

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.46.07

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

Авиалидарные исследования морской акватории. Ч. 2. Длинные трассы

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 26.02.2002 г.

Проведена обработка сигналов самолетного лидара при зондировании морей вокруг Северной Шотландии. В пяти полетах исследовались участки акватории длиной от 100 до 1000 км. Горизонтальное распределение значений показателя ослабления излучения ϵ неравномерное, имеются «ячейки мутности» и «ячейки прозрачности» размерами от 0,5–1 до нескольких десятков километров. В среднем стандартное отклонение ϵ равно 10–15%, однако в отдельных ячейках оно может достигать 30 и даже 80%. Энергетический спектр флуктуации значений ϵ в ячейках размерами менее 60 км подчиняется в целом степенному закону « $-5/3$ ». Автокорреляционная функция для ϵ имеет полуширину до нескольких километров.

В 1997 г самолет-лаборатория Института оптики атмосферы выполнял исследовательские полеты над акваторией морей, окружающих Северную Шотлан-

дию. Ее территория и маршруты пяти полетов изображены схематически на рис. 1. Наша задача состояла в том, чтобы определить, насколько изменчив

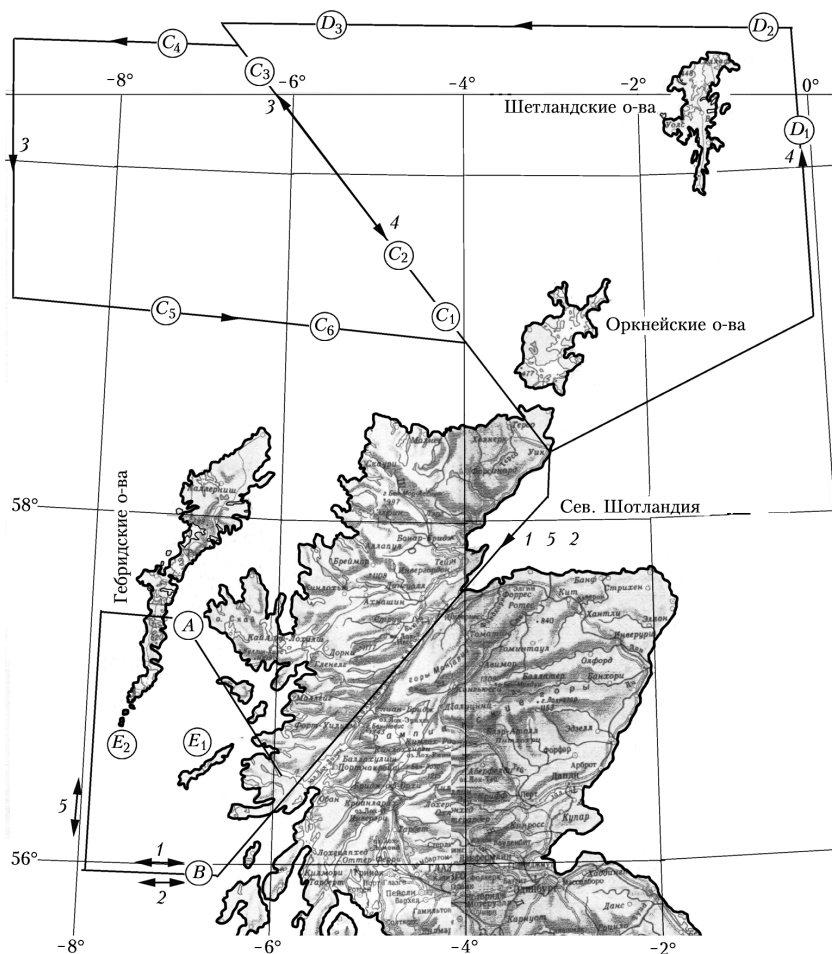


Рис. 1. Карта побережья Северной Шотландии и упрощенные схемы полетов самолета-лаборатории. Цифры указывают номера полетов. Кругочками обозначены районы выполнения отдельных измерений

верхний (10 – 20 м) слой моря относительно показателя ослабления излучения, и оценить горизонтальные размеры водных неоднородностей и статистические закономерности их флуктуаций. Рассматривались масштабы маршрутов от десятков метров до сотен километров. Ранее на таких расстояниях распределение оптических свойств самолетными лидарами не исследовалось. Еще одним интересным моментом является то, что с запада Британские острова омывает северная ветвь течения Гольфстрим, которое оказывает свое влияние на оптические параметры воды.

Используемая аппаратура (лидар «Макрель-2»), алгоритм обработки эхосигналов (статистически стабилизированный метод логарифмической производной) и методическая достоверность получаемых результатов изложены в [1].

Рассмотрим полученные результаты на примерах отдельных участков трасс, а также для всей совокупности данных.

Так, данные рис. 2 соответствуют участку А рис. 1 (море Гебридов, полет № 1 30.05.97), время – по Гринвичу. Кадр а рис. 2 получен при частоте следования

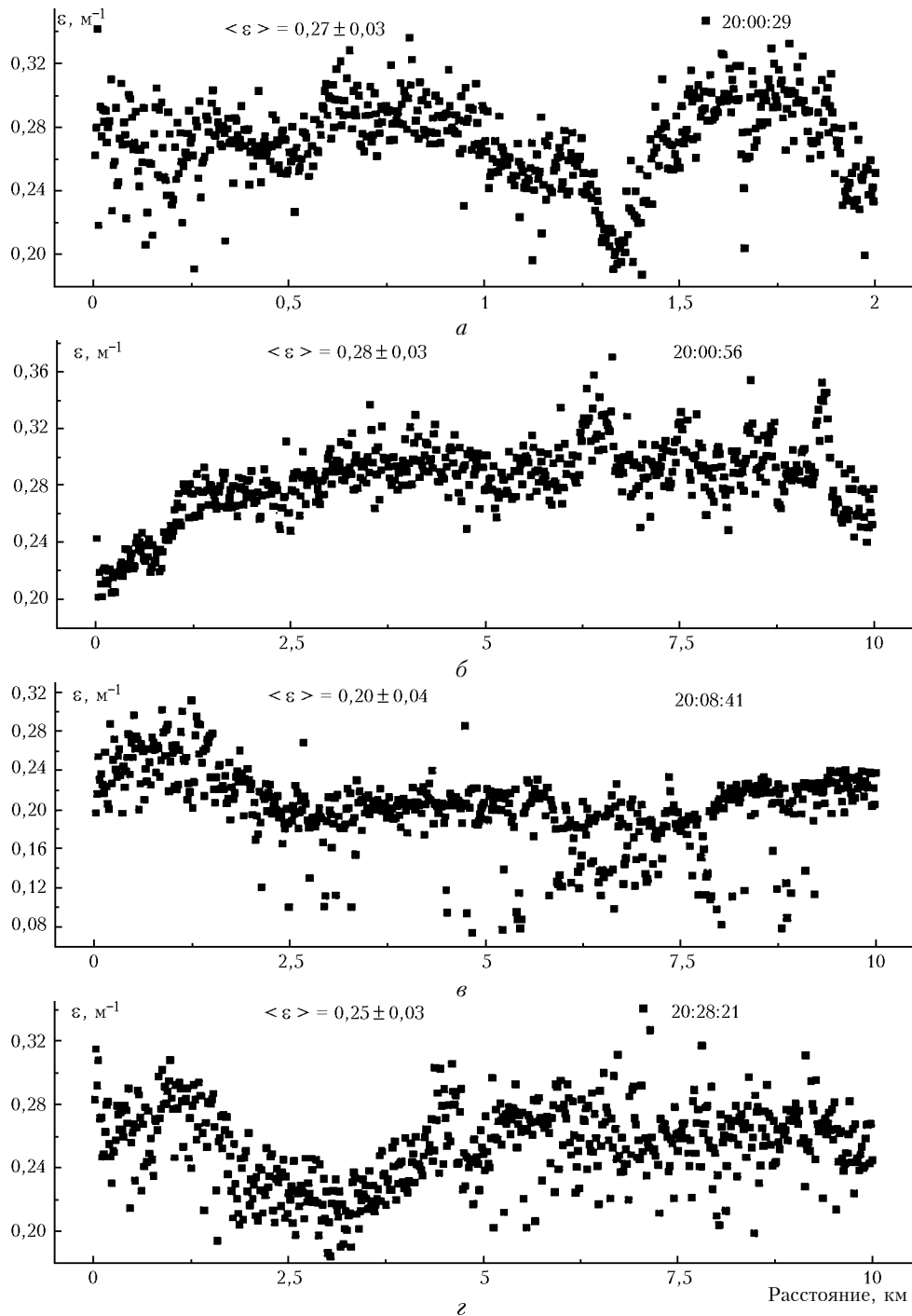


Рис. 2. Горизонтальные разрезы показателя ослабления излучения ϵ для полета № 1 (район А рис. 1)

вспышек 25 Гц, т.е. здесь 600 вспышек соответствуют 24 с полета или 2,1 км линейного маршрута. Видно, что вариации показателя ослабления ϵ существенно превышают погрешности измерений (примерно 12%, [1]). Расстояние между наиболее замутненными точками (локальные максимумы мутности) равно 0,5–1,0 км. Для последующих кадров частота вспышек лазера была понижена до 5 Гц (18 м полета между вспышками). Угол поля зрения лидара составлял 8 мрад, высота лидара над водой около 350 м.

Кадр рис. 2,б был получен сразу после предыдущего. На нем хорошо прорисована некая куполообразная неоднородность. Ее длина, если исходить из крайних точек слева и справа, соответствует 120 с полета, т.е. 10,5 км. Более мелкие пятна повышенных значений ϵ здесь замаскированы его флуктуациями.

Кадры рис. 2,в,г представлены с временными разрывами около 10 мин от предыдущей части рисунка и один от другого около 50 км. Но здесь, как и на рис. 2,а, имеются иные неоднородности, т.е. с более прозрачной водной массой по сравнению с окружающей.

Рис. 3 иллюстрирует полет № 2 (01.06.97), на рис. 1 он соответствует району В. На рис. 3 значения ϵ представляют собой неразрывную последовательность на дистанции 42,2 км (частота вспышек 5 Гц, угол поля зрения 10,6 мрад, высота полета 320 м). Для всех четырех файлов среднее значение показателя ослабления, с учетом перекрывающихся стандартных отклонений ϵ , можно считать постоянным. Раз-

меры крупных пятен повышенной мутности («выпуклых») составляют 2–4 км. Самое большое на рис. 3 пятно повышенной прозрачности («вогнутое», время 12:38:27) имеет длину около 8–9 км.

Полету в открытой части моря, без влияния островов, соответствует рис. 4. Положение его фрагментов отражено на рис.1 точками C_i , где $i = 1, \dots, 6$. Длина каждого из фрагментов равна 10,5 км. Нижняя граница облачности менялась, заставляя самолет иногда изменять высоту полета от обычных 330 м до 120–130 м. Можно сразу выделить здесь характерное отличие от предыдущих случаев зондирования внутреннего моря: отсутствие резко выраженных неоднородностей ϵ . Тренды в изменениях ϵ имеют достаточно плавный характер. Возможно, здесь проявляется то, что северная ветвь течения Гольфстрим, проходящая возле Великобритании, не испытывает взаимодействия с цепью Гебридских островов и ее донными проявлениями в момент проведения экспериментов.

Три фрагмента полета № 4 приведены на рис. 5. (Они обозначены позициями $D_1 - D_3$ на рис. 1). Все они содержат локальные экстремумы на фоне трендов. Так, на рис. 5,а кривая роста среднего значения ϵ наблюдается на протяжении примерно 40 км, имея модуляцию пятен повышенной мутности размерами 3 – 7 км. Абсолютные значения ϵ изменяются более чем в 2 раза, многократно перекрывая флуктуации и погрешности измерений. Здесь самолет шел строго на север.

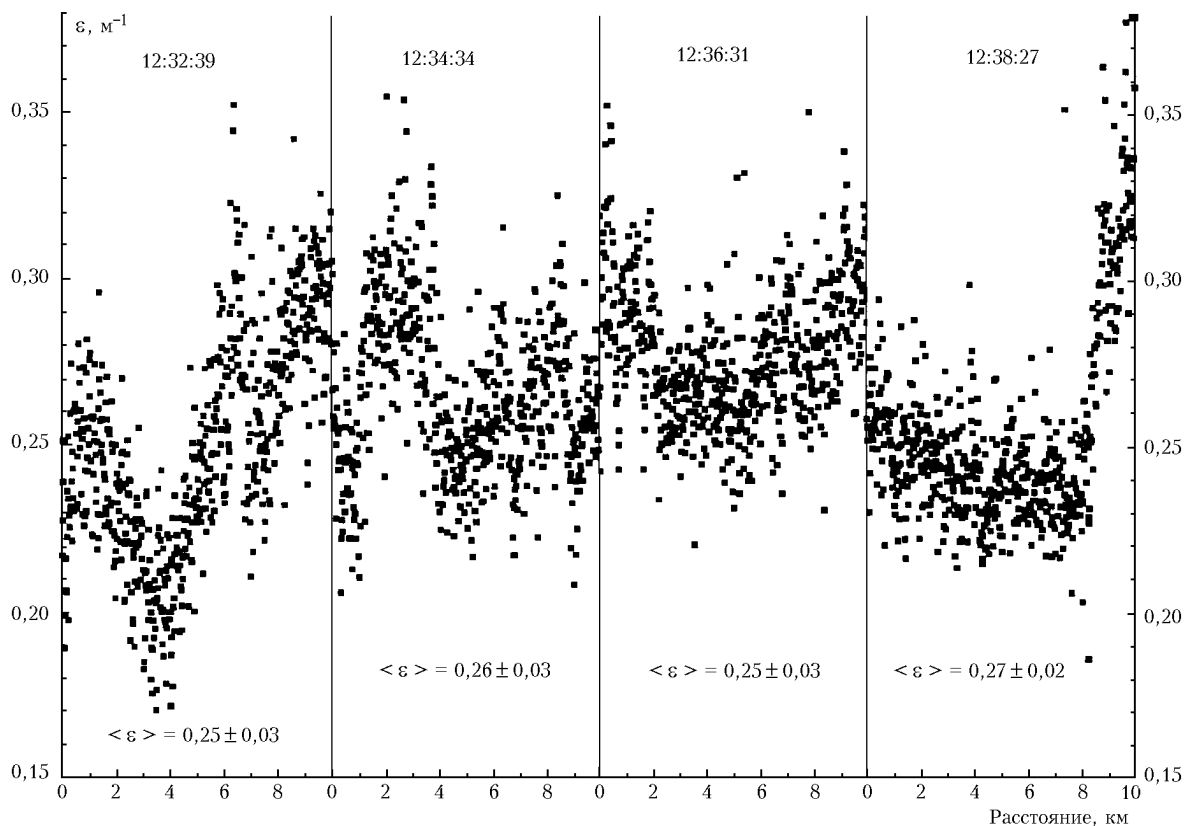


Рис. 3. Горизонтальный разрез ϵ для полета № 2 (район В рис. 1)

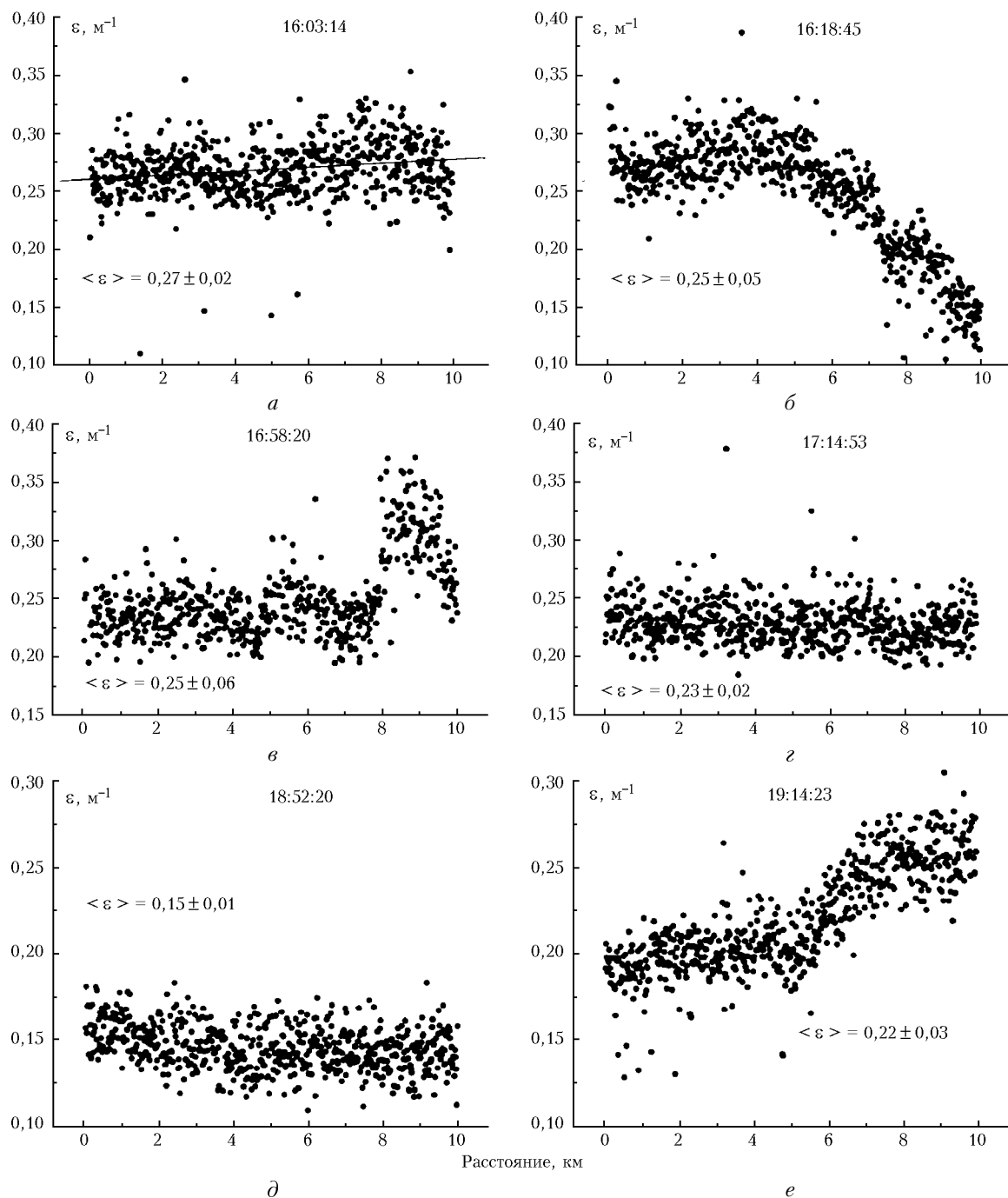


Рис. 4. Фрагменты горизонтального разреза ϵ для полета № 3 (районы C_i рис. 1)

Сходная ситуация приведена на рис. 5, в через довольно значительное время после поворота на запад. В центре слева имеется 20-км пятно ϵ с тремя локальными максимумами. Интересно, что этот измерительный район D_3 находится по прямой на дистанции не более 120 км от района C_3 . Но там (см. рис. 4) за 2 сут до этого имелась гораздо более однородная водная масса. Анализ причин этого выходит за рамки данной статьи. К сопоставлению данных полетов № 3 и 4 мы еще вернемся.

Весьма кратко охарактеризуем полет № 5, проходивший по тому же общему маршруту, что и поле-

ты № 1, 2. В данном случае измерения на прямолинейных отрезках выполнялись в районах E_1 и E_2 (см. рис. 1). В качественном характере профили $\epsilon(L)$ похожи на таковые для рис. 2 и 3, поэтому они отдельно не рассматриваются.

Рассмотрим наиболее длинные фрагменты полетов.

Так, на рис. 6, а приведен разрез $\epsilon(L)$ для совпадающего отрезка маршрута полетов № 3 и 4. Его длина примерно 615 км. При визуальном анализе профилей на рис. 6 видно, что показатель ослабления ϵ в пространстве изменяется одинаково для обоих маршрутов. Напомним, что во времени они различаются

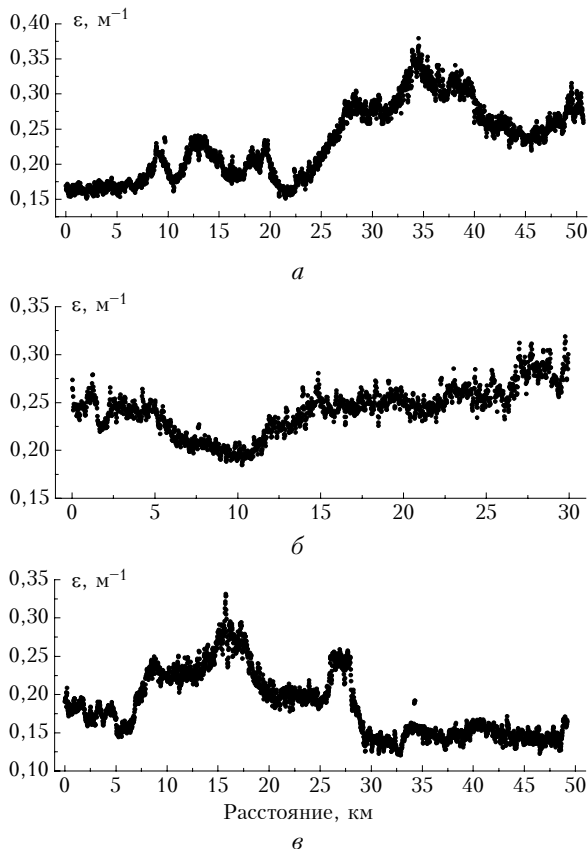


Рис. 5. Фрагменты горизонтального разреза ϵ для полета № 4 (районы D_i ; рис. 1)

на 2 сут. Линейное расстояние между ними по штурманской прокладке составляло от 30 до 40 км, и маршруты не пересекались.

Оценим размеры имеющихся наиболее крупных неоднородностей. В центре рис. 6 между $3,3$ и $4,6^\circ$ находится пятно повышенной мутности шириной около 160 км с внутренней структурой из локальных экстремумов ϵ . Абсолютное значение ϵ возрастает в среднем от $0,16 \text{ м}^{-1}$ на краях пятна до $0,22 \text{ м}^{-1}$ в центральной части, т.е. примерно на 40%. Слева и справа от него имеются «пятна прозрачности» шириной около 40 км.

Левее, на координатах $1,5$ и $2,5^\circ$ з. д., находятся центры двух других пятен мутности шириной 70 и 90 км. Для них средние значения ϵ увеличиваются соответственно с $0,25$ до $0,31 \text{ м}^{-1}$ (на 25%) и с $0,21$ до $0,31 \text{ м}^{-1}$ (на 55%).

Затем, так же как и в [1], были рассчитаны корреляционные функции (рис. 6,б). В [1] при 90%-м доверительном интервале на уровне 0,3 от максимума радиус автокорреляции составлял 2,6–3,5 км. Напомним, что в [1] зондировалась вода во внутреннем море Гебридов, а длина полетных трасс равнялась 40–50 км. В данной статье на рис. 6,б длина трассы увеличена на порядок, а ширина корреляционных функций (по этому же уровню 0,3) составляет 1,5 и 2,6 км, т.е. сохраняла тот же порядок величины. Влияние открытого моря на автокорреляцию в данном случае явно

не проявилось. Вторичные максимумы корреляции оказались ниже значимых значений.

Кросскорреляционная функция профилей ϵ , как видно из рис. 6, для этих двух полетов имеет незначимые значения (она была рассчитана до пространственного сдвига порядка 100 км). Таким образом, несмотря на внешнюю похожесть этих профилей, они не связаны между собой.

Как видно из представленных данных, корреляционный анализ способен дать информацию о структуре изменения значений ϵ только до масштабов порядка единиц километров. Поэтому для дальнейшего количественного представления длинных рядов наблюдений был использован спектральный анализ через быстрое Фурье-преобразование.

Энергетический спектр флуктуаций значений показателя ослабления излучения при его разложении по пространственным длинам волн λ (или волновым числам k) приведен на рис. 6,в. В целом здесь в интервале размеров неоднородностей ϵ от 0,1 до 7 км выполняется канонический степенной закон $Sp(k) \sim k^{-p}$. Как известно, в инерционном интервале турбулентности $p = 5/3$, или 1,67. В данном случае для больших пятен ϵ (λ порядка единиц километров) $p = 2,0$, т.е. $6/3$. Для размеров $\lambda \approx 0,6$ км имеется некоторый всплеск на спектре, а далее для обоих маршрутов в среднем $p = 2,52$, т.е. $7,5/3$. Анализ причин этого выходит за рамки данной статьи.

Рис. 7 иллюстрирует данные, полученные за весь полет № 3, который проходил только над морем, без пересечения островов, мелководий и без дополнительных эволюций самолета, т.е. сюда входит и отрезок, рассмотренный на рис. 6. По оси абсцисс отложено местное время, цифры в кружках соответствуют точкам поворота с одного галса на другой (маршрут состоял из 4 длинных галсов с зондированием).

Как видно из рис. 7, горизонтальный профиль показателя ослабления имеет флуктуации различных пространственных периодов с большими вариациями значений ϵ , что характерно для областей со значительными градиентами прозрачности, возникающими вследствие турбулентных возмущений на границах течений.

Для всего маршрута среднее значение ϵ равно $0,224 \text{ м}^{-1}$ со стандартным отклонением $0,212 \text{ м}^{-1}$, т.е. в целом для этого участка океана вода в оптическом смысле весьма неоднородна. Например, на временном участке от 17:45 до 18:00 можно констатировать либо наличие одного более мутного пятна длиной примерно 80 км (15 мин полета), либо считать, что оно промодулировано тремя более мелкими, 25-километровыми. На краях этого пятна $\epsilon = 0,25 \text{ км}^{-1}$, а в максимумах $0,32$ – $0,33 \text{ км}^{-1}$, т.е. увеличивается на 32%. Для пятна с центром на 16:18 это повышение мутности еще больше, примерно на 80–90%. Для пятен «мутности» или «прозрачности» меньшего горизонтального размера соответствующие изменения ϵ слабее.

Разумеется, оценка размеров более «мутных» или «более прозрачных» пятен достаточно произвольна, сильно зависит от выбранного порога

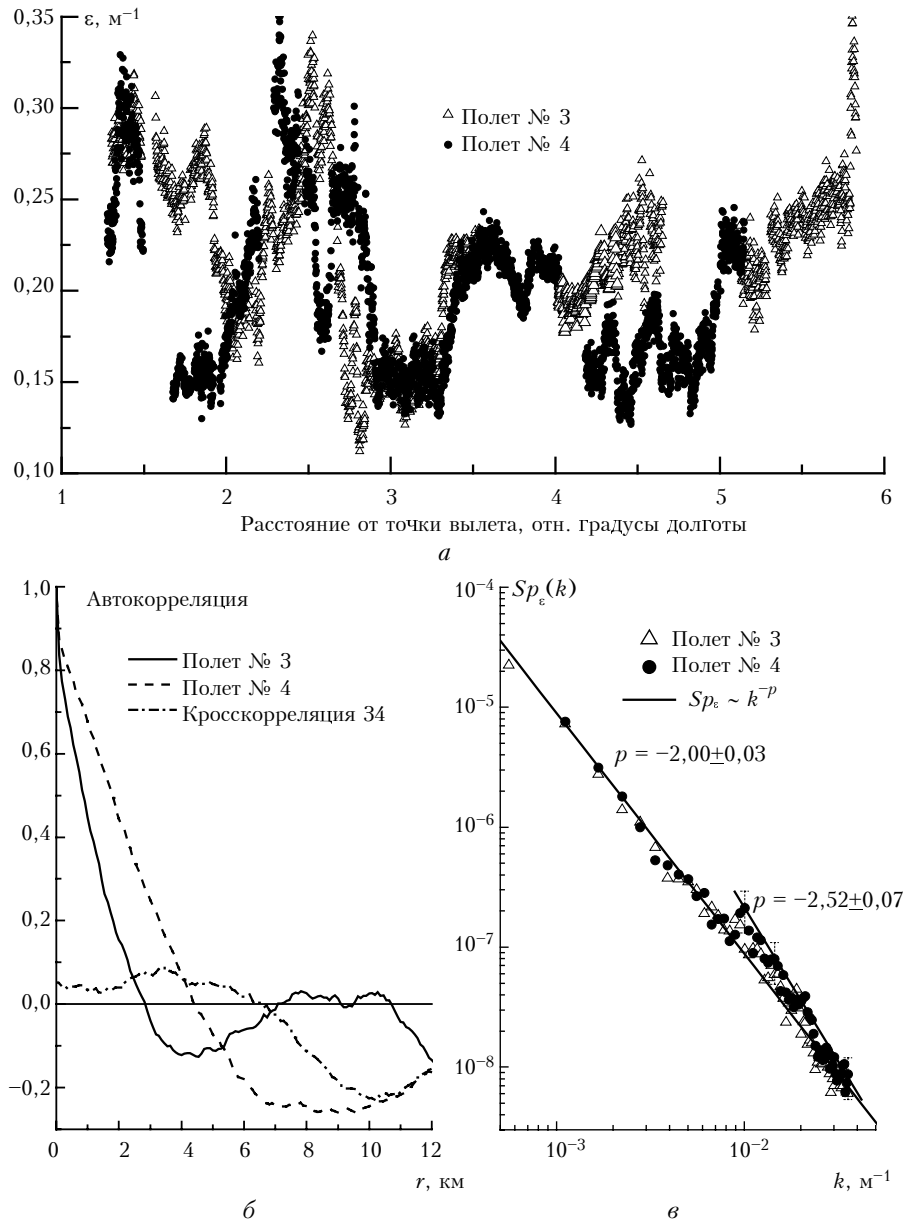


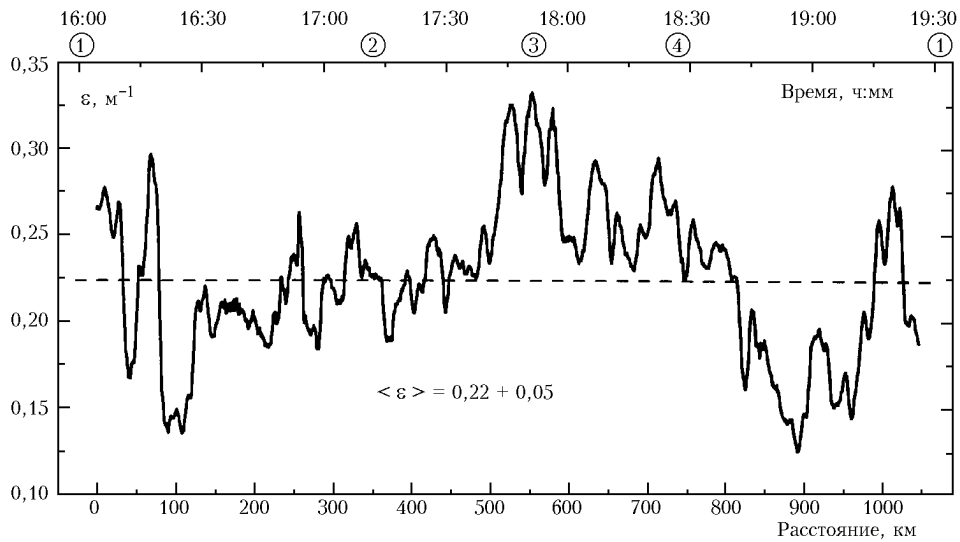
Рис. 6. Совместный участок полетов № 3 и 4: *a* – показатель ослабления ϵ ; *б* – авто- и кросскорреляционные функции для ϵ ; *в* – спектры флуктуаций значений ϵ для совместного отрезка обоих маршрутов

дискриминации. Если задаться для рис. 7,а порогом ϵ , равным его среднему значению $0,224 \text{ м}^{-1}$, то на отрезке полетного времени от 17:30 до 18:41 такое модулированное пятно повышенной мутности имеет длину примерно 379 км. В то же время участок с ϵ меньше среднего значения («пятно прозрачности» на временном участке 16:20–16:50) имеет длину около 160 км.

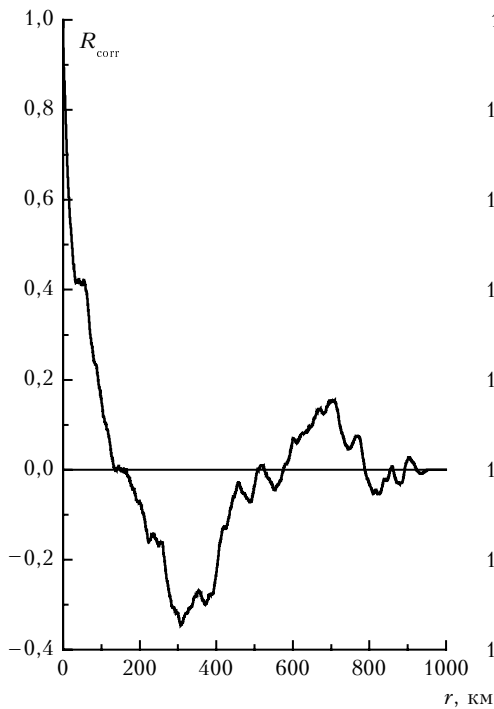
Для единообразия на рис. 7,б приведена $R_{\text{согг}}$ – автокорреляционная функция от $\epsilon(r)$ для всего полета. По нашей оценке, ступенька для $R_{\text{согг}} = 0,42$ является следствием процедуры «сшивания» нормализованных файлов, описанной в [1], она не изменяет общего поведения автокорреляции. Для принятого нами ранее порога $R_{\text{согг}} = 0,3$ радиус корреляции со-

ставляет 70 км. Для общепринятого $R_{\text{согг}} = 0,5$ он близок к 20 км, т.е. в любом случае он имеет порядок десятков километров. Напомним, что нами был выполнен всего один столь длинный маршрут.

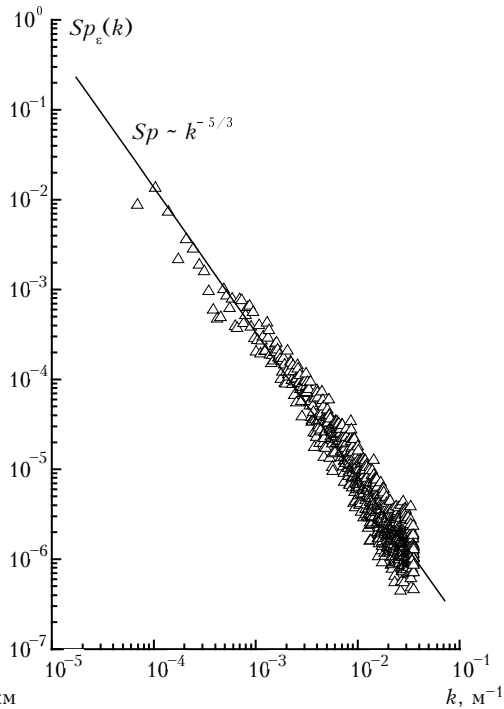
Характер стационарного процесса в данных пространственных масштабах подтверждает вид спектра (рис. 7,в), рассчитанного по совокупности всех реализаций. (Напомним, что самые низкочастотные процессы, т.е. тренды, уже удалены нами в процессе подготовки данных). Спектр аппроксимируется по всей полосе волновых чисел степенным законом с показателем $-5/3$, что характеризует стационарный процесс перекачки энергии, содержащейся в оптических неоднородностях, по инерционному интервалу длин волн в случайно-неоднородной среде.



a



б



в

Рис. 7. Непрерывный 1000-км участок полета № 3: а – показатель ослабления ε ; б – автокорреляционная функция для ε ; в – спектр флуктуаций для генеральной совокупности значений ε

В целом можно сказать, что для такой длинной выборки значений $\varepsilon(r)$ в диапазоне размеров оптических неоднородностей от 0,2 до 60 км неожиданно в их флуктуациях не наблюдается.

Таким образом, анализируя самолетные лидарные данные, полученные при полетах по длинным маршрутам, можно сделать следующие основные выводы.

На трассах длиной от 100 до 1000 км наблюдались участки линейными размерами от 0,5 до 160 км

с повышенными или пониженными относительно среднего значениями ε (пятна «мутности» или «прозрачности»). Среднеквадратические флуктуации ε для относительно длинных трасс составляют примерно 12%. (Все полеты выполнялись при отсутствии явно выраженных циклонических явлений). В то же время для отдельных пятен значения ε на их краях и в центре могут отличаться в среднем на 30%. Один раз наблюдалось 80%-е помутнение.

Ширина автокорреляционной функции флуктуаций значений ϵ чаще всего близка к нескольким километрам.

Спектр флуктуаций значений ϵ (после фильтрации процессов с размерами более 60 км) подчиняется в целом закону « $5/3$ », хотя иногда наблюдается

более быстрый спад для неоднородностей размерами менее 500 м.

1. *Коханенко Г.П., Пеннер И.Э., Шаманаев В.С.* Авиалидарные исследования морской акватории. Ч. 1. Короткие трассы // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 12. С. 1132–1136.

V.S. Shamanaev, I.E. Penner, G.P. Kokhanenko. **Studies of sea areas with airborne lidar. P. 2. Long paths.**

Signals of the airborne lidar, used in sensing of the sea water in the neighborhood of North Scotland, have been processed. During five flies, water areas of a length from 100 to 1000 km were studied. Horizontal distribution of the values of the radiative attenuation factor J is found to be irregular and having the «turbidity cells» and «transparency cells» ranged in size from 0.5–1 to several tens of kilometers. On the average, the standard deviation of ϵ is 10–15%, but in some individual cells it can reach 30 and even 80%. Energy spectrum of fluctuations of ϵ values in the cells with sizes less than 60 km follows, on the whole, the exponential law « $5/3$ ». The autocorrelation function halfwidth for ϵ is up to several kilometers.