

Г.П. Коханенко, И.Э. Пеннер, В.С. Шаманаев

Авиалидарные исследования морской акватории.

Ч. 1. Короткие трассы

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 10.09.2001 г.

Проведена обработка сигналов самолетного лидара при зондировании морской воды в районе Гебридских островов. Сравнивались ряды значений показателя ослабления излучения воды ϵ , полученные через короткие промежутки времени при полетах над стабильной акваторией. Получено, что водное поле имеет ячеиковую структуру по показателю ослабления. В данном эксперименте горизонтальные размеры неоднородностей ϵ изменялись от сотен метров до единиц километров. Значения ϵ имели размах флуктуаций до 50% относительно среднего значения. Радиус корреляции значений показателя ослабления имеет величину около 3 км.

Введение

В 1997 г. самолет-лаборатория Института оптики атмосферы выполнял исследовательские полеты над акваторией морей, окружающих Северную Шотландию. Всего было произведено 5 полетов, отличающихся районами исследования и решаемыми задачами. Одной из задач было определение того, насколько стабильными и повторяемыми могут быть лидарные данные при неоднократном зондировании одной и той же стабильной части морской акватории.

Для этого был выбран район внутреннего моря Гебридов (Sea of Hebrides) между внешними (Outer Hebrides) и внутренними (Inner Hebrides) Гебридскими островами.

В этом районе в течение достаточно короткого промежутка времени (1–2 ч) выполнялись полеты по одному и тому же маршруту с курсами, отличающимися на 180° . Другим вариантом были полеты по кольцевому маршруту с фиксированным центром окружностей (так сказать, точечное измерение).

1. Аппаратура и методика обработки данных

Основным исследовательским инструментом являлся лидар «Макрель-2», работающий на длине волны 532 нм. Те или иные технические аспекты его использования публиковались неоднократно [1, 2].

В качестве платформы-носителя использовался самолет АН-30 № 30039, Мячковского (Москва) авиаотряда. Для точного позиционирования применялась GPS-система Trimble, подключенная к лидарному компьютеру. Как правило, полеты производились на высоте 200–300 м над уровнем моря при скорости 320 км/ч (88 м/с).

В данном эксперименте мы отказались от получения глубинных профилей показателя ослабления излу-

чения $\epsilon(z)$. Было использовано измеряемое с меньшей погрешностью среднее по глубине значение ϵ по традиционному алгоритму логарифмической производной [3].

Авиалидарная схема гидрооптического зондирования осложнена целым рядом обстоятельств. Сюда входят: ограниченный динамический диапазон фотумножителей в обоих поляризационных каналах; ограниченный диапазон регистрации сигналов в 7-разрядном аналого-цифровом преобразователе; возможность появления мощных бликов лазерного излучения от микроплощадок волнения, ориентированных перпендикулярно лучу лазера (это ведет к сильным абсолютным флуктуациям мощности подводного эхосигнала) и, наконец, это часто вынужденные изменения высоты полета. Даже если они не слишком велики, то приводят к изменениям вклада многократного рассеяния в эхосигнале [3].

По этой причине в ходе многочисленных полетов (не только возле Шотландии) был отработан следующий практический алгоритм обработки лидарных эхосигналов.

При оцифровке сигналов 7-разрядным АЦП в канале регистрации может появиться сигнал от 0 до 127 единиц кода АЦП (т.е. это некоторая относительная мощность). Погрешность оцифровки равна ± 1 единице кода.

Пусть i_1, \dots, i_n является последовательностью по глубине в воде точек оцифровки и P_1, \dots, P_n – соответствующие мощности сигнала; H_0 – высота полета самолета; $n = 1,33$ – показатель преломления воды, глубина в воде $r_i = i\Delta r$. В свою очередь Δr – шаг квантования аналого-цифрового преобразователя, и в данном случае $\Delta r = 0,8$ м. Если S_i – это значение лидарной функции $S(r) = P(r)(H_0 + \frac{r}{n})^2$ на глубине r_i , то средний

по глубине зондирования показатель ослабления ϵ может быть оценен по методу наименьших квадратов как

$$\varepsilon = 0,5 \frac{\sum_{i_1}^{i_2} r_i \sum_{i_1}^{i_2} \ln S_i - (i_2 - i_1 + 1) \sum_{i_1}^{i_2} r_i \ln S_i}{\left(\sum_{i_1}^{i_2} r_i \right)^2 - (i_2 - i_1 + 1) \sum_{i_1}^{i_2} r_i^2}$$

Для каждого импульса выделялась начальная точка i_1 (непостоянная по глубине величина) на уровне около 90% динамического диапазона АЦП (реально $P(i_1) \leq 110$ единиц кода АЦП). На дальнем (наиболее глубоком) конце трассы зондирования для данной вспышки лазера (точка i_n) величина сигнала должна, естественно, превосходить шум квантования АЦП. Мы использовали $P(i_n) = 3$, т.е. отношение сигнал-шум равнялось трем. Как правило, интервал $i_n - i_1$ соответствовал глубине 5–15 м. Его изменения зависели от условий эксперимента (т.е. высота полета, мутность воды и т.п.).

Кроме того, на самом первом этапе все сигналы контролировались с целью исключения влияния импульсов последствия фотоумножителей [3].

Оценки погрешности измерения ε показывают, что она составляет не более 12% [3].

Полученные горизонтальные последовательности значений показателя ослабления $\varepsilon(L)$, где L – расстояние вдоль маршрута полета, использовались двояким образом.

В своем простейшем виде это были именно горизонтальные профили измеренных значений $\varepsilon(L)$, где L изменялось от нескольких сотен метров до нескольких сотен километров. Такие профили позволяют оценить абсолютные величины ε , минимальные и максимальные для данного эксперимента размеры неоднородностей, усредненные горизонтальные градиенты показателя ослабления излучения, т.е. его тренды. Это могут быть как более «темные», так и более «светлые» пятна, как с превышением значений $\varepsilon(L)$ над средним, так и с меньшими значениями, т.е. с более прозрачной водой.

В более сложном варианте производилась статистическая обработка $\varepsilon(L)$, для чего необходимо было предварительно преобразовать его к виду случайного стационарного процесса, как это делалось в [3]. Для этого в каждом измерительном файле вычислялось значение дисперсии $\varepsilon(L)$, в нем удалялись линейные тренды, а измеренные текущие значения ε нормировались на их выборочную дисперсию. Таким образом, в рассмотрении оставалась только флуктуационная часть профиля $\varepsilon(L)$ с нулевым средним. Нормировка абсолютных значений ε на их дисперсию позволила привести все измеренные профили ε к единому безразмерному масштабу, сделала достоверным их сравнение, возможным их «сшивание» и дальнейшую обработку.

2. Результаты прямолинейных полетов

В одном из полетов в районе Гебридских островов самолет несколько раз прошел по приблизительно одному и тому же маршруту, отклоняющемуся на 4° от направления параллели. Схема маршрутных галсов

приведена на рис. 1, а. Здесь же указано местное время (по Гринвичу) для каждого галса. Длина общей части маршрута около 90 км. На рис. 1, б приведены соответствующие горизонтальные профили $\varepsilon(L)$.

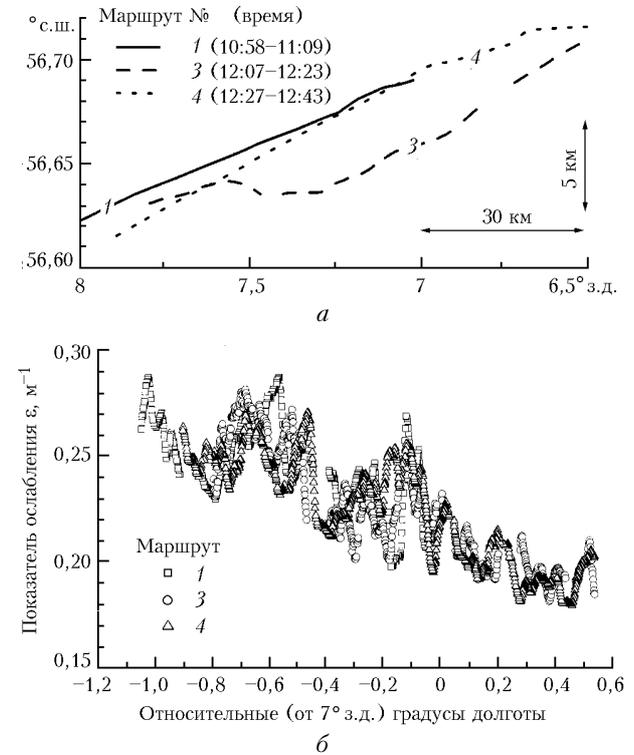


Рис. 1. Полеты по прямолинейным маршрутам: а – координатная привязка трех полетных галсов; б – горизонтальные профили показателя ослабления для этих полетных линий

Хорошо видно, что все эти профили имеют тенденцию уменьшения абсолютных значений ε в направлении с запада на восток (с градиентом порядка $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}/\text{км}$) и положения их локальных максимумов и минимумов совпадают. Расстояние между центрами участков с наименее прозрачной водой для этого рисунка равно 0,36–0,62 отн. градуса долготы. Для менее выраженных оптических неоднородностей расстояние между ними уменьшается до сотен метров.

Мы проверили корреляционным анализом, являются ли полученные значения показателя ослабления на совпадающих трассах статистически устойчивыми при незначительном разнесении измерений как в пространстве, так и во времени. Были выбраны данные измерений с параллельных участков маршрутных галсов 3 и 4, как наиболее близкие по времени проведения зондирования (менее 20 мин), но наиболее удаленные в пространстве (~ 3 км, рис. 1, а), а также измерений с маршрутных галсов 1 и 4, как наиболее разнесенных по времени проведения зондирования (~ 90 мин), но наиболее близких в пространстве (< 0,8 км). Длина интервала совместных выборочных значений показателя ослабления на каждом участке составляла 10 мин во времени и приблизительно 50 км в пространстве.

В пределах указанного интервала формировалась неразрывная совокупность значений показателя ослабления. Подготовка данных заключалась в удалении линейного тренда из последовательности отдельных реализаций ϵ и центрировании их возле нулевого среднего. Далее они последовательно соединялись в местах разрыва данных, если таковые появлялись в пределах обозначенного пространственно-временного периода измерений. Затем полученные неразрывные реализации на выделенных парах участков маршрутных линий выравнивались в соответствии с координатной привязкой на проекцию географической долготы. В результате выравнивания при помощи операций прореживания и интерполяции были получены последовательности неразрывных данных о флуктуациях показателя ослабления с эквидистантным расположением парных точек на общей линии траектории полета. Длина каждой реализации, подготовленной для корреляционного анализа, содержит 512 точек с дискретностью в пространстве ~ 100 м, а во времени $\sim 1,1$ с.

Результаты обработки показаны на рис. 2 и 3. Из рис. 2, а и 3, а видно, что вариации показателя ослабления могут достигать максимального размаха 50% и имеют довольно сложную пространственную структуру. Это подтверждает и общий вид рассчитанных методом быстрого преобразования Фурье нормированных автокорреляционных функций, представленных на рис. 2, б и 3, б.

Периодичность в пространственной структуре показателя ослабления в пределах рассматриваемого интервала явно не выделяется. Нормированная случайная ошибка оценок ковариационных функций для данной длины реализаций составляет $\sim 10\%$. Таким образом, при уровне доверия 90% мы имеем значимую величину коэффициента корреляции $\rho \geq 0,3$. Радиус корреляции, определяемый по уровню этой статистически достоверной величины, составляет для первой пары реализаций 3,5 км (рис. 2, б) и, соответственно, для второй пары реализаций 2,5 км (рис. 3, б). Это говорит о статистической зависимости измерений показателя ослабления в пределах нескольких километров, что вполне соответствует реальным гидрологическим процессам в открытом океане на масштабах до 100 км.

Представленные на рис. 2, в и 3, в оценки нормированных взаимных ковариационных функций дают меру коррелированности отдельных реализаций показателя ослабления, полученных через разные пространственно-временные интервалы. Так, для двух реализаций, измеренных практически в одном и том же месте (1-й и 4-й маршруты), мы имеем высокий уровень взаимной корреляции, и $\rho_\epsilon = 0,72 \pm 0,07$ (рис. 3, в), хотя они и были разнесены по времени на 1,5 ч. Меньший уровень взаимной корреляции $\rho_\epsilon = 0,55 \pm 0,06$ (рис. 2, в) имеет пара реализаций ϵ (рис. 2, а), несмотря на то что их измерения проводились через меньший промежуток времени (около 20 мин). Это, возможно, объясняется тем, что в пространстве они были разнесены на существенно большее расстояние, равное 3 км. Такая дистанция между

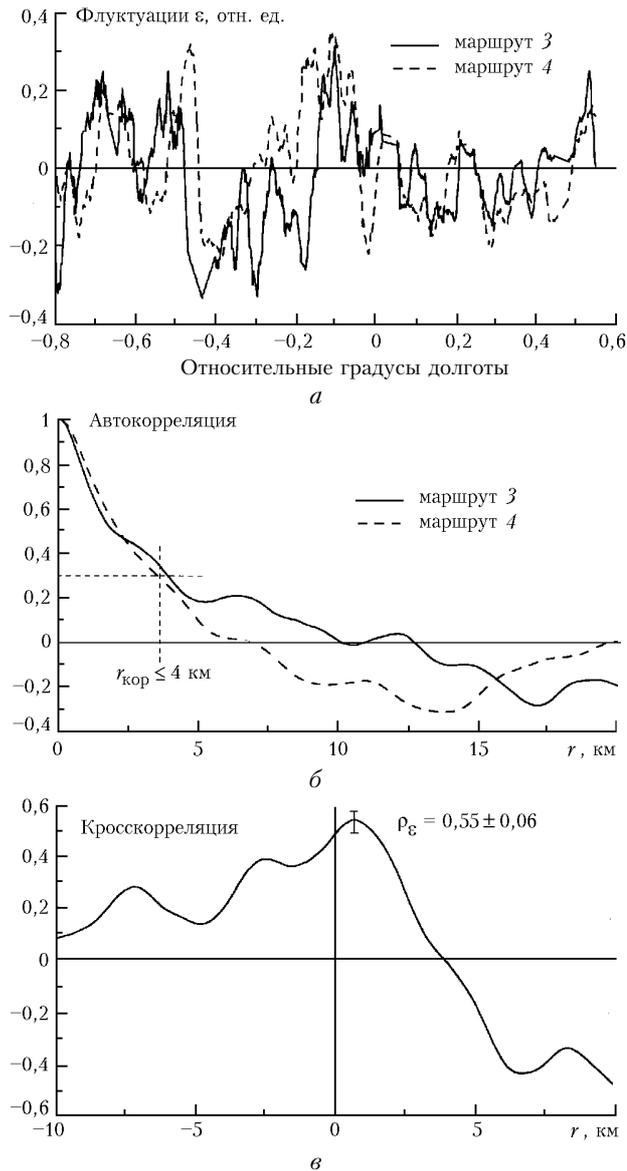


Рис. 2. Пара полетных галсов, наиболее близких во времени, но разнесенных в пространстве на 3 км: а – профили флуктуаций нормированного показателя ослабления; б – автокорреляционные функции флуктуаций ϵ для обоих полетных галсов; в – кросскорреляционная функция для значений ϵ по обоим полетным галсам

отдельными реализациями сравнима, как мы выяснили, с пространственным масштабом автокорреляции данных измерений (рис. 2, б). Отметим также незначительное смещение ($\sim 0,6$ км) максимума значений взаимной ковариационной функции на рис. 2, в, что характеризует наличие постоянного запаздывания между отдельными реализациями, разнесенными в пространстве на расстояние около 3 км. К сожалению, отсутствие априорной информации о гидрологической ситуации в данном месте не позволяет сделать конкретных выводов о причинах этого смещения и определить возможные параметры запаздывания. Вероятнее всего, это пространственная неоднородность водной массы в направлении, перпендикулярном курсу

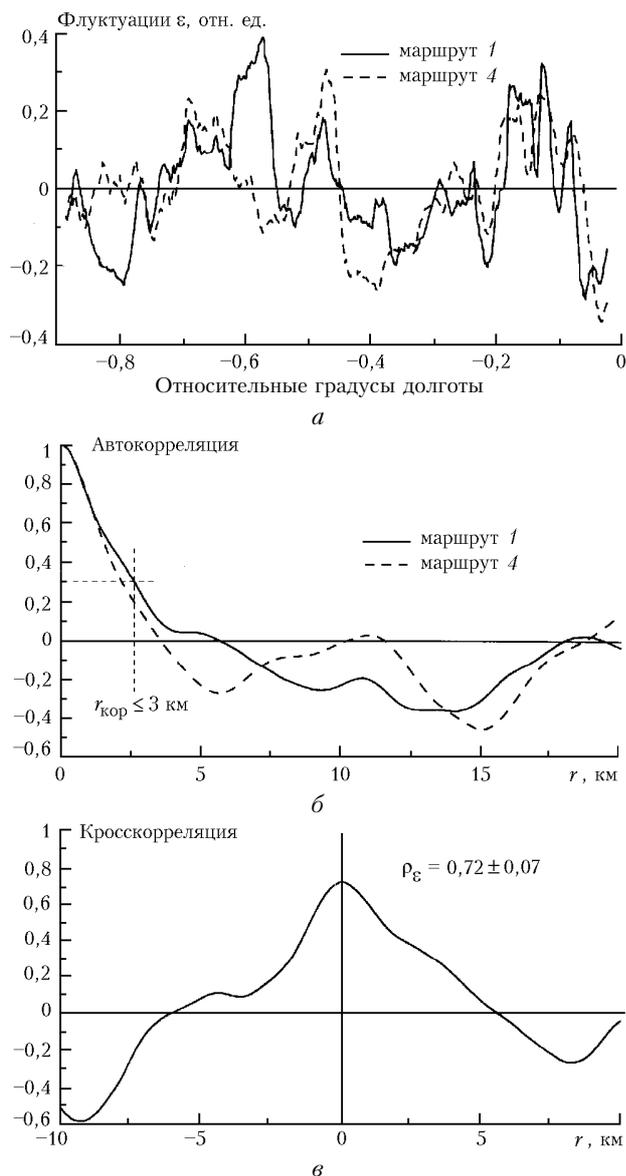


Рис. 3. Пара полетных галсов, наиболее близких пространственно, но разнесенных во времени на 1,5 ч. Обозначения такие же, как на рис. 2

самолета. Тем не менее проведенный анализ доказывает с достаточной степенью статистической достоверности достоверность измерений в одном месте, с незначительным разнесением в пространстве и более значительным разнесением во времени.

3. Результаты кольцевых полетов

Несколько экспериментов были выполнены для того, чтобы оценить постоянство лидарных результатов в другом режиме зондирования (при полете по кольцевому маршруту). В какой-то мере это можно считать локальными, почти точечными измерениями с самолетной спецификой.

Так, во время одного из полетов были выполнены 3 концентрических кольца по схеме рис. 4, а с центром на 56,96° с.ш. и 7,94° з.д. Это очень близко

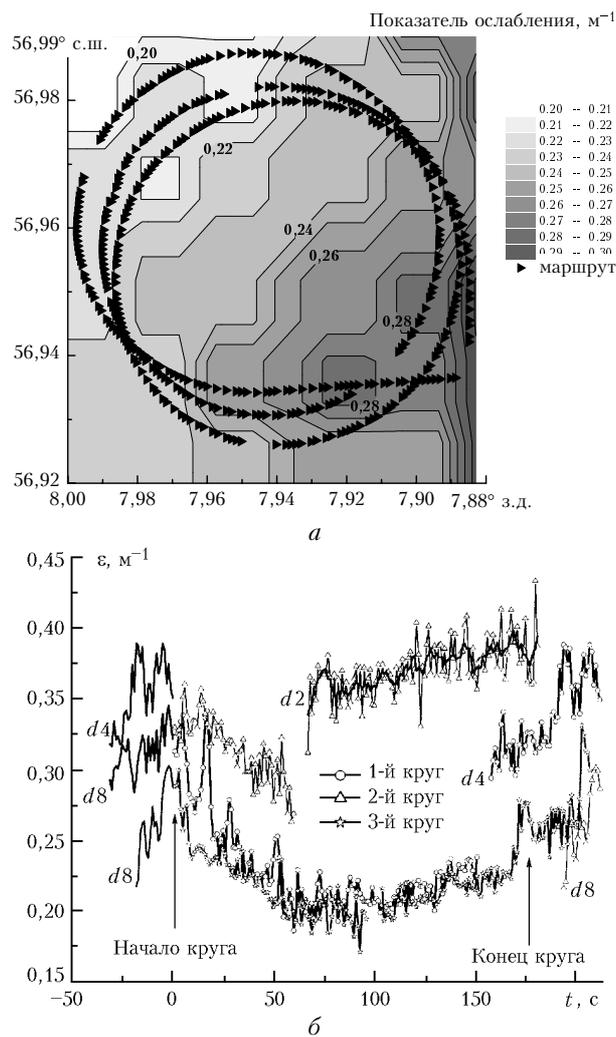


Рис. 4. Полеты по концентрическим окружностям: а – координатная привязка кольцевых полетных линий и восстановленная оценка двумерного распределения показателя ослабления воды; б – профили ϵ вдоль полетных колец, где $d2\dots d8$ – диаметр полевой диафрагмы, мм, задающей поле зрения соответственно 2,7; 5,3 и 10,6 мрад

от места, показанного на рис. 1, т.е. можно говорить об одинаковой водной массе. В географических координатах полетные линии – почти круги. В линейных координатах это эллипсы с горизонтальным размером 8 км и вертикальным размером 5,5 км (на этих широтах один градус широты уже несколько больше градуса долготы).

На рис. 4, б приведены полученные при кольцевом маршруте горизонтальные профили значений ϵ . Два нижних почти совпадающих профиля соответствуют двум кругам, пройденным с одним углом поля зрения 10,6 мрад (диафрагма поля зрения телескопа равна 8 мм).

На оси абсцисс отрезки слева от точки «0 с» (с отрицательным временем) соответствуют подлету к точке, где начались измерения. Они приведены с чисто иллюстративной целью, чтобы показать замкнутость профилей $\epsilon(\tau)$ на кольцах. Во всяком случае, видно, что для двух окружностей в море, центры

которых смещены не более чем на 0,9 км, профили показателя ослабления излучения практически полностью совпадают. Мы полагаем, что в такой инерционной водной массе, как одно из локальных прибрежных морей Атлантического океана, за время около 10 мин оптические свойства не могут сколько-нибудь значительно измениться. Это отражено и в стабильности наших измерений одной из основных оптических характеристик – показателя ослабления излучения ϵ .

В этой измерительной ситуации можно заметить увеличение показателя ослабления излучения ϵ к востоку-юго-востоку. Это некоторая ячейка повышенной мутности воды, в которой ϵ возрастает на дистанции 6–8 км от (в среднем) $0,20 \text{ м}^{-1}$ до приблизительно $0,27 \text{ м}^{-1}$, т.е. на 35%. Кстати, наличие таких ячеек с пониженной или увеличенной прозрачностью воды с помощью лидара впервые было выявлено Хогом и Свифтом [4]. На рис. 4, а приведено двумерное распределение ϵ в этом районе зондирования. Это лишь один из вариантов подобной качественной картины, но он более наглядно, хотя и условно, иллюстрирует неоднородность воды.

Третий круг данной измерительной площадки был посвящен изучению влияния угла поля зрения приемного телескопа лидара на результаты зондирования. Здесь угол поля зрения был уменьшен последовательно до 5,3 и 2,7 мрад. Такое изменение условий эксперимента сразу же сказалось на его результатах за счет изменения влияния многократного рассеяния, что подробно объяснено в нашей работе [2]. Однако общая горизонтальная неоднородность моря на этом участке также просматривается.

G.P. Kokhanenko, I.E. Penner, V.S. Shamaev. Studies of a see water area with the aircraft-borne lidar.

Part 1. Short paths.

This work presents the results of processing of the aircraft-borne lidar returns obtained when sensing see water in the region of the Hebrides. A series of values of the water attenuation factor ϵ , measured at short intervals above a stable see area, were compared. It was found that the ϵ field for water is of a cellular structure. The horizontal sizes of ϵ inhomogeneities vary from hundreds of meters to several kilometers. The values of ϵ fluctuate up to 50% relative to some mean value. The radius of the attenuation factor correlation is about 3 km.

Ранее такой же эксперимент был выполнен на 30 км южнее. Но здесь вода была горизонтально однородная в пределах такого же круга диаметром около 8 км. При работе с полем зрения 10,6 мрад было получено, что $\epsilon = 0,23 \text{ м}^{-1}$ со стандартным отклонением 8,6%.

Заключение

Проведенные эксперименты в фактически контролируемых условиях показали повторяемость лидарных данных при исследованиях стационарной водной массы. Используемая аппаратура, методика и алгоритмы позволяют проводить достоверные исследования гидрооптической структуры морской водной массы.

1. *Абрамочкин А.И., Занин В.В., Пеннер И.Э., Тихомиров А.А., Шаманаев В.С.* Самолетные поляризационные лидары для исследования атмосферы и гидросферы // Оптика атмосф. 1988. Т. 1. № 2. С. 92–96.
2. *Коханенко Г.П., Крекова М.М., Пеннер И.Э., Шаманаев В.С.* Совместное влияние многократного рассеяния и ветрового волнения на результаты зондирования морской воды лидаром с переменным полем зрения // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 4. С. 367–378.
3. *Коханенко Г.П., Пеннер И.Э., Шаманаев В.С., Ладбрук Дж., Скотт А.* Лазерное зондирование акватории озера Байкал // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 1. С. 39–45.
4. *Hoge F.E., Swift R.N.* Airborne detection of oceanic turbidity cell structure using depth-resolved laser-induced water Raman backscatter // Appl. Opt. 1983. V. 22. N 23. P. 3778–3786.