

## Экспериментальное определение показателя ослабления лазерного излучения неоднородной морской водой по сигналам самолетного лидара

В.С. Шаманаев<sup>✉</sup>, А.А. Лисенко\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 29.06.2022 г.;  
после доработки 8.09.2022 г.;  
принята к печати 28.11.2022 г.

Представлены результаты экспериментального определения показателя ослабления лазерного излучения чистой и прибрежной морской водой из глубинного профиля мощности сигнала самолетного поляризационного лидара градиентным методом с использованием модели плоскостратифицированных однородных рассеивающих слоев. Глубинные профили сигналов были получены из синхронных измерений поляризованной и деполаризованной компонент лидаром «Макрель» с длиной волны излучения 532 нм. Приведены глубинные профили показателей ослабления лазерного излучения морской водой, восстановленные из компонент лидарного сигнала для двух серий измерений. Продемонстрировано их отличие, которое может достигать десятки процентов. Такой подход расширяет возможности дистанционного гидрооптического зондирования.

**Ключевые слова:** самолетный поляризационный лидар, показатель ослабления лазерного излучения, метод Монте-Карло; airborne polarization lidar, laser radiation extinction index, Monte Carlo method.

Исследования в области оптики морской воды имеют более чем полуторазековую историю. Долгое время показатель ослабления однородной водной толщи рассчитывался по глубине видения белого диска Секки. Методам и результатам определения показателя ослабления морской воды посвящено большое количество научных исследований, например, обобщающая работа [1]. В [2] вертикальные профили показателя ослабления света морской водой на длине волны 530 нм измерялись погружным прозрачномером ПУМ-200. Однако такие локальные методы измерений имеют много недостатков, связанных с возмущающим воздействием измерительной аппаратуры, влиянием Солнца, морского волнения, пены, отсутствием учета неоднородностей и т.д.

В последнее время гидрооптические самолетные лидары применяются для решения широкого круга задач: батиметрии [3–6], поиска рыбных косяков [7–9], обнаружения нефтяных пленок на морской поверхности [10, 11], оценки концентрации

планктона и гидрозолей в поверхностном слое океана [12, 13]. Лидары авиационного базирования все чаще используются для получения глубинных профилей оптических характеристик однородной водной массы [14–16]. Так, в работе [14] приводится обзор океанографических лидаров, которые позволяют получить характеристики однородной толщи воды до глубины 20–30 м, такие как показатели поглощения и обратного рассеяния лазерного излучения. В [15] профили полученных лидарных сигналов сравнивались с данными локальных измерений оптических характеристик водной толщи с борта судна. Коэффициенты поглощения и обратного рассеяния вместе с измеренной индикатрисой рассеяния использовались для построения модели идеального лидарного сигнала в приближении квазиоднократного рассеяния, свертка которого с реальным сигналом использовалась для анализа его временной зависимости. В [16] теоретически и экспериментально изучаются характерные особенности гидрооптических сигналов поляризационного самолетного лидара при зондировании однородной водной толщи. Это позволяет анализировать пространственно-временную структуру водной толщи, определять глубину подповерхностного слоя перемешива-

\* Виталий Сергеевич Шаманаев (shvs@iao.ru); Андрей Александрович Лисенко (lisenko@iao.ru)

ния и проводить классификацию вод по типу, что играет важную роль в изучении океана, климатологии, гидробиологии и решении фундаментальных и прикладных задач.

В работе [17] на основе анализа результатов, полученных в замкнутом численном эксперименте методом Монте-Карло, нами был предложен и обоснован градиентный метод определения показателя ослабления  $c_{\text{las}}$  лидарных сигналов чистой и прибрежной морской водой в приповерхностном слое. Сущность предложенного градиентного метода заключается в выделении однородных рассеивающих слоев, границы которых  $h_i$  совпадают с точками перегиба на глубинном профиле мощности лидарного сигнала. В каждом таком  $i$ -м слое показатель ослабления полагался постоянным и вычислялся по формуле логарифмической производной

$$c_{\text{ilas}}(h) = \frac{\ln[P(h_i)/P(h_{i-1})]}{2(h_i - h_{i-1})}, \quad i = 2, \dots, N, \quad (1)$$

где  $P(h_i)$  — мощность лидарного сигнала с глубины  $h_i$ ;  $N$  — количество однородных слоев. Присутствие таких тонких горизонтальных однородных рассеивающих слоев толщиной 2–10 м в подповерхностном слое было отмечено также в [18].

В продолжение наших исследований, начатых в [17], в настоящей работе мы применили опробованный на модельных лидарных сигналах градиентный метод для обработки экспериментальных данных, полученных с помощью самолетного поляризационного лидара «Макрель» [19]. Параметры лидара приведены в табл. 1. При восстановлении показателя ослабления лазерного излучения неоднородной морской водой границы плоскостратифицированных однородных рассеивающих слоев определялись по экспериментальным глубинным профилям сигналов данного лидара.

Таблица 1

Характеристики лидара «Макрель»

| Параметры                                              | Значение           |
|--------------------------------------------------------|--------------------|
| Длина волны, нм                                        | 532                |
| Энергия импульса, мДж                                  | 50                 |
| Длительность импульса (разрешение в воде 0,8 м), нс    | 7                  |
| Частота вспышек (горизонтальное разрешение до 4 м), Гц | до 25              |
| Диаметр приемного телескопа, м                         | 0,15               |
| Угол поля зрения, мрад                                 | до 13              |
| Ширина полосы пропускания фильтра, нм                  | 1,5                |
| Аналогово-цифровой преобразователь                     | Tektronix TDS3032B |
| Интервал квантования, нс                               | 1                  |
| Высота полета, м                                       | 200–400            |
| Глубина зондирования воды, м                           | до 30              |

На рис. 1 приведены глубинные профили мощности поляризованной компоненты лидарного сиг-

нала, полученные при полетах над акваторией Баренцева моря, размерами  $50 \times 50 \text{ км}^2$  с центром  $72^\circ 20' \text{ с.ш.}$ ,  $22^\circ 00' \text{ в.д.}$  в осенний период 1993 г. Соответствующие значения показателя ослабления, рассчитанные по формуле (1), представлены на рис. 2.

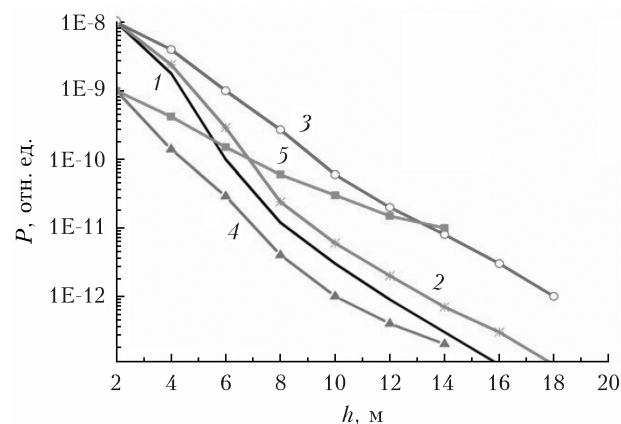


Рис. 1. Глубинные профили мощности сигналов самолетного лидара «Макрель» [19] ( $\lambda = 532 \text{ нм}$ ), измеренные на высоте 200 (кривые 1–3) и 600 м (кривые 4 и 5); углы поля зрения лидара 6' (кривые 1 и 4), 12' (кривые 2 и 5) и 40' (кривая 3)

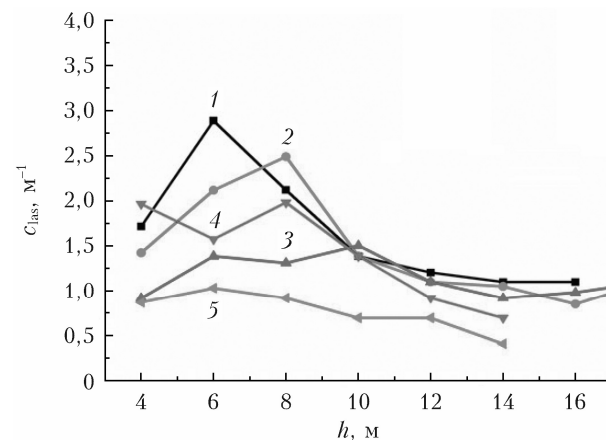


Рис. 2. Профили показателя ослабления лидарного сигнала, оцененные градиентным методом с использованием формулы (1); обозначения кривых см. на рис. 1

Видно, что для данной серии измерений  $c_{\text{las}}$  лежит в интервале от 0,4 (характерно для типа вод P04 по классификации Петцольда [20]) до  $2,8 \text{ м}^{-1}$  (для типа вод P07). При этом для первых трех лидарных сигналов прослеживается увеличение показателя ослабления на глубинах 6–8 м, что может быть обусловлено наличием планктона.

На рис. 3, 4 приведены глубинные профили поляризованной  $P_{\parallel}(h)$  и деполаризованной  $P_{\perp}(h)$  компонент мощности лидарного сигнала. Для анализа поляризации использовался двухканальный аналого-цифровой преобразователь с шагом квантования 25 нс и разрядностью 6. Полеты выполнялись

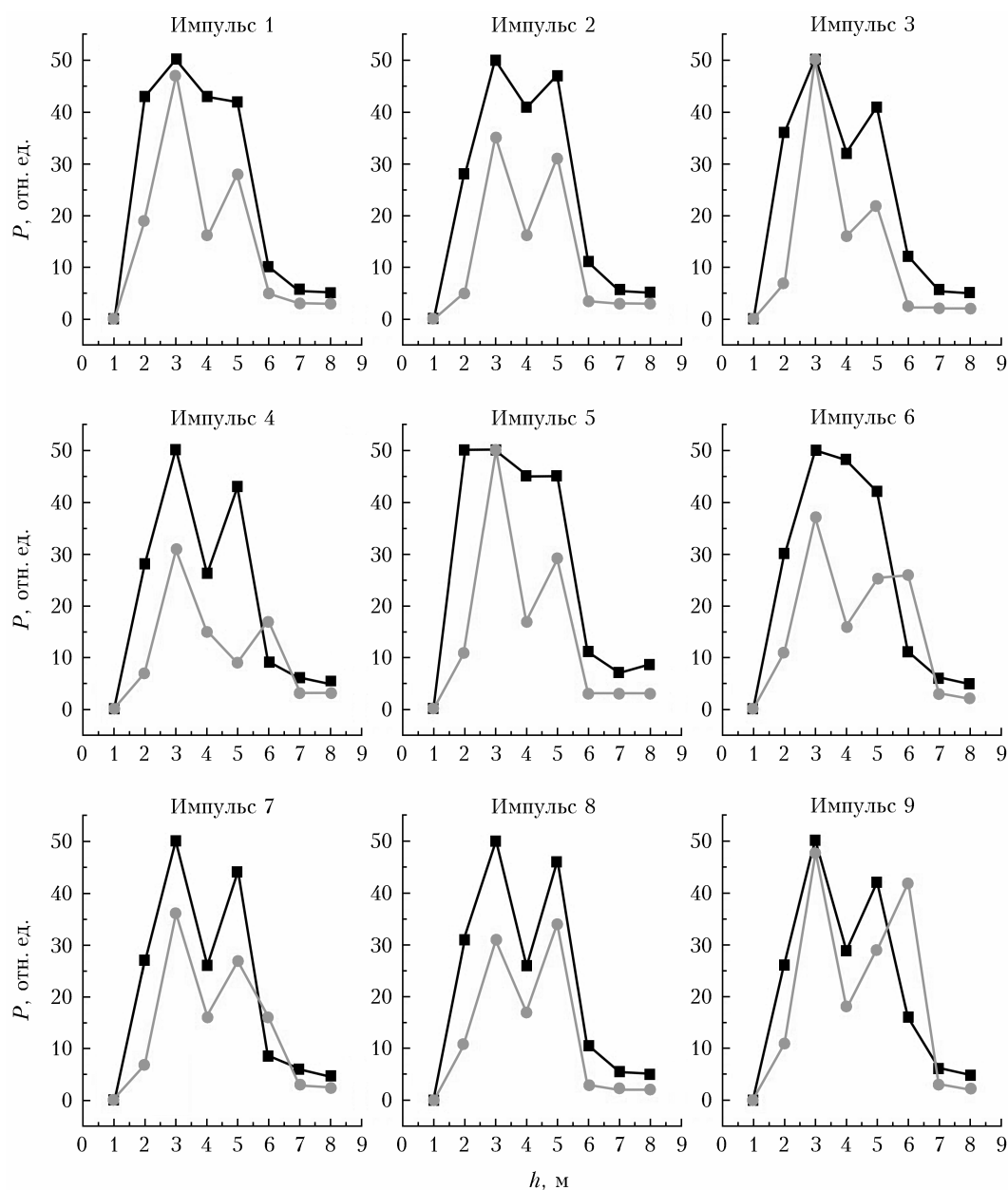


Рис. 3. Серия из девяти последовательных импульсов эхосигналов самолетного лидара «Макрель»: поляризованная (квадраты) и деполаризованная (точки) компоненты сигнала, угол поля зрения лидара 13 мрад, скорость полета 90 м/с, частота вспышек лазера 1 Гц

летом 1985 г. над мелководьем Каспийского моря на самолете-лаборатории ИЛ-18ДОРР с лидаром «Макрель» [19] на борту. Район полетов – Туркменский залив, приблизительно 120 км к югу от г. Туркменбаши (40°01' с.ш., 52°58' в.д.), вдоль параллели от побережья до о-ва Огурчинский (39°06' с.ш., 53°06' в.д.). Длина маршрута – 70 км, высота полета – 200 м. Два пролета выполнялись по одному маршруту, но в разных направлениях: к острову от берега (рис. 3) и обратно (рис. 4). Представлена последовательность эхосигналов в полном угле поля зрения 13 мрад. Они получены с час-

тотой следования 1 Гц при скорости полета 90 м/с (320 км/ч). При этом рис. 4 иллюстрирует полет обратным галсом с теневой диафрагмой, введенной в поле зрения лидара, которая экранирует аксиальную часть поля зрения приемного телескопа с раскрывом 3 мрад. Полный угол поля зрения остался прежним, т.е. 13 мрад.

Показатели ослабления поляризованной и деполаризованной компонент лидарного сигнала, рассчитанные по формуле (1) для двух серий измерений глубинных профилей мощности лидарного сигнала, представлены в табл. 2–5, где  $h_{2ref}$

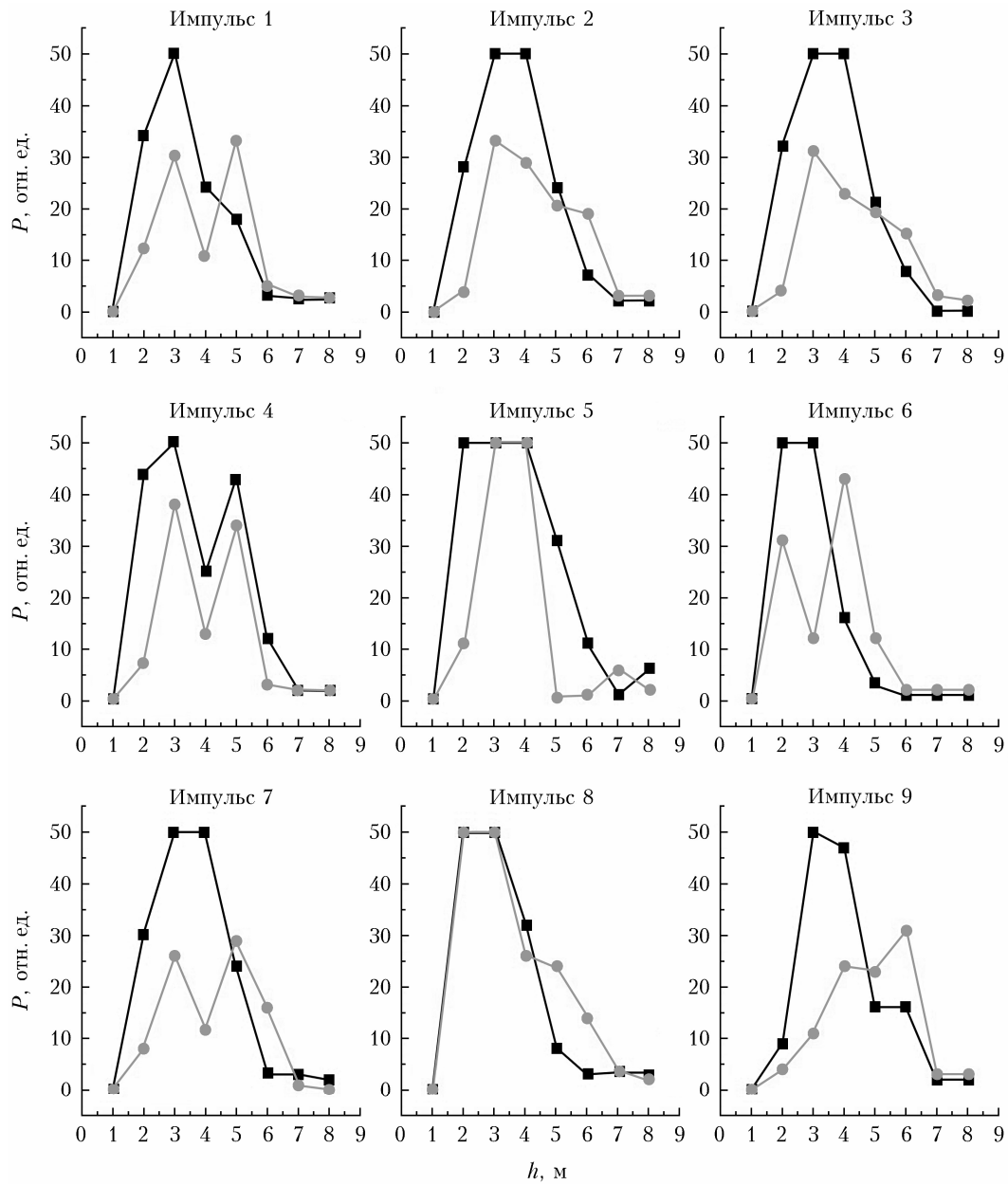


Рис. 4. Серия из девяти последовательных лидарных импульсов при введенной теневой диафрагме, отсекающей аксиальное поле зрения 3 мрад. Обозначения см. на рис. 3

и  $h_{\text{ref}}$  — конечная и начальная глубины однородного участка воды.

Анализируя полученные результаты, видим, что показатель ослабления деполаризованной компоненты в сериях из девяти измерений отличается от соответствующего показателя ослабления поляризованной компоненты. Превышение показателя ослабления деполаризованной компоненты наблюдалось для 11 выделенных однородных слоев. Количественная оценка превышения, усредненная по девяти импульсам серии  $\overline{\delta c_{\text{las}\perp}}$ , производилась по формуле

$$\overline{\delta c_{\text{las}\perp}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta c_{\text{las}\perp}(h_i) \cdot 100\% =$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{c_{\text{las}\perp}(h_i) - c_{\text{las}\parallel}(h_i)}{c_{\text{las}\perp}(h_i)} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Получено, что  $\overline{\delta c_{\text{las}\perp}} = 29,4\%$ ,  $\overline{\delta c_{\text{las}\perp \min}} = 4,9\%$  и  $\overline{\delta c_{\text{las}\perp \max}} = 77,1\%$ .

Для 11 выделенных однородных слоев наблюдалось превышение показателя ослабления

Таблица 2

Показатели ослабления поляризованной компоненты  
лидарных сигналов (см. рис. 3)

| Номер<br>импульса | Показатель                   |                              |                                                                         |                                              |
|-------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                   | $h_{1\text{ref}}, \text{ м}$ | $h_{2\text{ref}}, \text{ м}$ | $\frac{P_{\parallel}(h_{2\text{ref}})}{P_{\parallel}(h_{1\text{ref}})}$ | $c_{\text{las}\parallel}(h), \text{ м}^{-1}$ |
| 1                 | 8,4                          | 11,2                         | 0,86                                                                    | 0,21                                         |
|                   | 11,2                         | 14,0                         | 0,98                                                                    | 0,03                                         |
|                   | 14,0                         | 16,8                         | 0,24                                                                    | 2,01                                         |
|                   | 16,8                         | 19,6                         | 0,55                                                                    | 0,84                                         |
|                   | 19,6                         | 22,4                         | 0,91                                                                    | 0,13                                         |
| 2                 | 8,4                          | 11,2                         | 0,52                                                                    | 0,92                                         |
|                   | 14,0                         | 16,8                         | 0,21                                                                    | 2,19                                         |
|                   | 16,8                         | 19,6                         | 0,67                                                                    | 0,57                                         |
|                   | 19,6                         | 22,4                         | 0,83                                                                    | 0,26                                         |
| 3                 | 8,4                          | 11,2                         | 0,52                                                                    | 0,92                                         |
|                   | 14,0                         | 16,8                         | 0,19                                                                    | 2,30                                         |
|                   | 16,8                         | 19,6                         | 0,71                                                                    | 0,49                                         |
|                   | 19,6                         | 22,4                         | 0,75                                                                    | 0,40                                         |
| 4                 | 8,4                          | 11,2                         | 0,82                                                                    | 0,28                                         |
|                   | 14,0                         | 16,8                         | 0,23                                                                    | 2,03                                         |
|                   | 16,8                         | 19,6                         | 0,50                                                                    | 0,97                                         |
|                   | 19,6                         | 22,4                         | 0,91                                                                    | 0,13                                         |
| 5                 | 8,4                          | 11,2                         | 0,90                                                                    | 0,15                                         |
|                   | 14,0                         | 16,8                         | 0,24                                                                    | 1,97                                         |
|                   | 16,8                         | 19,6                         | 0,64                                                                    | 0,63                                         |
| 6                 | 8,4                          | 11,2                         | 0,52                                                                    | 0,92                                         |
|                   | 14,0                         | 16,8                         | 0,23                                                                    | 2,07                                         |
|                   | 16,8                         | 19,6                         | 0,52                                                                    | 0,91                                         |
|                   | 19,6                         | 22,4                         | 0,91                                                                    | 0,13                                         |
| 7                 | 8,4                          | 11,2                         | 0,64                                                                    | 0,62                                         |
|                   | 14,0                         | 16,8                         | 0,29                                                                    | 1,72                                         |
|                   | 16,8                         | 19,6                         | 0,46                                                                    | 1,09                                         |
|                   | 19,6                         | 22,4                         | 0,91                                                                    | 0,13                                         |
| 8                 | 8,4                          | 11,2                         | 0,96                                                                    | 0,06                                         |
|                   | 11,2                         | 14,0                         | 0,88                                                                    | 0,19                                         |
|                   | 14,0                         | 16,8                         | 0,26                                                                    | 1,88                                         |
|                   | 16,8                         | 19,6                         | 0,55                                                                    | 0,85                                         |
|                   | 19,6                         | 22,4                         | 0,83                                                                    | 0,26                                         |
| 9                 | 8,4                          | 11,2                         | 0,58                                                                    | 0,76                                         |
|                   | 14,0                         | 16,8                         | 0,38                                                                    | 1,35                                         |
|                   | 16,8                         | 19,6                         | 0,38                                                                    | 1,37                                         |
|                   | 19,6                         | 22,4                         | 0,83                                                                    | 0,26                                         |

поляризованной компоненты. Количественная оценка превышения, усредненная по девяти импульсам серии  $\overline{\delta c_{\text{las}\parallel}}$ , производилась по формуле

$$\begin{aligned} \overline{\delta c_{\text{las}\parallel}} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta c_{\text{las}\parallel}(h_i) \cdot 100\% = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{c_{\text{las}\parallel}(h_i) - c_{\text{las}\perp}(h_i)}{c_{\text{las}\parallel}(h_i)} \cdot 100\%. \end{aligned} \quad (3)$$

Таблица 3

Показатели ослабления поляризованной компоненты  
лидарных сигналов (см. рис. 4)

| Номер<br>импульса | Показатель                   |                              |                                                                         |                                              |
|-------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                   | $h_{1\text{ref}}, \text{ м}$ | $h_{2\text{ref}}, \text{ м}$ | $\frac{P_{\parallel}(h_{2\text{ref}})}{P_{\parallel}(h_{1\text{ref}})}$ | $c_{\text{las}\parallel}(h), \text{ м}^{-1}$ |
| 1                 | 8,4                          | 11,2                         | 0,48                                                                    | 1,03                                         |
|                   | 11,2                         | 14,0                         | 0,75                                                                    | 0,40                                         |
|                   | 14,0                         | 16,8                         | 0,17                                                                    | 2,51                                         |
|                   | 16,8                         | 19,6                         | 0,83                                                                    | 0,26                                         |
| 2                 | 11,2                         | 14,0                         | 0,48                                                                    | 1,03                                         |
|                   | 14,0                         | 16,8                         | 0,29                                                                    | 1,73                                         |
|                   | 16,8                         | 19,6                         | 0,30                                                                    | 1,75                                         |
| 3                 | 11,2                         | 14,0                         | 0,42                                                                    | 1,21                                         |
|                   | 14,0                         | 16,8                         | 0,38                                                                    | 1,35                                         |
|                   | 16,8                         | 19,6                         | 0,06                                                                    | 3,88                                         |
| 4                 | 8,4                          | 11,2                         | 0,50                                                                    | 0,97                                         |
|                   | 11,2                         | 14,0                         | 0,28                                                                    | 1,79                                         |
|                   | 14,0                         | 16,8                         | 0,17                                                                    | 2,51                                         |
| 5                 | 8,4                          | 11,2                         | 0,62                                                                    | 0,67                                         |
|                   | 14,0                         | 16,8                         | 0,35                                                                    | 1,45                                         |
|                   | 16,8                         | 19,6                         | 0,09                                                                    | 3,36                                         |
| 6                 | 11,2                         | 14,0                         | 0,32                                                                    | 1,60                                         |
|                   | 14,0                         | 16,8                         | 0,19                                                                    | 2,34                                         |
|                   | 16,8                         | 19,6                         | 0,33                                                                    | 1,54                                         |
| 7                 | 11,2                         | 14,0                         | 0,48                                                                    | 1,03                                         |
|                   | 14,0                         | 16,8                         | 0,13                                                                    | 2,91                                         |
|                   | 19,6                         | 22,4                         | 0,67                                                                    | 0,57                                         |
| 8                 | 8,4                          | 11,2                         | 0,64                                                                    | 0,62                                         |
|                   | 11,2                         | 14,0                         | 0,25                                                                    | 1,94                                         |
|                   | 14,0                         | 16,8                         | 0,38                                                                    | 1,37                                         |
|                   | 19,6                         | 22,4                         | 0,86                                                                    | 0,22                                         |
| 9                 | 8,4                          | 11,2                         | 0,94                                                                    | 0,09                                         |
|                   | 11,2                         | 14,0                         | 0,34                                                                    | 1,51                                         |
|                   | 16,8                         | 19,6                         | 0,13                                                                    | 2,91                                         |

Расчеты показали, что  $\overline{\delta c_{\text{las}\parallel}} = 72,6\%$ ,  $\overline{\delta c_{\text{las}\perp \min}} = 42\%$  и  $\overline{\delta c_{\text{las}\parallel \max}} = 99\%$ .

Во второй серии измерений с теневой диафрагмой было выделено 25 однородных слоев, причем для 21 слоя  $\overline{\delta c_{\text{las}\perp}} > \overline{\delta c_{\text{las}\parallel}}$ . Вычислено, что для этих слоев  $\overline{\delta c_{\text{las}\perp}} = 52,7\%$ ,  $\overline{\delta c_{\text{las}\perp \min}} = 16,6\%$  и  $\overline{\delta c_{\text{las}\perp \max}} = 92\%$ ; для четырех слоев  $\overline{\delta c_{\text{las}\parallel}} = 10,2\%$ ,  $\overline{\delta c_{\text{las}\parallel \min}} = 14,2\%$  и  $\overline{\delta c_{\text{las}\parallel \max}} = 61\%$ .

Доказано, что показатели ослабления поляризованной и деполаризованной компонент лидарного сигнала морской водой отличаются, причем различие может достигать десятков процентов. При этом в серии измерений с теневой диафрагмой наблюдается систематическое превышение показателя ослабления деполаризованной компоненты:  $\overline{\delta c_{\text{las}\perp}} > \overline{\delta c_{\text{las}\parallel}}$ .

Интерпретация данного результата в настоящее время затруднительна, необходимы дальнейшие исследования, в том числе численными методами.

Таблица 4

Показатели ослабления деполяризованной компоненты лидарных сигналов (см. рис. 3)

| Номер импульса | Показатель                  |                              |                                                                |                                             |
|----------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
|                | $h_{\text{ref}}, \text{ м}$ | $h_{2\text{ref}}, \text{ м}$ | $\frac{P_{\perp}(h_{2\text{ref}})}{P_{\perp}(h_{\text{ref}})}$ | $c_{\text{last } \perp}(h), \text{ м}^{-1}$ |
| 1              | 8,4                         | 11,2                         | 0,34                                                           | 8,4                                         |
|                | 14,0                        | 16,8                         | 0,18                                                           | 14,0                                        |
|                | 16,8                        | 19,6                         | 0,60                                                           | 16,8                                        |
| 2              | 8,4                         | 11,2                         | 0,46                                                           | 1,10                                        |
|                | 14,0                        | 16,8                         | 0,11                                                           | 3,05                                        |
|                | 16,8                        | 19,6                         | 0,86                                                           | 0,22                                        |
| 3              | 8,4                         | 11,2                         | 0,32                                                           | 1,60                                        |
|                | 14,0                        | 16,8                         | 0,11                                                           | 3,04                                        |
|                | 16,8                        | 19,6                         | 0,80                                                           | 0,31                                        |
| 4              | 8,4                         | 11,2                         | 0,48                                                           | 1,02                                        |
|                | 11,2                        | 14,0                         | 0,60                                                           | 0,72                                        |
|                | 16,8                        | 19,6                         | 0,18                                                           | 2,43                                        |
| 5              | 8,4                         | 11,2                         | 0,34                                                           | 1,51                                        |
|                | 14,0                        | 16,8                         | 0,10                                                           | 3,18                                        |
| 6              | 8,4                         | 11,2                         | 0,43                                                           | 1,17                                        |
|                | 16,8                        | 19,6                         | 0,12                                                           | 3,02                                        |
|                | 19,6                        | 22,4                         | 0,67                                                           | 0,57                                        |
| 7              | 8,4                         | 11,2                         | 0,44                                                           | 1,14                                        |
|                | 14,0                        | 16,8                         | 0,59                                                           | 0,73                                        |
|                | 16,8                        | 19,6                         | 0,19                                                           | 2,34                                        |
|                | 19,6                        | 22,4                         | 0,83                                                           | 0,26                                        |
| 8              | 8,4                         | 11,2                         | 0,55                                                           | 0,84                                        |
|                | 14,0                        | 16,8                         | 0,09                                                           | 3,40                                        |
|                | 16,8                        | 19,6                         | 0,67                                                           | 0,57                                        |
| 9              | 8,4                         | 11,2                         | 0,38                                                           | 1,37                                        |
|                | 16,8                        | 19,6                         | 0,07                                                           | 3,69                                        |
|                | 19,6                        | 22,4                         | 0,67                                                           | 0,57                                        |

Таблица 5

Показатели ослабления деполяризованной компоненты лидарных сигналов (см. рис. 4)

| Номер импульса | Показатель                  |                              |                                                                |                                             |
|----------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
|                | $h_{\text{ref}}, \text{ м}$ | $h_{2\text{ref}}, \text{ м}$ | $\frac{P_{\perp}(h_{2\text{ref}})}{P_{\perp}(h_{\text{ref}})}$ | $c_{\text{last } \perp}(h), \text{ м}^{-1}$ |
| 1              | 2                           | 3                            | 4                                                              | 5                                           |
| 1              | 8,4                         | 11,2                         | 0,35                                                           | 1,47                                        |
|                | 14,0                        | 16,8                         | 0,15                                                           | 2,64                                        |
|                | 16,8                        | 19,6                         | 0,60                                                           | 0,72                                        |
| 2              | 8,4                         | 11,2                         | 0,88                                                           | 0,18                                        |
|                | 11,2                        | 14,0                         | 0,71                                                           | 0,49                                        |
|                | 14,0                        | 16,8                         | 0,93                                                           | 0,11                                        |
|                | 16,8                        | 19,6                         | 0,16                                                           | 2,58                                        |

|   |      |      |      |      |
|---|------|------|------|------|
| 1 | 2    | 3    | 4    | 5    |
| 3 | 8,4  | 11,2 | 0,74 | 0,42 |
|   | 11,2 | 14,0 | 0,83 | 0,27 |
|   | 14,0 | 16,8 | 0,79 | 0,33 |
|   | 16,8 | 19,6 | 0,20 | 2,25 |
| 4 | 19,6 | 22,4 | 0,67 | 0,57 |
|   | 8,4  | 11,2 | 0,34 | 1,50 |
|   | 14,0 | 16,8 | 0,09 | 3,40 |
|   | 16,8 | 19,6 | 0,67 | 0,57 |
| 5 | 11,2 | 14,0 | 0,01 | 6,45 |
|   | 16,8 | 19,6 | 0,33 | 1,54 |
| 6 | 5,6  | 8,4  | 0,39 | 1,33 |
|   | 11,2 | 14,0 | 0,28 | 1,79 |
|   | 14,0 | 16,8 | 0,17 | 2,51 |
| 7 | 8,4  | 11,2 | 0,46 | 1,08 |
|   | 14,0 | 16,8 | 0,55 | 0,83 |
|   | 16,8 | 19,6 | 0,06 | 3,88 |
| 8 | 8,4  | 11,2 | 0,52 | 0,92 |
|   | 11,2 | 14,0 | 0,92 | 0,11 |
|   | 14,0 | 16,8 | 0,58 | 0,75 |
|   | 16,8 | 19,6 | 0,25 | 1,94 |
| 9 | 19,6 | 22,4 | 0,57 | 0,78 |
|   | 11,2 | 14,0 | 0,96 | 0,06 |
|   | 16,8 | 19,6 | 0,10 | 3,27 |

Предложенный в работе подход к восстановлению показателя ослабления, учитывающий поляризованную и деполяризованную компоненты, является перспективным и поможет расширить возможности дистанционного гидрооптического зондирования.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

## Список литературы

1. Левин И.М., Радомысльская Т.М. Оценка гидрооптических характеристик по глубине видимости диска Секки // Изв. РАН. Физика атмосф. и океана. 2012. Т. 48, № 2. С. 239–246.
2. Глуховец Д.И., Салюк П.А., Шеберстов С.В., Вазюля С.В., Салинг И.В., Степочкин И.Е. Восстановление полного комплекса оптических характеристик для оценки теплосодержания в южной части Баренцева моря в июне 2021 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 5. С. 214–225.
3. Irish J.L., McClung J.K., Lillycrop W.J. Airborne lidar bathymetry – the SHOALS system // Int. Navigation Assoc. PIANC Bull. 2000. V. 103. P. 43–53.
4. Guenther G.C., Brooks M., LaRocque P.E. New capabilities of the 'Shoals' airborne lidar bathymetry // Remote Sens. Environ. 2000. V. 73, N 2. P. 247–255.
5. Потеекаев А.И., Лисенко А.А., Шаманаев В.С. Статистический анализ потенциала батиметрического лидара с времяпролетным матричным SPAD-фотоприемником // Изв. вузов. Физика. 2019. Т. 62, № 9. С. 165–170.
6. Лисенко А.А., Потеекаев А.И., Шаманаев В.С. Статистические оценки сигналов лидара с матричным

- фотоприемником, отраженных от дна моря // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60, № 6. С. 122–127.
7. Roddewig M.R., Pust N.J., Churnside J.H., Shaw J.A. Dual polarization airborne lidar for freshwater fisheries management and research // Opt. Eng. 2017. V. 56. P. 031221.
  8. Churnside J.H., Wilson J.J., Tatarskii V.V. Airborne lidar for fisheries application // Opt. Eng. 2001. V. 40, N 3. P. 406–414.
  9. Шаманаев В.С. Обнаружение косяков морских рыб с помощью метода поляризационного лазерного зондирования // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 4. С. 268–274.
  10. Churnside J.H., Marchbanks R.D., Lee J.H., Shaw J.A., Weidmann A., Donaghay P.L. Airborne lidar detection and characterization of internal waves in a shallow fjord // J. Appl. Remote Sens. 2012. V. 6. P. 3611.
  11. Leifer I., Lehr W.J., Simecek-Beatty D. S., Bradley E., Clark R., Dennison Ph., Yongxiang Hu, Matheson S., Jones C.E., Holt B., Reif M., Roberts D.A., Svejksky J., Swayze G., Wozencraft J. State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill // Remote Sens. Environ. 2012. V. 124. P. 185–209.
  12. Liu H., Chen P., Mao Z., Delu P., He Y. Subsurface plankton layers observed from airborne lidar in Sanya Bay, South China Sea // Opt. Express. 2018. V. 26. P. 29134–29147.
  13. Churnside J.H., Marchbanks R.D. Subsurface plankton layers in the Arctic Ocean // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. P. 4896–4902.
  14. Churnside J.H. Review of profiling oceanographic lidar // Opt. Eng. 2014. V. 53. N 5. P. 051405. DOI: 10.1117/1.OE.53.5.051405.
  15. Lee J.H., Churnside J.H., Marchbanks R.D., Donaghay P.L., Sullivan J.M. Oceanographic lidar profiles compared with estimates from *in situ* optical measurements // Appl. Opt. 2013. V. 52, N 4. P. 786–794.
  16. Шаманаев В.С. Гидрооптические сигналы поляризационного самолетного лидара при зондировании однородной толщи воды // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 7. С. 516–521. DOI: 10.15372/AOO20200703.
  17. Лисенко А.А., Шаманаев В.С. Статистические оценки влияния индикатрисы рассеяния морской воды на характеристики сигнала гидрооптического самолетного лидара // Изв. вузов. Физика. 2021. Т. 64, № 7. С. 171–177.
  18. Churnside J.H., Donaghay P.L. Thin scattering layers observed by airborne lidar // ICES J. Marine Science. 2009. V. 66, N 4. P. 778–789.
  19. Шаманаев В.С. Самолетные лидары ИОА СО РАН для зондирования плотных сред // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 3. С. 260–266.
  20. Petzold T.J. Volume Scattering Functions for Selected Ocean Waters. SIO Ref. 72–78. San Diego: Institute of Oceanography, Visibility Laboratory, 1972. 79 p.

**V.S. Shamanaev, A.A. Lisenko. Experimental determination of the laser radiation extinction coefficient for inhomogeneous sea water in the subsurface layer from airborne polarization lidar signals.**

Results of experimental determination of the laser radiation extinction index by the gradient method from the depth profiles of the airborne polarization lidar return signal power for clear and coastal sea water in the subsurface layer are presented. Based on synchronous measurements of the polarized and depolarized signal components with the “Makrel” lidar operating at a wavelength of 532 nm, laser radiation extinction coefficients were estimated. It has been experimentally demonstrated that the polarized and depolarized lidar return signal components have different seawater extinction indices, and the difference can reach several ten percent. The depth profiles of the laser radiation extinction indices retrieved from these signal components for two series of lidar measurements are given. Such an integrated approach expands the possibilities of remote hydrooptical sensing.