

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 501.508.7:551.576.4

И.Э. Пеннер, В.С. Шаманаев

ЛИДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОТЫ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ НАД ОКЕАНОМ

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 15.06.99 г.

Для апробации подспутникового лазерного зондирования облаков проведены два самолетных эксперимента над акваторией Баренцева моря со сложными маршрутами. Общая длина маршрутов составила несколько сотен километров. Исследованы облачные поля на стадии их формирования и распада. Для флуктуаций высоты верхней границы облаков вычислены спектры мощности. Показано их несовпадение для различных типов облачности.

При исследованиях погоды и климата особое внимание уделяется процессам взаимодействия полей облачности и солнечной радиации. Немаловажную роль в этих процессах играет неоднородная пространственная структура облачных образований. Эффекты, обусловленные упрощенным представлением стохастической геометрии верхней границы облаков (ВГО), могут вызвать существенное смещение в результатах расчетов радиационных процессов [1]. Экспериментальная информация, полученная при лазерном зондировании облачности с борта самолета, дает возможность создать более реалистичные модели облачности. Для исследований подобного рода бортовой лидар является незаменимым инструментом в получении экспериментальных данных о ВГО с высоким пространственным разрешением (единицы метров) на облачных полях с характерными горизонтальными размерами от десятков метров до сотен километров. Более длинные разрезы труднодостижимы по чисто авиационным причинам. В процессе летных экспериментов по лазерному зондированию атмосферных образований и подстилающей поверхности, выполненных в течение нескольких лет над районами северных морей и территории Западной Сибири, нами накоплены массивы значений ВГО наиболее часто встречающейся слоисто-кучевой облачности нижнего яруса. Это позволяет провести статистически обеспеченный анализ пространственной структуры облачности данного типа.

Зондирование ВГО проводилось самолетными поляризационными лидарами типа «Светозар-3» и «Макрель» [2], которые в разное время устанавливались на самолетах-лабораториях ИЛ-14ФКМ и ИЛ-18ДОРР. Схема зондирования во всех случаях была одинаковой. Во время пролета самолета по заданному маршруту над облачным полем лидар зондировал вертикально вниз импульсами на длине волны 532 нм через люк в днище самолета. Системой регистрации лидара производилась запись либо полных профилей эхосигналов, возникающих при обратном рассеянии на несмещенной длине волны, либо нескольких характерных точек расстояния до верхней границы облаков, выбранных по заранее заданному алгоритму. Абсолютные значения высот ВГО получаются при вычитании этого расстояния из барической высоты полета, которая достаточно точно определяется штатным оборудованием самолета.

Длительность лазерного импульса излучения, определяющая предельное пространственное разрешение по высоте для всех типов лазеров, не превышала 20 нс. В зависимости от скорости самолета и частоты повторения лазерных импульсов пространственное разрешение по горизонтальной трассе составляло 5...20 м. Предполагается, что скорость самолета постоянна, а во время эксперимента (оно составляло от десятка минут до часа) пространственная структура облачных полей изменяется незначительно. Это следует из того, что среднее время стадий развития облачных полей типа *St-Sc*, таких как образование облаков, формирование облачности и ее эволюция, на порядки превышает время измерений и составляет от десятков часов до нескольких суток [3]. Такие предположения позволяют переходить от фактически частотно-временного представления измерений к разложению высоты облачной границы волновым числам $k_i = 2\pi/\lambda_i$, где λ – пространственные длины волн облачных движений.

Уравнения физики облаков показывают, что средняя высота обеих границ облака сложным образом связана с вертикальным градиентом температуры, высотой тропопазы, коэффициентом турбулентного обмена, удельными газовыми постоянными воздуха и водяного пара [3]. В общем случае колебания высоты облачной границы складываются из трех процессов: медленные систематические изменения, связанные с перестройкой поля влажности атмосферы; периодические изменения, заданные характером поля воздушных течений, и флуктуационные колебания турбулентного происхождения.

Однако единого понятия «граница облака» не существует, так как климатологи, авиаторы и специалисты по физике аэрозолей используют различные критерии. С помощью лидара расстояние до облака можно определить по нескольким (по крайней мере, пяти) критериям, относящимся к различным сторонам практической деятельности. Они приведены на рис. 1 на примере общего вида лидарного сигнала $F(r)$ [4]. Вполне естественно, что они дают смещение по абсолютной величине расстояния до облака, которое зависит от структуры границы облака. Но в то же время относительные изменения расстояний до облака, определенные по этим критериям, скоррелированы между собой с коэффициентом корреляции, близким к единице (0,98). Это

подтвердилось и при проведении натуральных экспериментов, в которых расстояние до верхней границы облачности определялось по началу и максимуму сигнала от облака, по превышению заданного порога амплитуды [5]. Поэтому во всех дальнейших измерениях для определенности использовался один критерий, основанный на превышении амплитуды сигнала над заданным порогом. Порог задавался по уровню сигнала от чистой атмосферы непосредственно над облаком. К нему добавлялось удвоенное среднеквадратическое значение фона, полученное на хвосте полезного сигнала, т.е. фактически из бесконечности. На рис. 1 это соответствует положению несколько дальше точки r_0 .

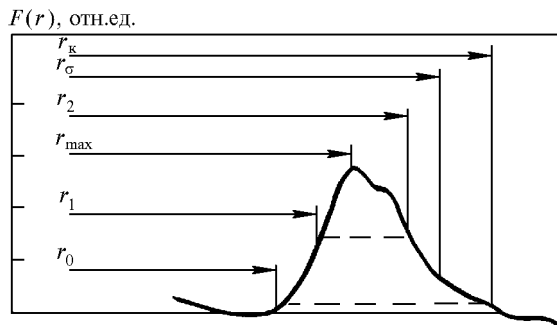


Рис. 1. Лидарное определение границы облачности. $F(r)$ – мощность лидарного сигнала от облака и предшествующей ему атмосферы. Точка r_0 – начальное превышение облачного сигнала над фоновым сигналом от атмосферы; r_1 – пороговое значение сигнала на переднем фронте сигнала; r_{max} – максимум сигнала, когда его производная равна нулю; r_2 – значение сигнала на заднем фронте сигнала; $r_с$ – глубина в облаке, когда показатель ослабления излучения достигает заданного значения, например $\sigma = 5 \text{ км}^{-1}$. Точка r_k – конечная глубина зондирования облака по некоторому порогу

Значения показателя рассеяния излучения в ВГО здесь не рассматриваются, чтобы не усложнять картину флуктуаций именно высоты облачности.

В процессе обработки данных мы использовали результаты зондирования в различное время, в разных географических точках. Кроме того, при зондировании разрывистых облачных полей и при скачках высоты между ними образуются существенные пробелы и разрывы первого рода различных значений высот ВГО. Поэтому одной из основных процедур предварительной подготовки таких данных к обработке статистическими методами является формирование непрерывной последовательности дискретных значений высот, полученных от различных облачных полей. Разумеется, при этом информация о наиболее крупномасштабных процессах и об абсолютных величинах скачков исчезает. Поскольку нас интересуют оценки статистических параметров пространственной структуры ВГО, то будет правомерным рассматривать только флуктуации высоты ВГО, безотносительно к их абсолютным значениям. Для этого преобразуем исходные выборки значений высот $\{H_n\}$ в новую последовательность $\{h_n\}$, имеющую нулевое выборочное среднее значение:

$$\{h_n\} = h(t_0 + n\Delta t) = H_n - \langle H_n \rangle, n = 1, 2 \dots N;$$

где n – текущий номер зондирующего импульса; t_0 – момент начала зондирования; $\Delta t = 1/f_l$ – период зондирования по трассе полета; $\langle H \rangle$ – выборочное среднее значение высоты в одной реализации, а N – конечное число значений высот в этой реализации. Здесь f_l – частота вспышек лазера.

Кроме того, в каждой реализации произведем нормировку на среднеквадратическое отклонение σ_h , полученное по оценке дисперсии σ_h^2 преобразованной выборки h_n . Это позволит сравнить в одной и той же шкале значений σ_h^2 плотности вероятности флуктуации высоты для разных облачных полей.

На следующем этапе выборочные средние значения $\langle H_n \rangle$ всех реализаций еще раз усреднялись по полю облачности конкретного дня зондирования. Вычисленная средняя высота H_0 конкретного поля облачности приведена в таблице. (Значения этих высот согласно морфологической классификации облаков [3] свидетельствуют о том, что исследуемые поля облачности относятся к одному семейству облаков нижнего яруса).

Исходные данные по зондированию верхней границы морской облачности самолетным лидаром

Дата	27.11.87	29.11.87
Район зондирования	Баренцево море	
Тип облачности	<i>St</i>	<i>Sc</i>
Количество облаков, балл	10	8–9
Пространственное разрешение по высоте Δh , м	4	4
Пространственное разрешение по трассе Δl , м	20	20
Средняя высота H_0 , м	1550	1800
Суммарная длина трассы зондирования L , км	500	380
Количество значений ВГО, N	22000	18000

Исходные данные могут содержать тренды или низкочастотные компоненты, предполагаемый период которых значительно больше длины реализации $\{H_n\}$. Соединение отдельных реализаций в непрерывную последовательность значений высот ВГО одного облачного поля при наличии разрывных трендов будет приводить в последующем анализе к значительным искажениям оценок плотности вероятности и спектральных характеристик. Удаление таких трендов из ограниченных по длине реализаций осуществлялось аппроксимацией исходных данных многочленным невысокого порядка. В основном удалялись линейные тренды в соответствии с классическими рекомендациями [6].

Подготовленная таким образом последовательность значений высот ВГО представляет собой случайный процесс флуктуации высоты ВГО с нулевым средним и единичной дисперсией. В нем удалены низкочастотные составляющие, не укладывающиеся в реально измеряемый пространственный масштаб длины отдельной реализации. Они также сглажены по самым высокочастотным компонентам, которые обусловлены выбросами, возникающими при определении границы облака в условиях низкого отношения сигнал-шум в эхосигналах. Все такие файлы данных проверялись на стационарность. Для этого строились эмпирические плотности вероятности распределения значений ВГО (вернее, их отклонений от нулевого среднего). Они аппроксимировались гауссоидами, и вычислялась среднеквадратическая невязка между измеренными и модельными распределениями.

В таблице приведены исходные данные по зондированию облачности в ходе нескольких длительных полетов. Здесь не рассматриваются полеты над кучевыми облаками. Самолет АН-30 позволяет летать только над *Cu med* – кучевыми облаками хорошей погоды. Но используемый в данной статье статистический анализ не может быть применен для

описания такой разрывной структуры, как верхняя граница кучевых облаков. Отметим, что еще в 1983 г. группа Спинхирна [7] проводила зондирование мощных кучевых облаков с борта самолета WB-57F при высоте его полета 19 км. Но опубликованные интересные результаты не были математически обработаны, а лишь представлены в виде двумерных профилей интенсивности эхосигнала и его деполаризации.

Полеты над океаном производились по сложным маршрутам, так как предназначались для отработки режимов подспутникового лазерного зондирования. На рис. 2 приведена штурманская прокладка каждого из двух океанических полетов в районе о-ва Медвежий Баренцева моря. Они производились с интервалом два дня, и для них были получены синхронные снимки со спутников Nimbus-7.

Такая схема полетов позволяет экономно по времени и расходу топлива произвести лидарную съемку относи-

тельно большой площади (в данном конкретном случае площадь составила примерно 300×300 км) облачного поля. Но основное назначение такого вида лидарной съемки – получение информации о двумерном распределении пространственной структуры ВГО. При благоприятных сопутствующих условиях, а именно при получении непрерывной записи с координатной привязкой значений высот неразрывного облачного поля, возможны корректное восстановление фрагмента поверхности облачного поля и оценка статистических характеристик двумерного распределения облачной границы. При менее благоприятных условиях (наличие существенных пропусков в непрерывной записи реализаций значений высот, наличие многоярусного разрывного поля облачности) можно перейти к обычному виду одномерных распределений, но в них уже будет вложена статистика по всем направлениям двумерного пространства.

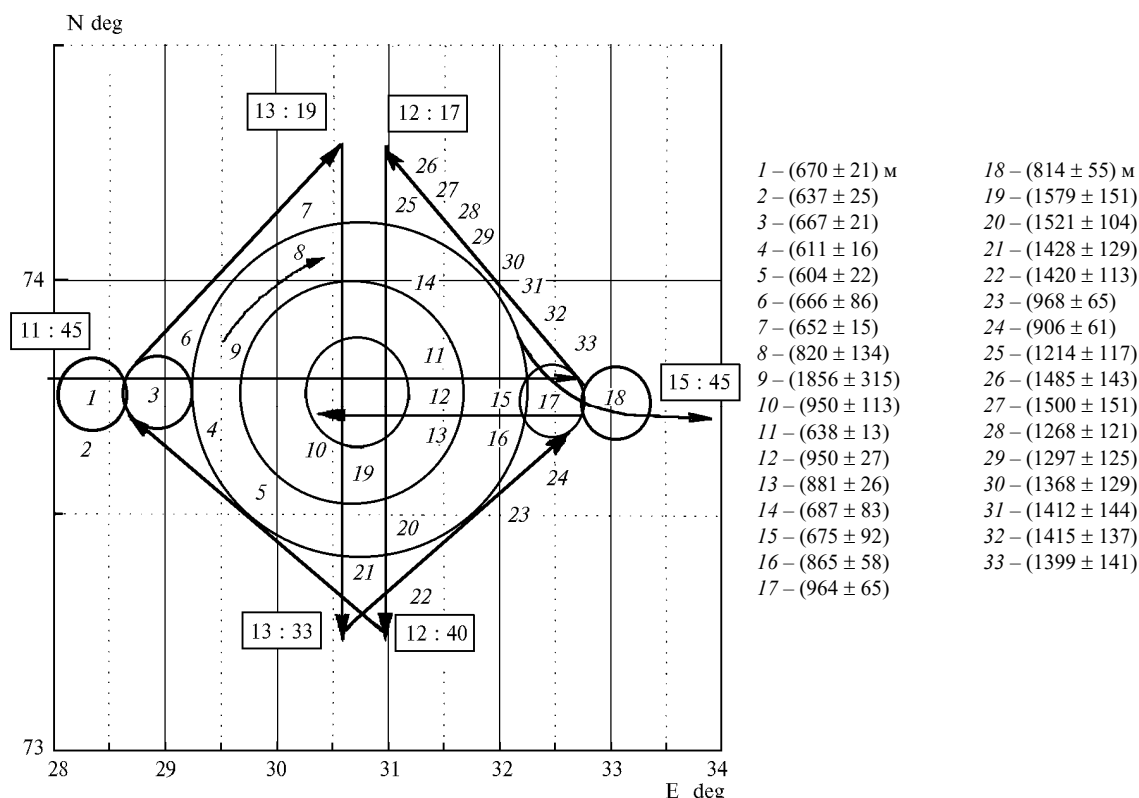


Рис. 2. Схема полетов над Баренцевым морем. В рамках – местное время прохождения узловых точек маршрута. Арабскими цифрами указаны участки маршрута, для которых справа приведены средние значения и среднеквадратические отклонения высот ВГО. Один градус долготы соответствует 30 км, один градус широты – 111 км

Разумеется, сильные полярные ветры существенно сносили самолет ИЛ-18ДОРР, и реальные галсы и циркуляции отличались от правильных геометрических фигур (реальные полетные фигуры, построенные по данным самолетной системы позиционирования, были нами приведены ранее в [8]). Высоты ВГО на отдельных участках облачного поля для полета 29.11.87 вынесены в таблицу, чтобы не загромождать рисунок. Таблица позволяет сделать вывод о наличии под самолетом 3–4 слоев облачности. Среднеквадратические разбросы значений ВГО для различных участков этого облачного поля изменялись от 15 до почти 150 м. Значение 315 м для 9-го участка было получено, когда луч лазера попадал в нижние слои сквозь разрывы в верхнем. В аналогичном эксперименте 27.11.87 наблюдался, как правило, один слой верхней границы облачности. В различных местах об-

лачного поля средние высоты ВГО варьировали от 1600 до 1800 м. Лишь в самом северном углу этого облачного квадрата средняя высота ВГО равнялась 1970 м для одного из измерительных файлов.

Необходимо отметить, что находившийся на борту самолета ИК-радиометр никак не реагировал на изменение ярусности.

На рис. 3 частично приведены измеренные профили ВГО для полета 27.11.87 г. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют трем симметричным маршрутным кольцам (см. рис. 2), имеющим диаметры приблизительно 15, 35 и 60 км. Здесь имеются как тренды, так и разрывы в измерительных файлах.

В дальнейшем числом дня и месяца проведения эксперимента будут маркироваться названия конкретных результатов (файлы). Тип облачности и балл покрытия небосвода

определялись визуально с борта самолета, а также по картам синоптической погоды и фотографиями с космических спутников, что дает возможность определять не только тип облачности, но и характер динамического состояния и условную стадию развития данного облачного поля. Так, было определено, что зондирование 27.11.87 проводилось на краю центральной части фронтальной облачной полосы, отходящей от арктического циклона, который находился в стадии

развития. А 29.11.87 этот же циклон находился в стадии заполнения, т.е. облачность начинала уже разрушаться. Район зондирования приходился на тыловую часть циклона, в которой образовался облачный вихрь. В таких условиях, особенно над водной поверхностью, создаются благоприятные условия для развития конвекции. Это отмечается наличием в разорванной слоистой облачности кучевых облаков.

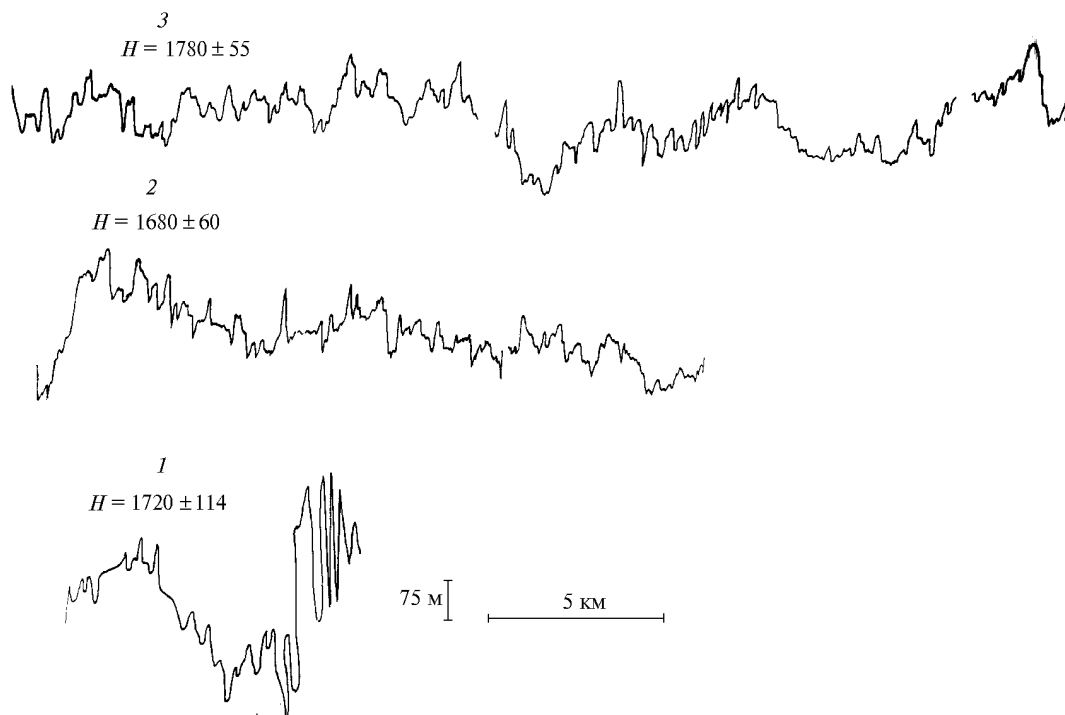


Рис. 3. Пример записи высоты ВГО для участков трех концентрических окружностей на рис. 2 для полета 27.11.87

В анализе динамических свойств важную роль играет оценка спектральной плотности — $Sp_n(f)$, описывающая частотный состав процесса. Описание процесса флуктуаций высоты ВГО, полученных по данным лазерного зондирования, будем вести в терминах пространственных длин волн λ облачных движений, а спектральную плотность определять соответственно по пространственным волновым числам $k = 2\pi/\lambda$. Вычисление спектральной плотности основано на финитном преобразовании Фурье исходного стационарного случайного процесса $\{h_n(\lambda)\}$, определенного на конечном интервале $[\lambda_0 < \lambda < L]$. Здесь $\lambda_0 = 2\Delta l$ — минимальная пространственная длина волны, задаваемая пространственным разрешением в реализации; $L = N\Delta l$ — максимальная длина волны, ограниченная конечным числом N длины выборки из реализации. Коэффициенты Фурье вычисляются с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) по Кули-Тьюки с определением числа анализируемых ординат по основанию 2, и всегда $N = 2^p$ [6]. Для подавления просачивания через боковые максимумы использовано временное окно Ханна. Для получения устойчивой спектральной оценки и сглаживания ее значений используется расчет по перекрывающимся отрезкам, когда исходная реализация делится на ряд перекрывающихся на 50% подынтервалов. Погрешность оценки спектральной плотности ϵ , вычисленной таким методом, равняется $1/\sqrt{n_d}$ и для наших экспериментов при разбивке на $n_d \cong N/100$ интервалов в среднем составляет 10–20%.

Рассмотрим флуктуационную структуру ВГО для случаев зондирования океанической облачности по схеме рис. 2.

На рис. 4 и 5 приведены оценки спектральной плотности процессов флуктуации высоты ВГО по последовательности реализаций $\{h_n\}$, полученных при зондировании 27 и 29.11.87 облачных образований одного района, но в разной стадии развития. Они характеризуют в целом динамическое состояние и пространственную структуру облачного поля. Так, для поля слоистой облачности от 27.11, находящегося в стадии развития (как было указано выше), имеем на рис. 4 спектр мощности, весьма близкий к классическому закону изменения флуктуаций по закону « $-5/3$ ». Можно утверждать, что он выполняется в инерциальном интервале пространственных длин волн $0,04 < \lambda < 10$ км. При всем имеющемся разбросе они с хорошей кучностью ложатся на аппроксимационную прямую.

Рис. 5 соответствует 29.11.87, т.е. второму дню зондирования. Облачность имеет 8 баллов, а не 10, как в предыдущем случае, и это уже слоисто-кучевая система, характеризующаяся начавшимся распадом облачного поля. Здесь закон « $-5/3$ » уменьшения мощности флуктуаций имеет меньший диапазон применимости. Снизу этот диапазон ограничен изломом на длинах волн порядка 100 м, после которых начинается более быстрый спад флуктуаций. Он обусловлен физической деструкцией облачных элементов всего распадающегося облачного поля. Сверху он ограничен явно выделяемым внешним масштабом (λ порядка 2–4 км) повторяемости пространственной структуры присутствующих в поле облачности облаков конвективного типа.

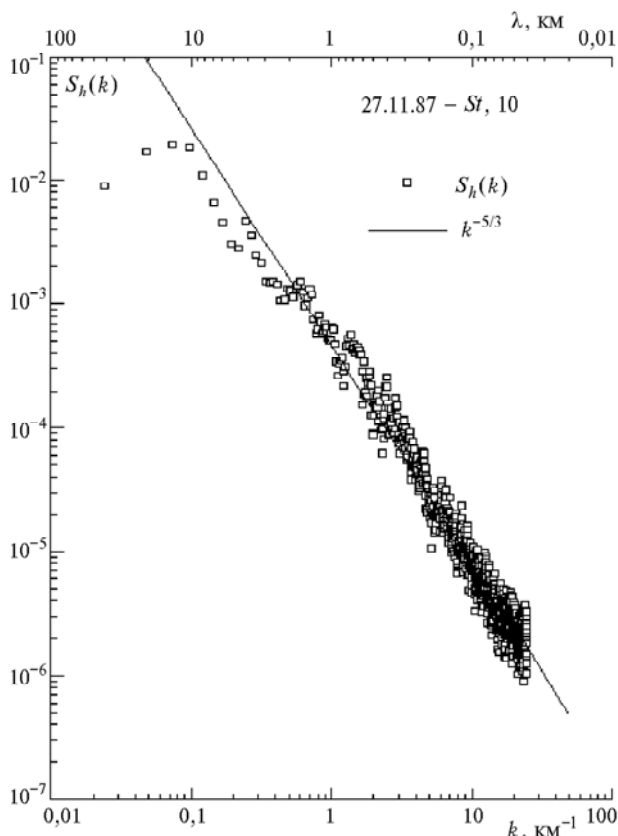


Рис. 4. Спектр флуктуаций высоты ВГО океанических *St* облаков развивающегося типа

Обратим внимание на то, что весь спектр $S_h(k)$ в этом случае более изрезан. Наши оценки погрешности вычислений $S_h(k)$ говорят о том, что эти локальные экстремумы являются значимыми и, следовательно, в структуре ВГО появились некие периодические составляющие.

Таким образом, явные различия в поведении анализируемых компонентов позволяют сделать вывод, что с помощью данной методики зондирования можно диагностировать различающиеся облачные поля. Это весьма полезно с точки зрения проведения подспутниковых лидарных экспериментов.

1. Попов С.Ю., Титов Г.А. Средние потоки солнечной радиации слоистой облачности со случайной верхней границей // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 3. С. 201–223.
2. Абрамочкин А.И., Занин В.В., Пеннер И.Э., Тихомиров А.А., Шаманаев В.С. Самолетные поляризационные лидары для ис-

I.E. Penner, V.S. Shamaev. Lidar Investigation of Clouds Top Height above Ocean.

Two aircraft experiments along complex routes above the Barents Sea were conducted aiming subsatellite laser sensing of clouds. Total length of the routes was several hundreds of kilometers. Cloud fields were investigated at the stages of their formation and degradation. Power spectra are evaluated for fluctuation of the clouds top height. Their in coincidence at various types of cloudiness is shown.

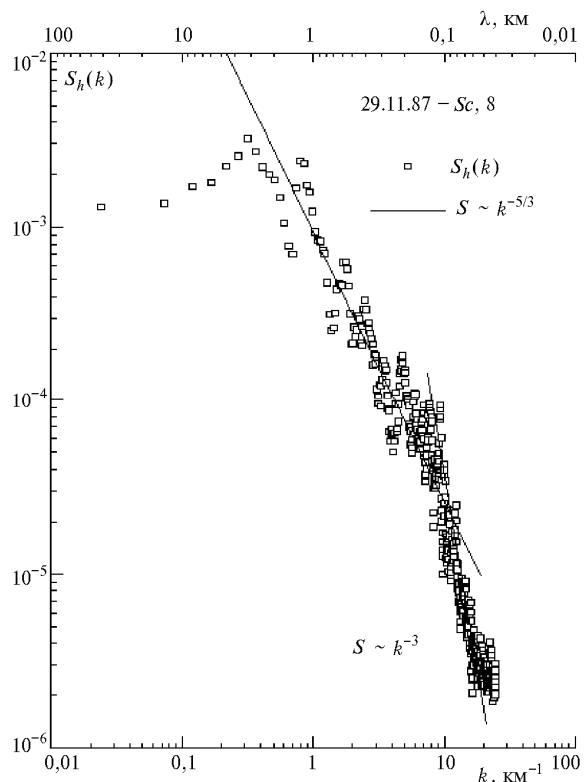


Рис. 5. Спектр флуктуаций высоты ВГО океанических *Sc* облаков распадающегося типа

следования атмосферы и гидросферы // Оптика атмосферы и океана. 1988. Т. 1. № 2. С. 92–96.

3. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1976.
4. Шаманаев В.С. К оценке коэффициента рассеяния излучения на границе облака // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 5. № 7. С. 702–707.
5. Пеннер И.Э., Самохвалов И.В., Шаманаев В.С., Шнайдер И.А. Зондирование граничной облачности облаков // 9 Всесоюз. симп. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы: Тез. докл. Ч. 1. Томск, 1987. С. 212–216.
6. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.
7. Spinhirne J.D., Hansen M.Z., Simpson J. The structure and phase of cloud tops as observed by polarization lidar // J. of Climate and Applied Meteorology. 1983. V. 22. № 8. P. 1319–1331.
8. Пеннер И.Э., Шаманаев В.С. Двумерное пространственное зондирование верхней границы облачности // 10 Всесоюзный симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы: Тез. докл. Ч. 1. Томск, 1989. С. 139–143.