

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.593.13:53.082.532

Г.М. Гречко¹, А.С. Гурвич¹, В. Кан¹, С.А. Савченко², А.И. Пахомов³

Наблюдения атмосферных мерцаний звезд с орбитальных станций «Салют-7» и «Мир»

¹ *Институт физики атмосферы РАН,*

² *Институт космических исследований РАН, г. Москва*

³ *Ракетно-космическая корпорация «Энергия», г. Королев Московской области*

Поступила в редакцию 25.06.2001 г.

Подводятся итоги проводившихся в 1982–1993 гг. на орбитальных станциях «Салют-7» и «Мир» наблюдений заходов звезд с помощью фотометра ЭФО-1. Основная цель этих экспериментов заключалась в исследовании мелкомасштабной структуры неоднородностей плотности и температуры в стратосфере по данным измерений мерцаний звезд. Приводятся общая характеристика сеансов наблюдений, краткое изложение результатов исследования спектров мерцаний. Измерения с прибором ЭФО-1 позволили обнаружить и исследовать анизотропные неоднородности плотности слоистого типа. Получены оценки коэффициента анизотропии неоднородностей. Восстановлены вертикальные спектры флуктуаций плотности и температуры в стратосфере. Эти спектры согласуются с результатами контактных измерений температуры на баллонах и с моделью насыщенных внутренних волн в диапазоне вертикальных масштабов 0,1 – 1 км. Измерения показали наличие характерного вертикального масштаба порядка нескольких десятков метров в вертикальных спектрах анизотропных температурных неоднородностей в стратосфере.

Введение

Оптическое и радиопросвечивание при оккультациях естественных и искусственных источников излучения атмосферами планет и их спутников является одним из наиболее перспективных методов дистанционного зондирования параметров и состава этих атмосфер. Достоинства этого метода – высокая точность и относительная простота реализации – были успешно продемонстрированы в многочисленных экспериментах по радиопросвечиванию атмосфер планет Солнечной системы с помощью межпланетных космических станций и оптическому просвечиванию в наземных астрономических наблюдениях оккультаций звезд планетными атмосферами [1, 2].

Регулярное спутниковое просвечивание земной атмосферы в оптическом диапазоне проводилось с помощью спектрометра SAGE-II [4] для изучения газового и аэрозольного состава по экстинкции света в атмосфере. Приемная щель спектрометра в этих экспериментах «вырезала» только часть изображения Солнца. При этом принимаемый световой поток через щель спектрометра не подвержен влиянию рефракции [5]. Для исследования рефракции света с борта орбитальных станций проводились фото- и киносъемка восходов и заходов Солнца [3] и наблюдения мерцаний звезд. При фото- и киносъемке всего диска Солнца рефракция проявляется в регулярной сплюснутости изображения Солнца и случайных деформациях его контура.

Звезды, в отличие от Солнца, при наблюдении со спутников их заходов за атмосферу Земли не разрешаются приемной аппаратурой, и их можно считать точечными источниками. Регулярное уменьшение плотности воздуха в атмосфере (и, следовательно, индекса рефракции) с высотой, аналогичное действию отрицательной линзы, приводит к регулярному ослаблению светового потока, прошедшего через приемную апертуру. Случайные неоднородности плотности – слабые фокусирующие и дефокусирующие

«линзы» – приводят к случайным вариациям измеряемого светового потока, или мерцаниям. Из-за быстрого, почти экспоненциального, убывания плотности с высотой основной вклад в мерцания вносят неоднородности, локализованные в области вблизи перигея луча, и размеры этой области существенно меньше, чем расстояние от нее до приемного спутника. Скорость спутника достаточно велика, чтобы можно было пользоваться гипотезой «замороженности» распределения плотности для пересчета статистических характеристик наблюдаемых временных реализаций в пространственные [6].

По этим характеристикам можно рассчитать соответствующие статистические характеристики неоднородностей показателя преломления n или индекса рефракции $N = n - 1$ воздуха. В оптическом диапазоне относительные флуктуации индекса рефракции равны относительным флуктуациям плотности или, с обратным знаком, – относительным флуктуациям температуры, если пренебречь флуктуациями давления. Основу для расчета характеристик флуктуаций плотности по данным измерений мерцаний составляет теория распространения света в случайно-неоднородной среде. Для затменных спутниковых экспериментов удобным и часто используемым приближением является приближение эквивалентного фазового экрана, аппроксимирующего воздействие атмосферы на распространяющееся в ней излучение. Применимость этого приближения обусловлена следующими обстоятельствами: во-первых, как уже отмечалось выше, мерцания определяются относительно небольшой областью атмосферы вблизи перигея луча и можно считать, что далее свет распространяется в свободном пространстве; во-вторых, для высот перигея луча выше 15–20 км мерцания на выходе из атмосферы малы и их усиление происходит при распространении за атмосферой в свободном пространстве [7]. При этом в случае, когда в точке наблюдения реализуется режим слабых мерцаний (индекс мерцания меньше единицы),

существуют простые соотношения, связывающие спектр мерцаний с трехмерным спектром флуктуаций показателя преломления атмосферы [7–10, 15].

В 1982 г. на орбитальной станции «Салют-7» были начаты наблюдения мерцаний звезд через атмосферу Земли с помощью фотометра ЭФО-1 [11], целью которых было исследование тонкой структуры плотности воздуха в стратосфере. Перед тем как станция «Салют-7» завершила свою работу на орбите в 1986 г., фотометр ЭФО-1 был перевезен на станцию «Мир» и измерения продолжались до 1993 г. Основные результаты анализа данных ЭФО-1 приведены в работах [11–22]. Здесь мы подводим итоги многолетних экспериментов с фотометром ЭФО-1. В статье приводится общая характеристика сеансов наблюдений и основных параметров экспериментов, сообщаются неопубликованные ранее результаты, отмечены закономерности и особенности в характере наблюдавшихся мерцаний звезд. Задача работы заключается также в том, чтобы представить вместе разрозненные в разных публикациях основные результаты и дать им то понимание, которое мы имеем в настоящее время по прошествии 15 лет со времени первых публикаций. Кроме того, внимание уделено зарегистрированным космонавтами в ряде наблюдений, но не упомянутым ранее фактам, которые являются аномальными в представлениях стандартного состояния атмосферы.

Работа с фотометром ЭФО-1 позволила не только получить ряд интересных научных результатов, но и сформулировать принципиальные требования к конструкции нового специализированного фотометра для наблюдений мерцаний звезд, которые были успешно воплощены в приборе ЭФО-2 [23–25].

1. Фотометр ЭФО-1. Характеристика сеансов наблюдений

Фотометр ЭФО-1 был сконструирован в Астрономическом институте Чехословацкой Академии наук И. Захаровым и Л. Неужилом [11]. Основная задача фотометра заключалась в определении оптической плотности, размеров и временных вариаций слоя, образующегося в результате сгорания метеоритов на высотах около 100 км, по экстинкции излучения звезд во время их заходов.

После доработки, заключающейся в расширении частотной полосы аналогового усилителя приемника до 100 Гц, прибор позволил также проводить наблюдения мерцаний звезд, вызванных флуктуациями показателя преломления, когда лучи проходили в атмосфере на высотах от 40–45 до 15 км. Диаметр приемного объектива фотометра составляет 90 мм с фокусным расстоянием 500 мм. Поле зрения измерительного канала равно 10 угл. мин, визуального канала – 3°.

В качестве приемника использован фотоумножитель Tesla ГИПК-50 с фотокатодом S-11 супер с последующим усилителем, регулировка величины фототока (чувствительности) производилась изменением напряжения на катоде. В фотометре предусмотрена возможность использования светофильтров, центрированных на максимум квантовой эффективности фотокатода на длине волны 450 нм: узкополосного фильтра F_1 с общей полосой 50 нм по половинному пропусканию и F_2 с полосой 180 нм, а также прием сигнала без светофильтра в открытом окне фильтродержателя. Фотометр крепился к иллюминатору орбитальной станции на карданном подвесе, с помощью которого космонавт производил ручное наведение и гидирование звезды.

В начале каждого сеанса производилась подстройка чувствительности приемника по выбранной звезде, когда она наблюдалась вне атмосферы при высотах перигея луча более 100 км. Измерения фототока от звезды при ее заходе за атмосферу производились с высот около 100 км и до высот примерно 15 км, где космонавт терял звезду из-за ослабления света в атмосфере. В качестве выходных данных по телеметрии на регистрацию выводились значения фототока и напряжения на фотокатоде. Динамический диапазон данных определялся возможностями использованной линии телеметрии и составлял 256 уровней. Для того чтобы перекрыть возможно больший диапазон исследуемых высот, при подстройке чувствительности приемника средний уровень вакуумного фототока от звезды подбирался равным примерно 0,5–0,7 от верхней границы динамического диапазона, и это приводило к ограничению сильных выбросов сигнала. Для каждого сеанса наблюдений проводился расчет баллистических данных от времени: координат и скорости орбитальной станции, координат перигея луча и его высоты в атмосфере. При расчете высоты перигея луча h_p использовалась модель стандартной атмосферы для учета атмосферной рефракции.

Эффективная толщина атмосферы вдоль луча визирования составляет несколько сотен километров, а расстояние от перигея до орбитальной станции около 2100 км. В зависимости от ориентации полюса орбиты спутника относительно направления на звезду могут быть реализованы различные траектории захода звезды в плоскости перигея (плоскости, перпендикулярной лучу и проходящей через точку перигея). Проводя наблюдения при разных ракурсах, можно зондировать атмосферу по различным направлениям – от вертикального $\alpha = 0^\circ$ до горизонтального $\alpha = 90^\circ$, где α – угол между касательной к проекции траектории движения звезды на плоскость перигея и локальной вертикалью. Для уменьшения влияния дробового шума фотоумножителя наблюдения проводились с наиболее яркими звездами.

Часть наблюдений проводилась с использованием светофильтров. Несмотря на ограничение принимаемого светового потока и возрастание роли шума, использование светофильтра позволяло уменьшить эффект хроматической дисперсии рефракции в атмосфере. Этот эффект заключается в том, что лучи света с более короткими длинами волн испытывают более сильную рефракцию в атмосфере и поэтому в точку наблюдения одновременно попадают лучи разного цвета, пришедшие с разных высот h_p . Характерный масштаб хроматического разнесения лучей по вертикали Δh_c зависит от ширины спектра излучения, формирующего фототок, и высоты h_p . Эффективный спектр излучения определяется спектральными характеристиками излучения звезды, пропускания атмосферы, светофильтра и квантовой эффективности фотоумножителя. В силу асимметрии (из-за хроматизма лучи разнесены только по вертикали) этот эффект по-разному влияет на мерцания, вызванные изотропными и анизотропными неоднородностями, при разных углах зондирования. Более подробно влияние хроматизма на мерцания рассмотрено ниже в разделе, где анализируются спектры мерцаний (см. также [25]). В частности, при вертикальных заходах усреднение принятого сигнала по высотному масштабу Δh_c приводит к сглаживанию мелкомасштабных мерцаний. Эффект хроматизма (тем более значительный, чем шире полоса длин волн принимаемого света и меньше высота зондирования) несуществен для наблюдений мерцаний с ЭФО-1 на больших высотах $h_p > 35$ –40 км, но становится одним из определяющих для меньших высот.

В таблице приведен список 47 проанализированных сеансов наблюдений из числа тех, что были проведены в течение 1982–1993 гг. Первые 10 сеансов были проведены на ОС «Салют-7», остальные на ОС «Мир». Яркость звезд приведена в звездных величинах m_v , f_s – частота выборки сигнала. Координаты точки перигея и значения углов α приведены для высоты перигея 30 км. В графе, где даны названия звезд,

звездочками отмечены сеансы, в которых звезда наблюдалась при углах $\vartheta \leq 18^\circ$ от полюса орбиты. В таких наблюдениях звезда не заходила за горизонт Земли, а, опустившись до минимальной высоты h_{\min} (эти высоты приведены в скобках), снова восходила. Для этих сеансов координаты перигея приведены для района с h_{\min} . Наблюдения, которые проводились без светофильтров, отмечены 0.

Сеансы наблюдений

№ п/п	Дата	№ витка	Источник	m_v	Координаты перигея		f_s , кГц	Фильтры	α , град
					с. ш.	в. д.			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	30.10.82	–	Денеб	1,26	2	173	0,003	F_1	—
2	30.10.82	–	Вега	0,04	20	159	0,003	F_1	—
3	30.10.82	–	Арктур	–0,06	57	110	0,003	F_1	—
4	05.11.82	–	Денеб	1,26	–14	133	0,012	0	—
5	11.09.85	9591	Арктур	–0,06	65	97	1,6	0	56,1
6	21.09.85	9743	Вега	0,04	–11	218	0,16	0	34,3
7	21.09.85	9744	Вега	0,04	–11	195	0,16	0	34,2
8	21.09.85	9746	Сатурн	0,8	22	123	0,16	0	82,1
9	21.09.85	9747	Сатурн	0,8	23	99	0,16	0	82,8
10	06.11.85	0470	Арктур	–0,06			1,6	0	86,3
11	05.10.87	9350	Ахернар	0,53	32	113	1,3	0	86,54
12	06.10.87	9366	Ахернар	0,53	32	103	1,3	0	87,47
13	08.10.87	9397	Арктур	–0,06	69	105	1,3	0	–
14	08.10.87	9398	Арктур	–0,06	70	85	1,3	0	85,72
15	09.10.87	9413	Арктур	–0,06	69	101	1,3	F_2	84,54
16	25.11.87	0158	Канопус	–0,73	34	155	1,3	F_1	82,9
17	2.02.88	1244	Канопус	–0,73	34	132	1,3	F_1	80,9
18	2.02.88	1246	Канопус	–0,73	34	87	1,3	F_1	81,52
19	3.02.88	1260	Канопус	–0,73	34	125	1,3	F_1	83,0
20	3.02.88	1261	Канопус	–0,73	34	102	1,3	F_1	83,28
21	3.02.88	1262	Канопус	–0,73	34	79	1,3	F_1	83,16
22	4.02.88	1275	Канопус	–0,73	34	141	1,3	F_1	83,95
23	4.02.88	1276	Канопус	–0,73	34	118	1,3	F_1	84,0
24	4.02.88	1277	Канопус	–0,73	34	95	1,3	F_1	84,05
25	5.02.88	1291	Канопус	–0,73	34	135	1,3	F_1	85,56
26	5.02.88	1292	Канопус	–0,73	34	112	1,3	F_1	85,77
27	5.02.88	1293	Канопус	–0,73	34	89	1,3	F_1	85,88
28	4.04.88	2223	Сириус	–1,43	45	117	1,3	0	55,42
29	4.04.88	2224	Сириус	–1,43	45	96	1,3	0	59,54
30	5.04.88	2238	Сириус	–1,43	44	137	1,3	F_1	62,94
31	5.04.88	2239	Сириус	–1,43	43	114	1,3	F_1	62,94
32	5.04.88	2240	Сириус	–1,43	43	91	1,3	F_1	63,82
33	5.04.88	2241	Сириус	–1,43	43	68	1,3	F_1	63,87
34	6.04.88	2254	Сириус	–1,43	42	132	1,3	F_1	64,91
35	28.02.89	7416	Капелла * (22,8 км)	0,09	–10	276	0,146	F_1	–
36	28.02.89	7417	Капелла * (29,8 км)	0,09	–10	244	0,146	F_1	–
37	28.02.89	7418	Капелла * (37,0 км)	0,09	–10	221	0,146	F_1	–
38	19.11.89	3542	Ахернар * (11,8 км)	0,53	30	101	1,3	0	–
39	19.11.89	3543	Ахернар * (12,6 км)	0,53	30	76	1,3	0	–
40	6.08.91	3299	Вега	0,04	–12	295	0,146	0	87,0
41	6.08.91	3300	Вега	0,04	–11	273	0,146	0	87,3
42	16.08.91	3459	Канопус	–0,73	5	231	0,146	0	86,8
43	16.08.91	3460	Канопус	–0,73	4	206	0,146	0	86,7
44	19.10.92	2157	Канопус * (35,0 км)	–0,73	23	306	1,0	0	–
45	19.10.92	2158	Канопус * (29,8 км)	–0,73	23	282	1,0	0	–
46	16.12.93	762	Канопус * (46,8 км)	–0,73	24	146	1,3	0	–
47	16.12.93	763	Канопус * (51,8 км)	–0,73	25	123	1,3	0	–

Из приведенных данных видно, что измерениями были охвачены все сезоны, широта подперигейной точки изменялась от 11° ю. ш. до 70° с. ш., а подстилающая поверхность – от океанов до горных массивов. Измерения проводились под различными ракурсами с углами захода α от 35 до 90° .

2. Методика обработки данных

На рис. 1 в качестве примера показана запись фототока, полученная при наблюдении захода Канопуса от

3.02.88 г. (№ 21 по нумерации таблицы). По оси абсцисс отложена высота перигея луча, по оси ординат – значения фототока, нормированные на его внеатмосферную величину. На этом же графике показан участок записи дробового шума длительностью 4 с, полученный на высоте h_p около 100 км, а ниже – отдельные фрагменты записи, соответствующие перепаду высот 1 км. Диапазон длин волн принимаемого света в этом сеансе определялся, главным образом, полосою пропускания использовавшегося светофильтра F_1 . При

заходе звезды средний уровень сигнала уменьшается и начинают проявляться атмосферные мерцания. Так, например, при $h_p = 46-47$ км (запись 3) среднеквадратические значения мерцаний сравнимы со среднеквадратическими значениями дробового шума в измеренной полосе частот. При дальнейшем погружении луча в атмосферу мерцания усиливаются (запись 4), достигая максимума на высотах

около 25 км (запись 5). В этой области отдельные сильные выбросы сигнала ограничивались из-за недостаточности динамического диапазона телеметрии. Влияние хроматической дисперсии показателя преломления на рис. 1 визуально можно заметить по сглаживанию высокочастотных мерцаний, и это хорошо видно по записи 6.

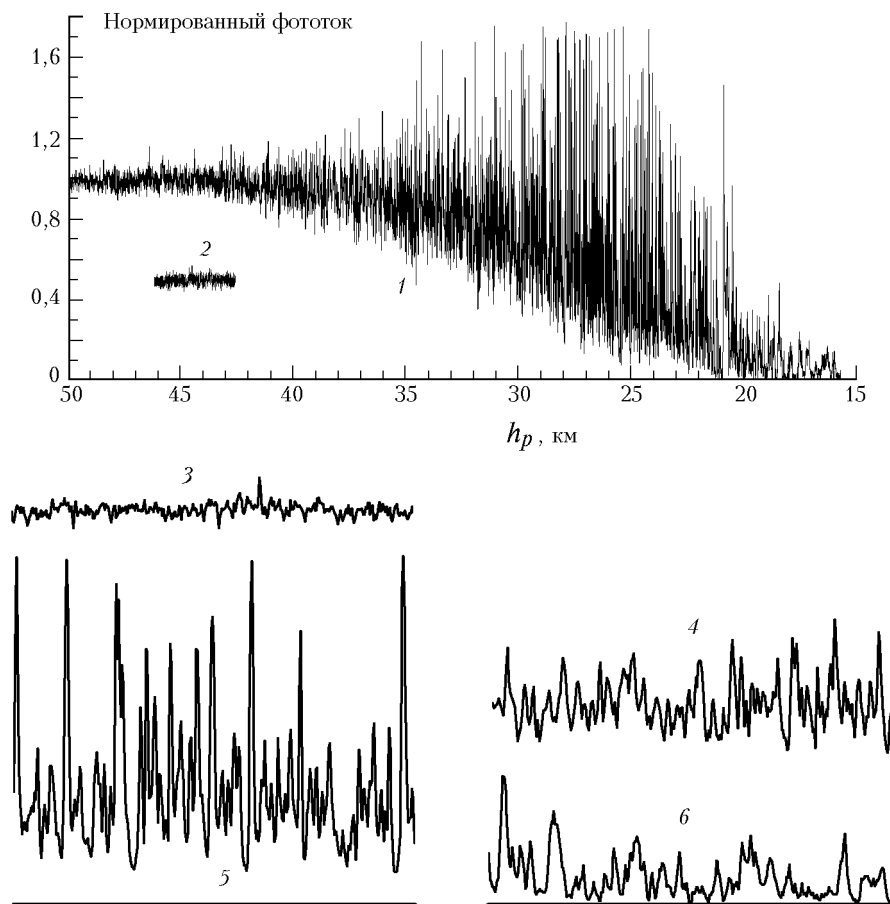


Рис. 1. Запись фототока: 1 – значения фототока, нормированные на внеатмосферную величину, при заходе Канопуса в сеансе наблюдений № 21; 2 – дробовый шум; 3–6 – участки реализаций записи фототока: 3 – высота 46–47; 4 – 35–36; 5 – 26–27; 6 – 19,5–20,5 км

Приведенная запись представляет собой типичную картину высокочастотных (мелкомасштабных) мерцаний света на случайных неоднородностях показателя преломления, с сильными выбросами, значительно превышающими не только среднюю интенсивность, но и вакуумное ее значение, и глубокими замираниями сигнала. Это связано с тем, что мерцания, вызванные атмосферной турбулентностью, определяются самыми мелкомасштабными неоднородностями показателя преломления (в геометрооптическом приближении – второй производной от корреляционной функции флуктуаций показателя преломления [26]). Ослабление же сигнала, связанное с экстинкцией в атмосфере – с молекулярным и аэрозольным рассеянием и поглощением, определяется распределением самой концентрации ослабляющих компонент на луче зрения, а не ее производной, и эффекты экстинкции тем значительнее, чем больше масштабы этих компонент. Кроме того, рассеяние и поглощение приводят только к ослаблению приходящего на приемник излучения, а случайная рефракция, как видно из записи, приводит и к случайным фокусировкам и дефокусировкам. Исходя из этого, предполагалось,

что высокочастотная (мелкомасштабная) структура измененного сигнала с вертикальными масштабами порядка километра и меньше обусловлена случайным полем флуктуаций показателя преломления, а компоненты атмосферной экстинкции вносят свой вклад в регулярное (среднее) изменение сигнала с характерными масштабами по вертикали в несколько километров и больше.

Высотная привязка измеренных данных мерцаний производилась по баллистическим данным с последующей корректировкой по среднему пропусканию на некоторой реперной высоте, в качестве которой было выбрано 30 км. Для этого измеренные профили среднего пропускания сдвигались по времени до совпадения измеренного пропускания на высоте 30 км с расчетом по модели стандартной атмосферы. Невязка по абсолютной привязке времени могла составлять несколько секунд в отдельных сеансах.

Основное внимание при обработке данных уделялось расчету спектров мерцаний. Частотные спектры мерцаний рассчитывались по программе быстрого преобразования Фурье по участкам реализаций, соответствующих высотному интервалу 3–4 км. Сглаживание полученных оценок спек-

тральной плотности мощности мерцаний производилось внутри прямоугольного окна постоянной добротности $Q=2$. Для контроля частотной характеристики приемного тракта рассчитывались спектры дробового шума, которые с соответствующей нормировкой представляют собой сквозной коэффициент передачи по мощности всего приемного тракта. Эта передаточная характеристика использовалась для корректировки спектров мерцаний на высоких частотах до 100 Гц [14]. Кроме того, спектры дробового шума использовались для вычитания шумового вклада из измеренных спектров флуктуаций фототока для получения собственно спектров мерцаний.

Частотные спектры мерцаний пересчитывались в одномерные пространственные спектры в предположении о «замороженности» пространственного распределения поля показателя преломления за измеряемые времена. Для мерцаний существенным является скорость перемещения точки перигея в перпендикулярном лучу направлении. Граница исследуемых масштабов мерцаний со стороны крупных масштабов определяется длиной используемого участка реализации. Мелкомасштабная граница определяется суммарным эффектом следующих факторов: дробовым шумом, верхней границей частотной характеристики приемника, влиянием хроматизма [14].

3. Среднее пропускание света в атмосфере

На рис. 2 приведены средние значения фототока для 12 сеансов наблюдений, проведенных с использованием фильтра F_1 : № 16, 18, 20, 21, 25–29, 31–34. Осреднение производилось по интервалам 2 с для заходов с $\alpha > 80^\circ$ и 1 с для заходов с $\alpha < 65^\circ$. Соответствующие вертикальные масштабы осреднения изменялись от 2 до 1 км при уменьшении высоты. Толстыми штриховыми линиями показан высотный профиль пропускания по модели стандартной атмосферы, обусловленный регулярным рефракционным ослаблением, молекулярным и аэрозольным рассеянием и поглощением озона в полосе Шапнюи [27]. Из рис. 2 видно, что измеренные профили среднего пропускания удовлетворительно согласуются как между собой, так и с расчетом по модели стандартной атмосферы на соответствующей длине волны, и это свидетельствует в пользу применявшегося способа коррекции высотной привязки данных наблюдений.

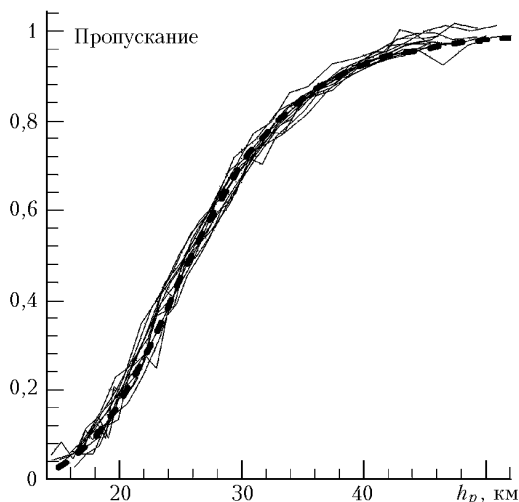


Рис. 2. Среднее пропускание атмосферы. Толстые штриховые линии — расчет по модели стандартной атмосферы

Однако в ряде случаев наблюдались значительные отклонения в поведении среднего пропускания, которые невозможно объяснить в рамках моделей стандартной атмосферы. В некоторых случаях эти аномалии можно было не только идентифицировать с известными атмосферными явлениями, но и исследовать. Так, например, в августе 1991 г., через два месяца после извержения вулкана Пинатубо, была проведена серия наблюдений № 40–43 по исследованию экстинкции света в стратосферном аэрозольном облаке в тропической зоне. По этим наблюдениям получены оценки вертикальной оптической толщи вулканического облака и исследована тонкая вертикальная структура облака [20]. В сеансах № 17 и 22 изменения среднего уровня сигнала были связаны с попаданием в измерительный канал фотометра рассеянного света от Луны. Эта подсветка, усиливающаяся с увеличением плотности атмосферы, была заметна примерно с 30 км и быстро возрастала с высотой около 20 км. В сеансе № 10 гидирование звезды производилось на фоне полярных сияний.

В сеансе № 6 при высоте перигея луча около 20 км было зафиксировано резкое уменьшение уровня сигнала (до нуля телеметрии), длившееся около 2 с. Наблюдения захода звезды в этом сеансе проводились синхронно двумя космонавтами с использованием фотометра ЭФО-1 и усилителя яркости, имевшего более широкое поле зрения [13]. Изображение звезды на экране усилителя яркости снималось кинокамерой. Провал сигнала от звезды был обнаружен синхронно в независимых наблюдениях. Высокая степень идентификации характеристик провала в сигнале в обоих случаях (длительность и глубина, форма фронтов) указывает на достоверность того, что оно не является результатом сбоя в работе оператора или аппаратуры, а вызвано каким-то изолированным аэрозольным образованием в атмосфере. Оценки показывают, что вертикальный размер этого «облака», располагавшегося на высоте около 20 км, составлял около 2 км, а интегральная оптическая толщина вдоль луча превышала фоновую более чем на порядок.

Наиболее часто встречающиеся в записях аномалии — это кратковременные замиранья сигнала (при неизменной чувствительности фотометра) с амплитудой от нескольких процентов от среднего уровня до полного пропадания сигнала. Характер этих провалов, их форма, высоты, на которых они наблюдались, сильно варьируют. Но можно отметить, что они, как правило, имеют крутые фронты, а их длительность составляет 0,1 – 0,5 с, при этом обычно провалы с меньшей амплитудой имеют меньшую длительность. Возможно, что эти замиранья были вызваны кратковременными потерями звезды в измерительном канале при ее гидировании. В пользу этого свидетельствует длительность замираний, близкая к характерному времени реакции оператора, а также то обстоятельство, что если космонавт проводил ряд последовательных наблюдений, то таких характерных замираний в последующих сеансах было меньше, чем в предыдущих.

Наблюдались также замиранья и с большими временами, например в сеансе № 23 на высоте 73 км на записи присутствует плавное уменьшение среднего уровня длительностью 2,5 с и амплитудой около 5% с последующим быстрым возвратом к прежнему уровню. Возможно, что причиной такого хода послужил медленный дрейф светового пятна по фотокатоду, который имеет неравномерную по площади чувствительность, при гидировании звезды с последующим быстрым возвратом космонавтом звезды в центр поля зрения.

Особняком стоят волнообразные изменения среднего уровня сигнала на высотах 47–50 км в сеансе № 19, которые невозможно объяснить неточностями сопровождения звезды. Зафиксированы 3 периода, первый из них имеет амплитуду модуляции в полном размахе примерно 50% от среднего уровня при длительности 1 с, что соответствует перепаду высот 2 км, два других имеют амплитуды 30 и 20% при длительности примерно 0,5 с. При этом напряжение на катоде фотоумножителя с точностью до кванта телеметрии оставалось постоянным. Координаты станции на этот отрезок времени составляли 52° с. ш. и 130° в. д., а координаты перигея 34° с. ш. и 123° в. д., что исключает возможность засветки от полярных сияний. Столь большую амплитуду изменения уровня сигнала также трудно объяснить модуляцией свечения ночного неба, так как световой поток от такой яркой звезды, как Канопус, многократно превышает уровень сигнала от свечения в поле зрения измерительного канала фотометра. На следующем витке орбиты в сеансе № 20 таких изменений сигнала не наблюдалось. В более слабой форме похожая волна в среднем уровне сигнала наблюдалась в сеансе № 46 на высоте 150 км с длительностью 7 с (перепад высот 3 км) и амплитудой примерно 5%.

4. Характер мерцаний

В силу того что наблюдавшиеся мерцания, как будет показано ниже, были, в основном, обусловлены анизотропными слоистыми неоднородностями, в сеансах наблюдений с большими углами захода α характерные частоты мерцаний были смещены в более низкочастотную область, при этом уменьшается вертикальная составляющая скорости смещения перигейной точки. Так же возрастала амплитуда мерцаний, а дисперсия мерцаний сохранялась при сужении частотного диапазона.

В каждом сеансе наблюдались отклонения параметров, характеризующих мерцания, от усредненных и разброс параметров мог быть значительным. Некоторые количественные характеристики высотной зависимости характера мерцаний и спектров и их разброс проанализированы в [19], здесь мы отметим следующие характерные высоты, полученные по всей базе данных:

- начало мерцаний (заметное на фоне шумов) – 45–50 км;
- заметное усиление мерцаний – 35–40 км;
- сильные выбросы и глубокие замирания – 23–32 км;
- одиночные выбросы – 20–25 км;
- конец наблюдений (потеря звезды) – 13–15 км.

В ряде сеансов на высотах 50–55 км наблюдались локализованные области со «вспышками» мерцаний, связанные с перемежаемостью турбулентности в атмосфере. Более четкое проявление перемежаемости на больших высотах обусловлено тем, что она, по-видимому, более характерна для этих высот, а также тем, что на меньших высотах проявления перемежаемости маскируются более высоким уровнем мерцаний.

Среднеквадратические значения мерцаний – индекс мерцаний – в области слабых флуктуаций (до высот 25–30 км) в первом приближении возрастают примерно экспоненциально при заходе звезды с масштабом, равным высоте однородной атмосферы 6–7 км на этих высотах. Отметим значительный разброс отмеченных выше характерных высот, сравнимый с этим масштабом. Следует учесть, что эти высоты и их разброс обусловлены не толь-

ко состоянием атмосферной турбулентности, зависящей от сезона, района зондирования и т.д., но и, во-первых, параметрами использовавшегося фотометра ЭФО-1 – его чувствительностью, частотным и динамическим диапазонами, и, во-вторых, условиями измерений – яркостью и спектральной характеристикой звезды, геометрией наблюдений, полосой длин волн принимаемого света. Последним обстоятельством, в частности, определяются эффекты хроматической дисперсии атмосферы.

Изменчивость мерцаний над разными районами зондирования хорошо прослеживается при наблюдениях захода и восхода звезды на одном и том же витке орбиты, а также на последовательных витках. Наиболее яркий пример такой изменчивости мерцаний представлен на рис. 3, где приведены записи фототока, полученные на заходе и восходе звезды. Записи приведены для диапазона высот 38–51 км, в котором отличия в мерцаниях были наиболее заметны; во времени они разнесены примерно на 10 мин. Наблюдения в этом сеансе проводились без светофильтра, что позволило зарегистрировать мерцания на больших высотах. Координаты перигейной точки для середины приведенных записей составляли $31,5^\circ$ с. ш., $53,0^\circ$ в. д. на заходе и $24,0^\circ$ с. ш., 96° в. д. на восходе. Видно, что на участке захода мерцания были существенно больше (представление об уровне дробового шума дает участок на записи *б* на высотах, больших 45 км). Сравнение с данными наблюдений на предыдущем витке орбиты (сеанс № 38) также указывает на повышенный уровень мерцаний в записи *а*. Как показывает анализ спектров мерцаний [18], существенно больший уровень флуктуаций на записи *а* сопровождался и качественными изменениями в спектре мерцаний с повышенным уровнем высокочастотных мерцаний.

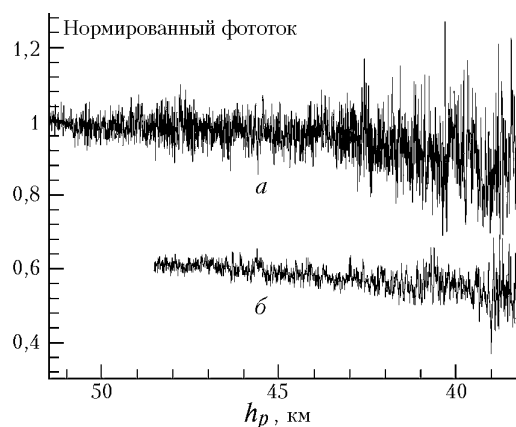


Рис. 3. Нормированные значения фототока, полученные в сеансе № 39 на восходе (*а*) и заходе (*б*) звезды. Запись *б* смещена вниз на 0,4

В ряду отмеченных аномалий мерцаний следует отметить наблюдения в сеансе № 47. В этом сеансе звезда наблюдалась вблизи полюса орбиты с $h_{\min} = 51,8$ км. На участке захода вблизи h_{\min} на высотах от 54 до 52 км на протяжении 500 км по горизонтали были зарегистрированы мерцания с аномально высоким уровнем. Анализ хода рефракционного ослабления в этой области выявил тонкие (с вертикальными размерами 50–200 м) образования с очень большими температурными изменениями по вертикали. Расчеты в приближении сферической симметрии этих неоднородностей показали, что градиент температуры в этих слоях мог достигать значений от 4 до -7 К/100 м [21].

5. Спектры мерцаний и анизотропия неоднородностей

Характерная для стратосферы устойчивая температурная стратификация приводит к подавлению вертикальных движений и благоприятствует развитию анизотропных, вытянутых по горизонтали неоднородностей. Такие анизотропные образования возникают при распространении внутренних гравитационных волн [28].

Зондирование атмосферы под разными углами α позволяет исследовать анизотропию неоднородностей плотности в атмосфере, предполагая их симметрию в горизонтальной плоскости. Под коэффициентом анизотропии неоднородностей η будем понимать отношение их характерных горизонтальных масштабов к вертикальным. Качественные заключения можно сделать из сравнительного анализа самих записей мерцаний, но более наглядно это видно из анализа одномерных пространственных спектров мерцаний V_{\perp} , полученных при различных α . Если неоднородности плотности статистически изотропные, то мерцания не зависят от направления, под которым лучи пересекают эти неоднородности. Следовательно, спектры мерцаний должны совпадать при пересчете их в зависимости от волновых чисел κ_{\perp} вдоль видимой траектории захода в плоскости перигея, где $\kappa_{\perp} = 2\pi f/v_{\perp}$, f – частота, v_{\perp} – перпендикулярная составляющая скорости смещения точки перигея. Если же неоднородности сильно анизотропные, то характерные частоты мерцаний должны определяться вертикальной скоростью смещения точки перигея v_{\parallel} . В этом случае спектры мерцаний должны совпадать при пересчете их в зависимости от вертикальных волновых чисел $\kappa_{\parallel} = 2\pi f/v_{\parallel}$.

На рис. 4 приведены пространственные спектры мерцаний для 5 сеансов наблюдений в виде безразмерных произведений $\kappa_{\perp} V_{\perp}(\kappa_{\perp})$ и $\kappa_{\parallel} V_{\parallel}(\kappa_{\parallel})$ для двух диапазонов высот. В этих измерениях значения $\cos\alpha$ (см. таблицу) отличаются почти в десять раз. Соответственно отличаются скорости v_{\perp} и v_{\parallel} . Для статистически изотропных неоднородностей спектры $\kappa_{\perp} V_{\perp}(\kappa_{\perp})$ должны сближаться для заходов с отличающимися $\cos\alpha$. Для анизотропных неоднородностей подобная ситуация должна наблюдаться для спектров $\kappa_{\parallel} V_{\parallel}(\kappa_{\parallel})$.

Из рис. 4 видно, что на графиках *a* и *b* спектры разнесены относительно друг друга по оси пространственных волновых чисел κ_{\perp} примерно на порядок. В то же время спектры мерцаний на графиках *b* и *г*, приведенные к вертикальному зондированию, вполне удовлетворительно совпадают друг с другом по форме. Наблюдающиеся некоторые различия в них (главным образом, в величине спектральных амплитуд) обусловлены, скорее всего, различием высотных интервалов, для которых они рассчитывались. Из такого сравнения можно получить оценку снизу для коэффициента анизотропии η как отношение горизонтальной скорости смещения луча к вертикальной. Такая оценка, к примеру, для сеанса № 12 дает $\eta > 25$.

На рис. 4, б, г видно, что спектры $\kappa_{\parallel} V_{\parallel}(\kappa_{\parallel})$ по форме схожи друг с другом и имеют максимум вблизи некоторого характерного вертикального масштаба $l_* = 2\pi/(\kappa_{\parallel})_{\max} = 30 \pm 60$ м. Отметим, что в случае чисто трехмерного спектра турбулентных неоднородностей (в том числе и анизотропных) показатель преломления максимум спектра в принятом нами представлении должен был бы наблюдаться вблизи масштаба, равного радиусу первой зоны Френеля $\rho_F = \sqrt{2\pi\lambda L} \approx 2,5$ м [6–10], где

$L = 2100$ км – расстояние от плоскости перигея до орбитальной станции. В измерениях же мерцания ослабевают, начиная с масштаба l_* , существенно превышающего ρ_F , и в этом смысле его можно трактовать как проявление некоторого «внутреннего масштаба» для сильно анизотропных неоднородностей. Не следует отождествлять его с обычно используемым в теории турбулентности внутренним масштабом, обусловленным молекулярной вязкостью [6], поскольку влияние молекулярных эффектов для этих высот слишком мало, чтобы вызвать заметную диссипацию кинетической энергии турбулентности на столь больших масштабах. В целом одинаковая форма спектров мерцаний наблюдалась в диапазоне высот 25–36 км со значениями характерного масштаба l_* от нескольких десятков до сотен метров.

Как видно из рис. 4, мерцания в приведенных данных были, в основном, обусловлены анизотропными неоднородностями. Выделить проявления изотропной колмогоровской турбулентности в этих измерениях не удалось в связи со следующими обстоятельствами.

Во-первых, это ограниченность частотного диапазона приемного тракта фотометра ЭФО-1, составившего около 100 Гц, в то время как максимум мерцаний, обусловленный колмогоровской изотропной турбулентностью, должен был наблюдаться на частотах от килогерца до нескольких килогерц [6] (при условии, что внутренний масштаб турбулентности меньше размера зоны Френеля) в зависимости от угла захода.

Во-вторых, для режима слабых флуктуаций влияние хроматизма для таких наклонных заходов, которые были реализованы в большинстве экспериментов с ЭФО-1, приводит не только к фильтрации изотропных мерцаний в высокочастотной области, но в основном к подавлению мерцаний по всему спектру, включая и крупномасштабную область [29, 30]. Это связано с тем, что из-за хроматической дисперсии показателя преломления зондирующее излучение имеет разную разрешающую способность: по горизонтали оно определяется размером зоны Френеля ρ_F , а по вертикали – масштабом хроматизма Δn_c . Даже при использовании узкого светофильтра F_1 масштаб Δn_c сравним с ρ_F уже на высотах 35–38 км, возрастая примерно экспоненциально с уменьшением высоты в интересующем нас диапазоне высот. При зондировании атмосферы в направлении, близком к вертикали, хроматизм приводит к эффективному сглаживанию мерцаний с масштабами меньше Δn_c как для анизотропных, так и для изотропных неоднородностей. Для наклонных заходов в случае анизотропных неоднородностей влияние хроматизма такое же, как и для вертикального зондирования. В случае зондирования изотропных неоднородностей (при достаточно близком к горизонту зондировании) хроматизм не приводит к заметному осреднению высокочастотных мерцаний, так как горизонтальное разрешение зондирования велико и спектр мерцаний остается высокочастотным. Поскольку дисперсия мерцаний – интеграл от спектра по всем частотам – не зависит от направления зондирования, то очевидно, что для наклонного зондирования пространственный спектр изотропных мерцаний, существенно более широкий, чем для вертикального зондирования, должен иметь во столько же раз меньшие спектральные амплитуды.

Эти обстоятельства привели к тому, что при существующих в атмосфере соотношениях между интенсивностями изотропной и анизотропной турбулентностей измерения с ЭФО-1 не позволили надежно выделить на высотах ниже 35–38 км мерцания, обусловленные изотропными неоднородностями. Недооценка влияния хроматизма привела нас в

[14] к заниженным величинам возможных в стратосфере значений структурной характеристики флуктуаций температуры для колмогоровской изотропной турбулентности. С другой стороны, такая селекция мерцаний по

типу неоднородностей позволила детально исследовать характеристики анизотропной турбулентности с неспециализированным для этих задач прибором ЭФО-1.

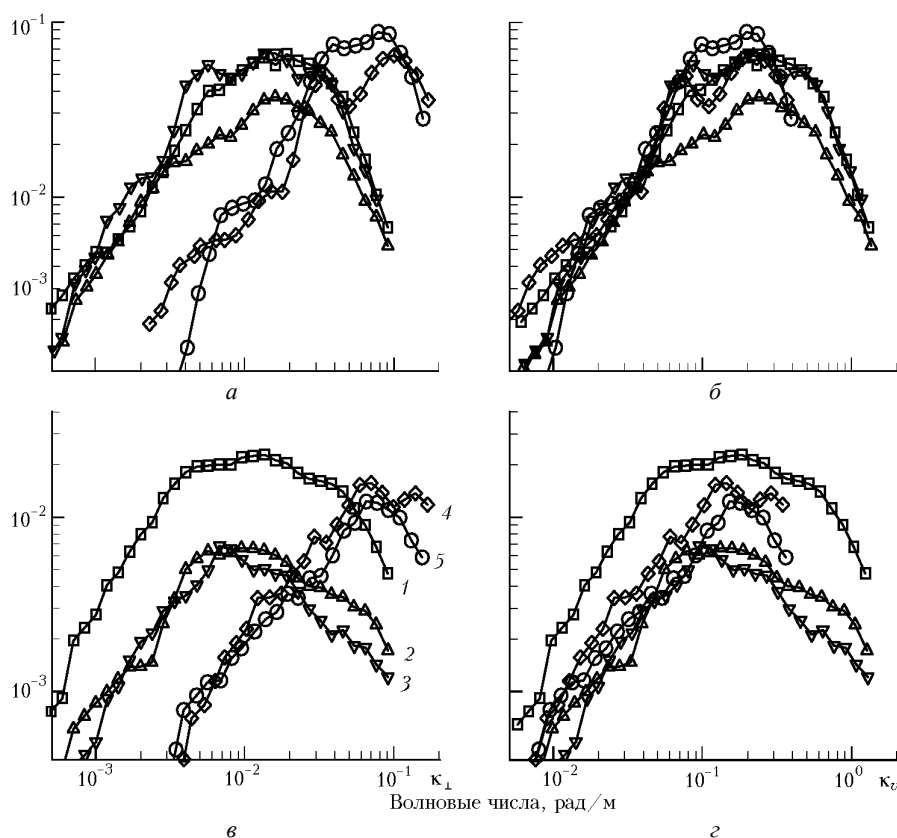


Рис. 4. Пространственные спектры мерцаний: *a, в* – гипотеза изотропии неоднородностей; *б, з* – гипотеза анизотропии. Верхние графики – высота 27–31 км, нижние графики – высота 32–37 км. Кривые 1–3 – сеансы № 25–27; кривые 4, 5, – сеансы № 32 и 31

В ряде случаев, когда мерцания надежно фиксировались над уровнем шумов на высотах выше 40 км, для которых селективирующее влияние хроматизма не столь существенно, отмечалось качественное изменение спектров мерцаний с более слабовыраженным максимумом, а иногда и его отсутствием. Такие изменения вида спектров мерцаний, характерные при проявлениях изотропной турбулентности на фоне анизотропных мерцаний, были зафиксированы в сеансах № 26–29, 31, 32, 34, 38, 39. Спектры мерцаний, полученные в сеансах № 38, 39, приведены в [18].

Отметим, что влияние хроматизма в рассматриваемых измерениях могло также привести к завышению приведенной выше оценки характерного масштаба l_* для высот ниже 30–35 км, где хроматические эффекты значительны. Измерения с новым фотометром ЭФО-2 [25], в котором применены существенно более узкополосные фильтры, показывают, что характерный масштаб l_* имеет тенденцию к уменьшению с уменьшением высоты.

Расширение возможностей эксперимента для регистрации колмогоровской изотропной турбулентности и было основной причиной для конструирования нового специализированного фотометра ЭФО-2, главными отличительными особенностями которого по сравнению с ЭФО-1 были повышенное быстродействие, более узкие

светофильтры и увеличенная приемная апертура. Все это позволило существенно увеличить разрешение измерений и надежно фиксировать мерцания, обусловленные и анизотропной, и изотропной турбулентностями [24, 25].

Как видно из рис. 4, анизотропия неоднородностей была так велика, что даже в наклонных заходах с $\alpha = 86^\circ$ неоднородности пересекались зондирующим лучом по вертикали. Для того чтобы исследовать горизонтальную структуру мерцаний и получить более точную оценку коэффициента анизотропии, были проведены измерения, в которых звезда наблюдалась вблизи полюса орбиты станции. В таких наблюдениях звезда опускалась до минимальной высоты h_{\min} и затем снова восходила. В этих сериях наблюдения проводились на последовательных витках орбиты через 1,5 ч, при этом из-за прецессии орбиты величина h_{\min} от витка к витку изменялась на несколько километров. В окрестности траектории с минимальной высотой h_{\min} перигей луча двигался практически вдоль горизонта на протяжении нескольких сотен километров. По полученным на этих участках данным были рассчитаны горизонтальные спектры мерцаний. Сравнительный анализ вертикальных и горизонтальных спектров мерцаний позволил получить оценку коэффициента анизотропии неоднородностей $\eta \approx 160$ в диапазоне высот 22–30 км [17, 19].

6. Спектры флуктуаций температуры в стратосфере

Как уже отмечалось выше, в приближении фазового экрана для режима слабых мерцаний существуют простые соотношения, связывающие двумерные спектры флуктуаций фазы на экране и измеренных мерцаний, а спектр фазы, в свою очередь, определяется трехмерным спектром флуктуаций показателя преломления в атмосфере [7–10, 23]. В эксперименте измеряется одномерный спектр мерцаний на некотором отрезке траектории захода звезды. В [16] рассмотрена принципиальная возможность того, как из достаточно большого набора одномерных спектров мерцаний, полученных под различными ракурсами наблюдений, можно восстановить двумерный спектр мерцаний, а затем и трехмерный

спектр флуктуаций показателя преломления. Однако практическая реализация такого решения в настоящее время затруднительна.

При анализе полученных спектров предполагалось, что спектр атмосферных неоднородностей можно рассматривать как сумму изотропной и анизотропной составляющих. Использование априорной информации о характере неоднородностей показателя преломления, обусловивших наблюдаемые мерцания, в первую очередь о сильной анизотропии этих неоднородностей и о том, что характерный масштаб l_0 многократно превышает размер зоны Френеля, существенно упрощает задачу. Как показывает анализ [16], в этом случае можно получить простые соотношения, связывающие вертикальный спектр мерцаний с вертикальным спектром флуктуаций показателя преломления или температуры.

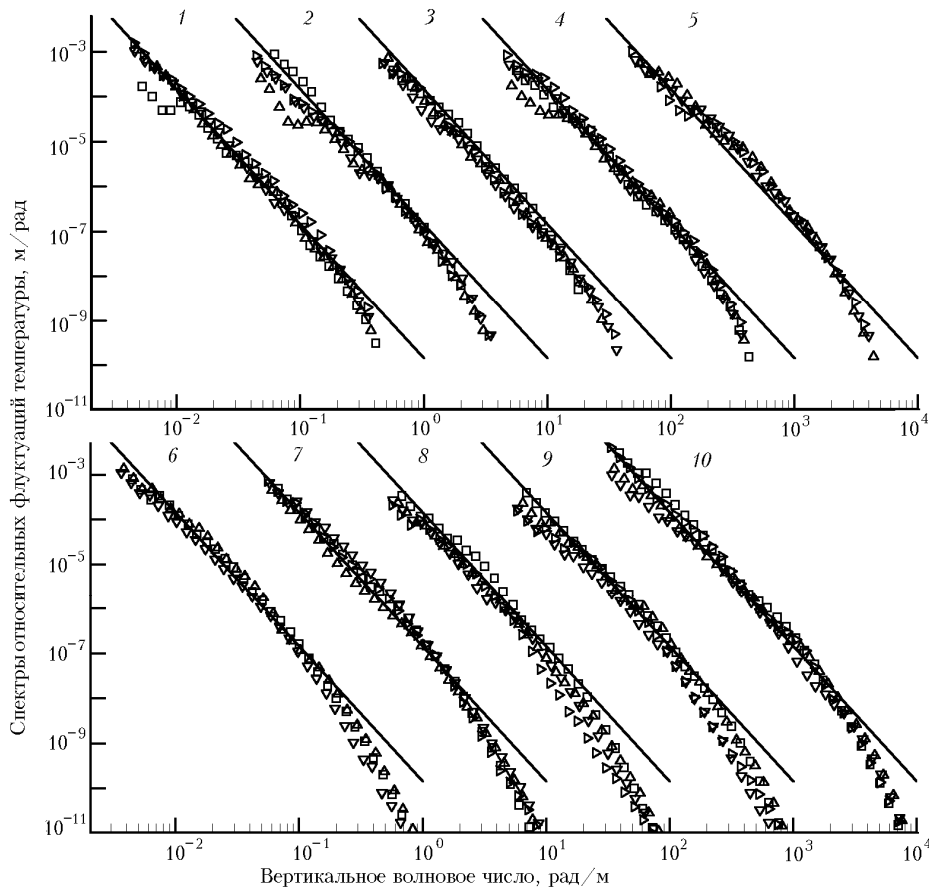


Рис. 5. Вертикальные спектры относительных флуктуаций температуры: 1 – 5 – данные наблюдений заходов Сириуса № 32, 28, 29, 31, 33; 6 – 10 – заходов Канопуса № 16, 25–27, 18. Спектры последовательно сдвинуты на порядок по оси абсцисс. Разными значками обозначены данные, полученные для разных высот. Прямые линии – степенной спектр с наклоном –3

На рис. 5 показаны вертикальные спектры относительных флуктуаций температуры $V_T(\kappa_v)$, восстановленные из измеренных спектров мерцаний в предположении сильной анизотропии неоднородностей.

Спектры приведены для сеансов наблюдений заходов Сириуса и Канопуса. Данные относятся к диапазону высот 25–37 км. Каждый спектр (на верхнем графике начиная с номера 2, на нижнем – с номера 7) последовательно сдвинут относительно предыдущего по оси волновых чисел на порядок. Еще раз подчеркнем, что в этих наблюдениях мерцания были обусловлены, главным образом, сильно анизотропными неоднородностями, влияние же изотропной турбулентности было сильно ослаблено хрома-

тической абберацией атмосферы [30]. Прямые линии для каждого захода соответствуют модели насыщенных внутренних гравитационных волн (ВГВ) [28]: $V_T^m(\kappa_v) = A \varpi_{BV}^4 / (g^2 \kappa_v^3)$, где ϖ_{BV} – частота Брента–Вайсяля и $\varpi_{BV} \approx 0,022$ рад/с для стандартных условий в стратосфере; g – ускорение свободного падения; A – числовой коэффициент. Его значение равнялось 0,06 как среднее по всем спектрам флуктуаций температуры, полученным нами из мерцаний.

Большой диапазон изменения V_T (более чем 8 порядков), получившийся в результате пересчета их из спектров мерцаний, и логарифмический масштаб пред-

ставления скрадывают разницу между спектрами, относящимися к разным высотам и разным районам зондирования, хотя разброс параметров мог быть значительным. Общий взгляд на спектры позволяет выделить некоторые общие закономерности. По характеру зависимости спектры разделены масштабом l_* на два участка. В крупномасштабной области от 1 км до 100 м они имеют степенной характер с наклоном, близким к -3 , что согласуется с моделью насыщенных ВГВ. Анализ всех данных наблюдений мерцаний показывает, что значения наклонов спектра в крупномасштабной области сосредоточены в подавляющем большинстве в диапазоне от $-2,6$ до $-3,2$ с наиболее вероятным значением, равным $-2,8$. Числовой коэффициент A также близок к тому, что предполагают в модели насыщенных ВГВ: $A = 0,1$ [28, 31]. В области масштабов меньше l_* наблюдается более крутой спад восстановленных спектров.

Было проведено сравнение вертикальных спектров флуктуаций температуры, восстановленных по измерениям мерцаний, со спектрами, полученными французскими исследователями по данным контактных измерений на баллонах в диапазоне высот 22–30 км [32] (выше измерения на баллонах не производились). Сравнение показало хорошее совпадение спектров в области крупных масштабов и расхождение для масштабов меньше ~ 50 м. Причины такого расхождения, по-видимому, могли быть следующие. Основная из них заключалась в том, что, как уже отмечалось выше, при наблюдениях заходов звезд эффекты хроматической рефракции селективно подавляли мерцания на изотропной турбулентности для наклонных заходов. В контактных же измерениях присутствуют обе компоненты турбулентности. Когда влияние хроматического эффекта в наблюдениях мерцаний с новым прибором ЭФО-2 [25] было сведено к минимуму, то в спектре мерцаний для наклонных заходов наблюдались две составляющие – анизотропная и изотропная. Кроме того, измерения температуры на баллоне осуществляются вдоль локальной траектории подъема баллона, в спутниковых же наблюдениях мерцания обусловлены всеми неоднородностями, расположенными на траектории луча визирования, проходящего через всю атмосферу. При анализе данных необходимо учесть эффекты перемежаемости.

Хорошее совпадение температурных спектров в крупномасштабной области может служить одним из обоснований эффективности дистанционного исследования неоднородной структуры стратосферы по спутниковым наблюдениям мерцаний звезд.

Заключение

Основная задача при анализе измерений с ЭФО-1 заключалась в исследовании мелкомасштабной структуры неоднородностей плотности и температуры в стратосфере по данным наблюдений мерцаний звезд. Измерения с прибором ЭФО-1 позволили обнаружить и исследовать анизотропные неоднородности плотности. Исследовать характеристики колмогоровской изотропной турбулентности в стратосфере в этих измерениях не удалось из-за недостаточной разрешающей способности прибора в высокочастотной области и маскировки изотропных мерцаний анизотропными в низкочастотной области.

В исследованиях структуры анизотропных неоднородностей получены следующие основные результаты:

показано, что в стратосфере постоянно присутствуют сильно вытянутые по горизонтали неоднородности плотности с вертикальными масштабами от нескольких километров до нескольких десятков метров;

получена оценка характерного коэффициента анизотропии неоднородностей (~ 100);

восстановлены вертикальные спектры неоднородностей температуры в стратосфере и получены оценки основных параметров спектров флуктуаций температуры в диапазоне высот 24–36 км. В области вертикальных масштабов от 1–2 до 0,1 км спектры можно аппроксимировать степенной зависимостью с наклоном -3 . Для этой области отмечено удовлетворительное согласие с результатами прямых измерений флуктуаций температуры на баллонах и с расчетами, выполненными на основе модели насыщенных внутренних волн. В области меньших вертикальных масштабов спектральная плотность анизотропных неоднородностей спадает существенно быстрее;

для больших высот – от 38 км и выше – наблюдались отклонения поведения спектров мерцаний от отмеченного ранее с более слабо выраженным участком затухания спектров в малых масштабах, а иногда и с его отсутствием. Такая трансформация спектров могла быть вызвана проявлением изотропной турбулентности на высотах, где влияние хроматических эффектов не столь значительно.

Кроме изучения статистических характеристик случайных неоднородностей плотности в стратосфере, по данным наблюдений заходов звезд проведен ряд других исследований.

а) В августе 1991 г. проведена серия наблюдений по исследованию экстинкции света в стратосферном вулканическом облаке Пинатубо в тропической зоне. Получены оценки вертикальной оптической толщи вулканического облака и исследована тонкая вертикальная структура облака.

б) В одном из сеансов на высоте 52–54 км в районе с координатами $27,4 - 22,7^\circ$ с. ш. и $116,7 - 127,9^\circ$ в. д. зафиксированы тонкие образования, характеризующиеся аномально большими температурными изменениями по вертикали. При толщине слоев 50–200 м градиент температуры мог достигать значений от 4 до -7 К/100 м.

в) Отмечен также ряд других аномалий в поведении среднего пропускания атмосферы и в характере наблюдавшихся мерцаний, причины которых нам пока не понятны.

Десятилетний цикл наблюдений мерцаний звезд с ЭФО-1 на двух орбитальных станциях позволил исследовать статистические характеристики сильно анизотропных неоднородных структур плотности в стратосфере. Первые же измерения показали перспективность таких наблюдений для дистанционного мониторинга турбулентности в стратосфере и дали основу для разработки и конструирования нового специализированного фотометра ЭФО-2 [24,25]. Возможности нового прибора позволили не только улучшить количественные характеристики получаемых данных и расширить исследуемый высотный диапазон до 70 км, но и принесли новое качество – возможность исследования и анизотропной и изотропной турбулентностей и изучения связей между ними.

Авторы данной статьи выражают глубокую благодарность участникам творческого коллектива, обеспечивавшим и проводившим эксперименты с помощью фотометра ЭФО-1 на орбитальных станциях «Салют-7» и «Мир»: летчикам-космонавтам СССР В.В. Лебедеву, В.А. Джанибекову, А.П. Александрову, М.Х. Манарову, Ю.В. Романенко, В.Г. Титову, А.А. Волкову, С.К. Крикалеву, А.А. Сереброву, А.П. Арцебарскому, сотрудникам РКК «Энергия» С.И. Серовой, А.И. Нестеренко.

А.С. Гурвич и В. Кан благодарят Российский фонд фундаментальных исследований за финансовую поддержку по

гранту РФФИ № 00-05-64376, В. Кан – также за поддержку по гранту РФФИ № 01-02-16213.

1. Яковлев О.И. Космическая радиофизика. М.: Научная книга, 1998. 432 с.
2. Hubbard W.B., Sicardy B. et al. The occultation of 28 Sgr by Titan // *Astron. and Astrophys.* 1993. V. 269. P. 541–563.
3. Grechko G.M., Gurvich A.S., Kan V., Savchenko S.A., Sokolovskii S.V. Scintillations and random refraction during occultations by terrestrial atmosphere // *J. Opt. Soc. Amer.* 1985. V. 2. № 12. P. 2120–2123.
4. McCormick M.P. SAGE 2: An overview // *Adv. Space Res.* 1987. V. 7. № 2. P. 73–86.
5. Поляков В.А., Тимофеев Ю.М., Гурвич А.С., Воробьев В.В., Кан В., Уее Ж.-Н. Влияние мерцаний звезд на погрешности измерений содержания озона в атмосфере из космоса // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2001. Т. 37. № 1 (в печати). С. 56–66.
6. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
7. Гурвич А.С. Флуктуации при наблюдении внеземных источников из космоса сквозь атмосферу Земли // *Изв. вузов. Радиофиз.* 1984. Т. 27. № 8. С. 951–959.
8. Haugstad B.S. Effects of inhomogeneous background on radiation propagation through turbulent planetary atmospheres // *Radio Sci.* 1978. V. 13. № 3. P. 435–440.
9. Hubbard W.B., Jokipii J.R., Wilking B.A. Stellar occultation by turbulent planetary atmospheres: a wave-optical theory including a finite scale height // *ICARUS.* 1978. V. 34. № 34. P. 374–395.
10. Woo R., Ishimaru A., Yang F.-Ch. Radio scintillations during occultation by turbulent planetary atmospheres. // *Radio Sci.* 1980. V. 15. № 3. P. 695–703.
11. Гурвич А.С., Захаров И., Кан В., Лебедев В.В., Нестеренко А.И., Неужил Л., Пахомов А.И., Савченко С.А. Мерцания звезд по наблюдениям с орбитальной станции «Салют-7» // *Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана.* 1985. Т. 21. № 12. С. 1235–1241.
12. Богданов Л.В., Гречко Г.М., Гурвич А.С., Джанибеков В.А., Евстафьева С.И., Кан В., Пахомов А.И., Савченко С.А. Спектры мерцаний звезд по наблюдениям с орбитальной станции «Салют-7» // *Докл. АН СССР.* 1987. Т. 295. № 2. С. 317–321.
13. Гречко Г.М., Гурвич А.С., Джанибеков В.А., Кан В., Савченко С.А. Исследование вариаций плотности и температуры в стратосфере по наблюдениям мерцаний звезд из космоса // *Исслед. Земли из космоса.* 1989. № 4. С. 22–27.
14. Александров А.П., Гречко Г.М., Гурвич А.С., Кан В., Манаров М.Х., Пахомов А.И., Романенко Ю.В., Савченко С.А., Серова С.И., Титов В.Г. Спектры вариаций температуры в стратосфере по наблюдениям мерцаний звезд из космоса // *Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана.* 1990. Т. 26. № 1. С. 5–16.
15. Гурвич А.С. Спектры мерцаний при наблюдениях покрытия звезд атмосферой Земли // *Оптика атмосфер.* 1989. Т. 2. № 3. С. 239–245.
16. Гурвич А.С., Кан В. Определение спектров флуктуаций индекса рефракции по наблюдениям покрытия звезд атмосферой Земли // *Оптика атмосфер.* 1989. Т. 2. № 4. С. 339–343.
17. Волков А.А., Гречко Г.М., Гурвич А.С., Кан В., Крикалев С.К., Пахомов А.И., Савченко С.А. Горизонтальная структура мерцания звезд по наблюдениям из космоса через атмосферу Земли // *Оптика атмосфер.* 1990. Т. 3. № 8. С. 879–884.
18. Гречко Г.М., Гурвич А.С., Кан В., Пахомов А.И., Савченко С.А., Серебров А.А. Наблюдения мерцаний звезд, вызванных вариациями температуры на высотах 40–50 км // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 1993. Т. 29. № 1. С. 5–10.
19. Grechko G.M., Gurvich A.S., Kan V., Kireev S.V., Savchenko S.A. Anisotropy of spatial structures in the middle atmosphere // *Adv. Space Res.* 1992. V. 12. № 10. P. 169–175.
20. Арцебарский А.П., Грачева М.Е., Гречко Г.М., Гурвич А.С., Кан В., Крикалев С.К., Пахомов А.И., Савченко С.А. Аэрозоль Пинатубо по наблюдениям заходов звезд из космоса // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 1994. Т. 30. № 4. С. 508–512.
21. Гречко Г.М., Гурвич А.С., Кан В., Пахомов А.И., Савченко С.А., Серебров А.А. Вариации температуры в высотах вблизи 52 км по наблюдениям заходов звезд из космоса // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 1996. Т. 32. № 6. С. 790–795.
22. Гурвич А.С., Кан В. Флуктуации радиоволн на трассах спутник–атмосфера–спутник: оценки по наблюдениям мерцаний звезд и сравнение с экспериментом // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 1997. Т. 33. № 3. С. 314–323.
23. Гречко Г.М., Гурвич А.С., Кан В., Пахомов А.И., Подвязный Я.П., Савченко С.А. Наблюдения турбулентности в атмосфере на высотах 20–70 км // *Докл. РАН.* 1997. Т. 357. № 5. С. 683–686.
24. Гурвич А.С., Кан В., Савченко С.А., Пахомов А.И., Боровихин П.А., Волков О.Н., Калери А.Ю., Авдеев С.В., Корзун В.Г., Падалка Г.И., Подвязный Я.П. Исследование турбулентности и внутренних волн в стратосфере по наблюдениям мерцаний звезд из космоса: 1. Наблюдения и дисперсия мерцаний // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2001. Т. 37. № 4. С. 469–486.
25. Гурвич А.С., Кан В., Савченко С.А., Пахомов А.И., Падалка Г.И. Исследование турбулентности и внутренних волн в стратосфере по наблюдениям мерцаний звезд из космоса: 2. Распределения вероятностей и спектры мерцаний // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2001. Т. 37. № 4 (в печати).
26. Рытов С.М., Крайцов Ю.М., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. Случайные поля. М.: Наука, 1978. 463 с.
27. Гречко Г.М., Гурвич А.С., Казбанов В.А., Киселева М.С., Лазарев А.И., Решетникова И.Н., Синельникова Г.Е., Соколовский С.В. Оптические явления при восходе и заходе Солнца в космосе // *Труды ГОИ.* 1989. Т. 71. № 205. С. 3–120.
28. Smith S.A., Fritts D.C., VanZandt T.E. Evidence for a saturated spectrum of atmospheric gravity waves // *J. Atmos. Sci.* 1987. V. 44. № 10. P. 1404–1410.
29. Gurvich A.S., Brekhovskikh V.L. Study of the Turbulence and Inner Waves in the Stratosphere based on the Observations of Stellar Scintillations from Space: A Model of Scintillation Spectra // *Waves Random Media* (accepted 2001).
30. Kan V., Dalaidier F., Gurvich A.S. Chromatic refraction during star occultations with Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars. 2. Statistical properties of scintillations // *Appl. Opt.* 2001. V. 40. № 6. P. 878–889.
31. Tsuda T., VanZandt T.E., Mizumoto M., Kato S., Fukao S. Spectral analysis of temperature and Brunt–Vaisala frequency fluctuations observed by radiosondes // *J. Geophys. Res.* D. 1991. V. 96. № 9. P. 17, 265–17, 278.
32. Dalaidier F., Gurvich A.S., Kan V., Sidi C. Middle stratosphere temperature spectra observed with stellar scintillation and in situ techniques // *Adv. Space Res.* 1994. V. 14. № 9. P. 61–64.

G.M. Grechko, A.S. Gurvich, V. Kan, S.A. Savchenko, A.I. Pakhomov. Observations of atmospheric stellar scintillations from orbital stations «Salyut-7» and «Mir».

The results of stellar scintillation observations carried at the orbital stations «Salyut-7» and «Mir» during 1982–1993 using the EFO-1 photometer are summed up. The main goal of these experiments was in studying of small-scale inhomogeneous structure of temperature and density in the stratosphere by stellar scintillation data. The general characteristics of observations and the description of the investigation results are given. Measurements with EFO-1 allowed one to detect and to investigate the anisotropic stratified inhomogeneities of the density. The estimation of anisotropy coefficient of the inhomogeneities was obtained. Vertical spectra of the temperature and density fluctuations were restored. Spectra are in accordance with the data of balloon temperature measurements and with the model of saturated gravity waves for vertical scales of 0.1–1 km. The scintillation measurements show the characteristic vertical scale about several dozens of meters for vertical spectra of anisotropic temperature fluctuations in the stratosphere.