература

1. 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.
2. 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 Proc. 2007. V.6615. 66150C (10 pages).
3. Dolin L.S., Dolina I.S., Savel'ev V.A. The model of lidar images of internal waves // Proc. of IV Int. Conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters» (ONW'2007). Nizhny Novgorod. 2007. P.124–128.

4. Левин И.М., Копелевич О.В. Корреляционные связи между первичными гидрооптическими характеристиками в диапазоне 550 нм // Океанология. 2007. Т.47, № 3. С.344–348.
5. Долina И.С., Левин И.М., Родионов М.А. Корреляционные связи между показателем ослабления света и гидрологическими характеристиками в Баренцевом и Белом морях // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики (ГА-2010): Тр. 10-й Всерос. конф. СПб., 2010. С.295–298.
6. Rodionov M.A., Dolina I.S., Levin I.M. Correlations between depth distributions of water attenuation coefficient and density in the Barents and Kara Seas // Proc. of the VI Int. Conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters» (ONW'2011). St.-Petersburg, 2011. P.99–103.
7. Frantsuzov O.N., Levin I.M., Osadchy V.Yu., Rodionov M.A., Savchenko V.V., Radomyslskaya T.M., Gusarova S.P. A device for simultaneously measuring attenuation coefficient, temperature and salinity: measurements in the Barents and Black seas // Proc. IV Int. Conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters» (ONW'2007). Nizhny Novgorod. 2007. P.267–270.
8. Буренков В.И. Вертикальные распределения оптических характеристик // Оптика океана. Т.2. Прикладная оптика океана / Под ред. А.С.Монин. М.: Наука, 1983. С.65–83.

Статья поступила в редакцию 27.02.2012 г.

