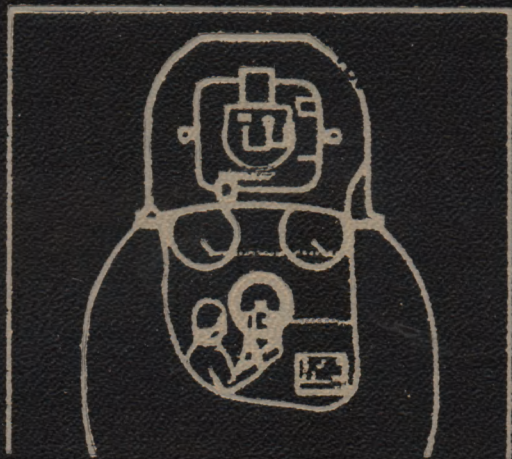
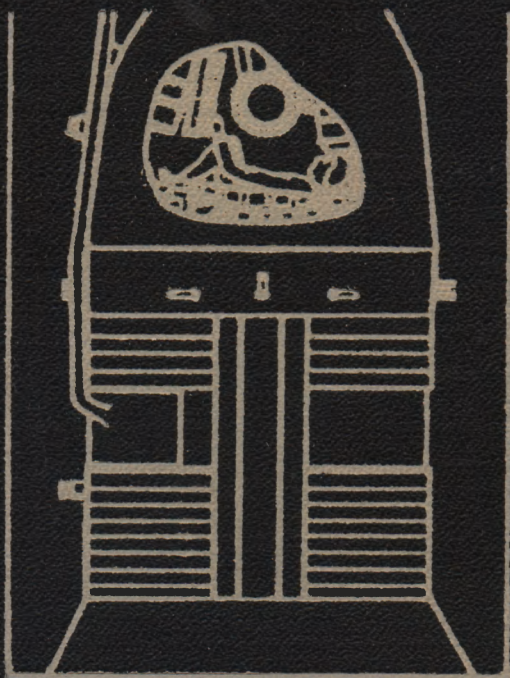




ОБСЕРВАТОРИЯ В КОСМОСЕ
«СОЮЗ-13»-«ОРИОН-2»



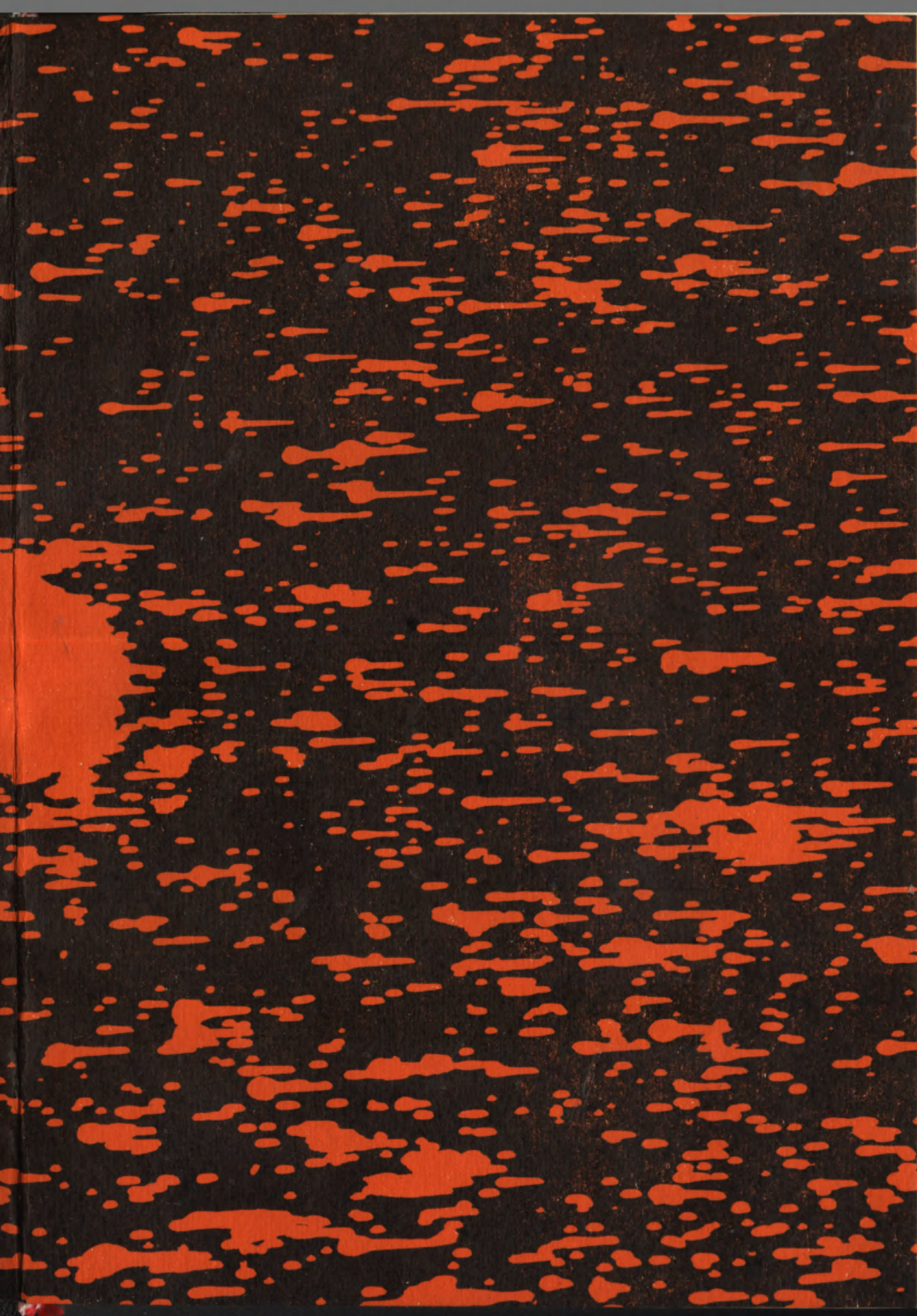
УВАЖАЕМЫЙ ТОВАРИЩ!

После просмотра источника информации (книги, журналы и т. д.) зачеркните очередную цифру.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16		
17	18	19	20	21	22	23		
24	25	26	27	28	29	30		

Зак. 1634

87815



629,78
0-252

ОБСЕРВАТОРИЯ В КОСМОСЕ «СОЮЗ-13»-«ОРИОН-2»

Под редакцией академика
В. А. АМБАРЦУМЯНА

87815

НТБ п/я Г-4149



Москва
«Машиностроение»
1984

~~ББК 99.6~~

~~0-10~~

~~УДК~~ 629.78:523.001.5

Редакционная коллегия: акад. **В. А. Амбарцумян** (главный редактор), чл.-кор. АН Арм. ССР **Г. А. Гурздян** (зам. главного редактора), чл.-кор. АН СССР **Б. В. Раушенбах** (зам. главного редактора), летчик-космонавт СССР **П. И. Климук**, летчик-космонавт СССР **В. В. Лебедев**, летчик-космонавт СССР **К. П. Феоктистов**.

Обсерватория в космосе: «Союз-13» — «Орион-2»/Под О-13 ред. В. А. Амбарцумяна. — М.: Машиностроение. 1984. — 248 с., ил.

В пер. 2 р. 70 к.

Книга посвящена крупному эксперименту, осуществленному в Советском Союзе в декабре 1973 года по программе проведения внеатмосферных астрофизических наблюдений с помощью обсерватории «Орион-2», установленной на борту космического корабля «Союз-13». Описаны конструкция и принцип работы обсерватории, ее компоновка на корабле «Союз-13» и методика ведения астрофизических наблюдений звезд с участием космонавтов. Изложены основные научные результаты, которые были получены при этом эксперименте.

Написана книга большим авторским коллективом: учеными, конструкторами, инженерами — создателями космической обсерватории «Орион-2» и корабля «Союз-13», а также космонавтами — участниками самого эксперимента. Книга предназначена для специалистов в области астрофизики и космонавтики.

О 3607000000-60
038(01)-84 — 60-84

ББК 396

6Т6

ПРЕДИСЛОВИЕ

Прошло более четверти века с момента запуска первого искусственного спутника Земли. Этот великий подвиг, осуществленный советским народом, явился началом новой эры в истории человечества — эры освоения космического пространства.

Для астрономической науки освоение космоса имеет огромное значение с самых различных точек зрения.

Прежде всего запускаемые в мировое пространство аппараты являются искусственными небесными телами. Следовательно, получает широчайшее применение разработанная в течение столетий небесная механика, то есть наука о движениях небесных тел, постоянно удивлявшая и ныне удивляющая людей точностью своих расчетов и предсказаний.

Вместе с тем освоение космоса раскрыло перед астрономией новые просторы для познания Вселенной и раскрытия ее тайн. Человечество получило возможность:

- 1) непосредственно подлетать к небесным телам, например к планетам и их спутникам, на близкое расстояние и изучать их в таких подробностях, о которых нельзя даже мечтать при наземных наблюдениях;

- 2) спускать аппараты и людей на небесные тела для еще более подробных исследований и опытов;

- 3) вести с помощью запускаемой в космос астрономической аппаратуры (оптической, радио, рентгеновской и т. д.) такие исследования далеких астрономических объектов (например, звезд, туманностей и галактик), которые трудно осуществлять с поверхности Земли из-за препятствий, вызываемых земной атмосферой.

Здесь важную роль играет поглощение атмосферой коротковолновых излучений небесных тел (ультрафиолетового излучения, рентгеновского и т. д.). Для того чтобы воспользоваться этой информацией, в нашей стране и за рубежом начала развиваться новая астрономическая наблюдательная техника, а на ее базе стали запускаться целые внеатмосферные обсерватории со все более мощными инструментами.

Одним из самых серьезных опытов в этом направлении явился запуск в 1973 году советской внеатмосферной обсерватории «Орион-2» на корабле «Союз-13».

Была поставлена задача получения ультрафиолетовых спектров возможно большего количества слабых звезд на участке спектра от двух до трех тысяч ангстрем.

В отличие от щелевых спектрографов, применявшихся в других экспериментах, здесь был использован телескоп системы Максудова с объективной призмой. Благодаря этому можно было на каждом снимке получать спектры сотен звезд, в том числе и спектры относительно слабых звезд. В этом эксперименте удалось получить спектры рекордно-слабых для того времени звезд — 13-й величины.

Обычно в этих экспериментах возникают многочисленные и сложные вопросы автоматического точного слежения при фотографировании спектров звезд. Благодаря упорной и целеустремленной работе отдела внеатмосферной астрономии Бюраканской обсерватории, где была создана вся аппаратура, эти трудности удалось преодолеть, и после полета «Союза-13» мы увидели первые удачные снимки ультрафиолетовых спектров звезд до 13-й величины.

Руководителем эксперимента и главным конструктором всех основных приборов обсерватории «Орион-2» является член-корреспондент Академии наук Армянской ССР Григор Арамович Гурзадян. Он с присущей ему одержимостью осуществлял обработку полученных снимков. Научные результаты экспериментов были опубликованы во многих советских и зарубежных научных журналах.

Сложная и трудная задача проведения наблюдений легла на замечательный экипаж корабля «Союз-13», состоявший из космонавтов П. И. Климук и В. В. Лебедева. Вследствие ограниченности имевшегося в распоряжении космонавтов времени они должны были работать с огромным напряжением, что и было сделано.

Академик В. А. Амбарцумян

ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

18 декабря 1973 года в 14 часов 55 минут по московскому времени в Советском Союзе на орбиту вокруг Земли была выведена астрофизическая обсерватория «Орион-2» на борту космического корабля «Союз-13». Корабль пилотировал экипаж в составе командира корабля Петра Ильича Климук и бортинженера Валентина Витальевича Лебедева.

В тот же день была проведена расчехловка обсерватории «Орион-2» — освобождение от жесткого крепления, необходимого для предохранения обсерватории от разрушения в период вертикального подъема космического корабля. Затем были проведены все намеченные тестовые испытания обсерватории, после чего экипаж приступил к выполнению программы астрофизических наблюдений с помощью «Ориона-2». Программа наблюдений была закончена 25 декабря 1973 года; за это время было проведено 16 продолжительных сеансов наблюдений за звездами в теневой части орбиты.

26 декабря экипаж корабля возвратился на Землю, доставив с собой кассету с фотопленкой «Ориона-2». Спустя неделю, 6 января 1974 года, фотопленка была проявлена со строгим соблюдением всех технологических циклов и подготовительных процедур, в частности, были получены стандартные спектрограммы в лабораторных условиях.

Так, впервые в руках советских астрофизиков оказались ультрафиолетовые спектральные снимки большого количества слабых звезд, полученные массовым способом — с помощью широкопольного светосильного телескопа системы Максутава. Затем начался длительный, многолетний период обработки этих спектрограмм, истолкования результатов измерений, опубликования и оформления полученных материалов в виде многочисленных сообщений, статей, обзоров и т. д., опубликованных на страницах шестнадцати астрономических и других научных журналов как в нашей стране, так и за рубежом.

«Орион-2» был первым крупным космическим астрофизическим экспериментом, осуществленным в СССР. Именно этот эксперимент позволил получить коротковолновые спектрограммы большого количества звезд до тринадцатой звездной величины, первую ультрафиолетовую спектрограмму планетарной туманности, открыть сверхмощные хромосферы у некоторых звезд поздних спектральных классов, обнаружить звезды со странными спектральными характеристиками, выделить непонятную группировку горячих звезд низкой светимости недалеко

от Капеллы, выявить интересные, ранее неизвестные закономерности в поведении ультрафиолетового дублета ионизованного магния 2800 Mg II в звездных спектрах, получить данные в пользу существования новой категории околозвездных облаков вокруг горячих звезд на основании некоторых особенностей звездных непрерывных спектров в ультрафиолете, получить новую информацию о коротковолновом лучеиспускании фотосфер звезд промежуточных спектральных классов и т. д.

Эксперимент «Орион-2» явился важным этапом также на пути развития советской ракетно-космической техники и космического приборостроения. Впервые специально для ведения астрофизических наблюдений с околоземной орбиты был предоставлен космический корабль из серии «Союз». От создателей «Союза-13» потребовалось немало умения, изобретательности и смелых инженерно-конструкторских решений для переоборудования космического корабля в космическую обсерваторию и для обеспечения ее надежной эксплуатации в условиях космического пространства.

Крупным достижением в области космического астрономического приборостроения явилась сама обсерватория «Орион-2». На ней впервые была осуществлена пространственная — трехосная стабилизация телескопической платформы исключительно средствами астронавигации, без использования гироскопов, с помощью двух опорных звезд ориентации и слежения. Создатели «Ориона-2» преодолели немало трудностей для обеспечения надежной работы всех агрегатов, узлов и систем обсерватории в довольно быстро меняющихся условиях космического полета.

Настоящая книга посвящена этому эксперименту — описанию отдельных этапов создания космической обсерватории «Орион-2» и космического корабля «Союз-13», их конструктивных и эксплуатационных особенностей, а также описанию работы космонавтов в сложных условиях космического полета. Поскольку значимость и эффективность любого космического эксперимента определяется в конечном итоге полученными результатами, то в книге значительное место отведено изложению научных результатов, полученных с помощью «Ориона-2», это сделано в восьми главах второй части книги. Эта часть изложена в достаточно доступной форме и в то же время с соблюдением научной строгости.

Следует особо подчеркнуть, что «Орион-2» не только дал много интересных результатов, но и поставил перед астрофизиками новые проблемы, для решения которых, видимо, необходи-

мо проведение новых внеатмосферных экспериментов, создание новых, более совершенных «Орионов».

Создание космического комплекса «Союз-13» — «Орион-2», его подготовка к натурным испытаниям, а также успешное проведение самого эксперимента стало возможным благодаря совместным усилиям и творческому взаимодействию большой группы ученых, инженеров, конструкторов, летчиков-испытателей, операторов наземных центров управления и прочих служб.

Авторами отдельных разделов настоящей книги являются: акад. В. А. Амбарцумян — предисловие; чл.-кор. АН СССР Б. В. Раушенбах — введение; чл.-кор. АН Арм. ССР Г. А. Гурзаян — разд. 2.1, 2.4, 2.5, 2.9, 2.10, 3.5, 4.1, 4.6, 4.7, 4.8, 5.1, 5.2, 5.4, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 8.1, 8.2, 8.3, 9.3, 10.1, 10.2, 11.1, 11.2; летчик-космонавт СССР проф. К. П. Феоктистов — разд. 1.1, 1.2; летчик-космонавт СССР П. И. Климук — разд. 3.4 и статья «Космический корабль на службе главного эксперимента»; летчик-космонавт СССР В. В. Лебедев — разд. 3.4, 3.5, 4.1, 4.6; А. Н. Максименко — разд. 1.1; Л. А. Горшков — разд. 1.2; С. А. Савченко — разд. 1.3; Г. К. Барышников — разд. 1.4, 1.5; А. И. Пахомов — разд. 1.6; В. В. Антонов — разд. 1.7; А. Л. Кашин — разд. 2.2, 2.3, 2.6, 2.7, 2.11, 2.12, 3.6; Г. М. Лорецян — разд. 2.4, 2.5; О. Н. Гаспарян — разд. 2.8; Г. И. Чабров — разд. 3.1; Дж. Б. Оганесян — разд. 2.13, 2.14, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 4.2, 4.3, 4.4, 4.9, 4.10, 9.1; С. П. Цыбин — разд. 3.7; С. С. Рустамбекова — разд. 4.5, 7.1, 7.2, 7.3, 9.1, 9.2, 9.4, 9.5, 11.3; Р. А. Епремян — разд. 5.3, 10.3.

В подготовке рукописи к печати принимала участие Э. Г. Абрамян, в подготовке иллюстративного материала первой и второй частей — Л. Г. Недоля и В. М. Мелконян.

Редакционная коллегия

ВВЕДЕНИЕ *

Вывод телескопов за пределы земной атмосферы — давняя мечта астрономов. При огромном разнообразии методов астрономических наблюдений заботы у всех астрономов одинаковые: им необходимо, чтобы небо было предельно прозрачным, чтобы стали доступными исследования в коротковолновом диапазоне, чтобы звезды не мерцали и, разумеется, было больше ясных безоблачных ночей. Но даже в самых лучших астроклиматических условиях эти требования могут быть удовлетворены лишь частично. Например, от мерцания звезд, которое вызывает столько волнений у астрономов и является непреодолимой преградой на пути повышения разрешающей способности телескопов, в принципе невозможно избавиться до тех пор, пока наблюдения ведутся с поверхности Земли. Ведь даже в самых благоприятных условиях земная атмосфера ограничивает разрешающую способность телескопов примерно одной секундой дуги. При полном же отсутствии мерцания, т. е. в безвоздушном пространстве, современные телескопы в состоянии обеспечить угловое разрешение поистине фантастическое — сотые доли секунды! А как быть с расширением диапазона длин волн в коротковолновую сторону, о чем мечтают астрофизики? Предел наземных наблюдений, как известно, лежит приблизительно на длинах волн 3100—3200 ангстрем. Чтобы продвинуться еще дальше в коротковолновую область хотя бы на несколько сотен ангстрем, нужно поднять телескоп на десятки километров.

Таким образом, радикальное решение обеих проблем — резкое повышение разрешающей способности телескопов и практически неограниченное расширение рабочего диапазона длин волн, охватывающего ультрафиолетовые, рентгеновские и гамма-лучи, напрашивается само собой: необходимо вынести астрономическую аппаратуру за пределы земной атмосферы, выше 100 километров.

«Решение напрашивается само собой», это, конечно, верно с наших сегодняшних «космических» позиций. А ведь, пожалуй, только в последние годы, скажем, последние два десятка лет, ученые начали понимать, что звездного неба они, вообще-то говоря, не видят, что многовековая история астрономии грозит превратиться в краткое предисловие к ее новейшей истории, первые страницы которой пишут наши современники. Телескоп

* Составлено по материалам периодической печати.

Галилея, построенный в 1610 году, сделал астрономов несравненно более зоркими и приблизил к ним звездные дали. Фотоэмульсии позволили накапливать слабый свет далеких светил и тем самым резко увеличили количество дотоле неведомых звездных архипелагов. Спектральный анализ «вдохнул во Вселенную жизнь», показал как она развивается.

И все-таки, если бы не родилась радиоастрономия, мы не скоро смогли бы понять, как же мало мы знаем о звездном небе. Словно мы разглядывали его в замочную скважину и только теперь начинаем распахивать эту «дверь в космос». Подлинную революцию в наших знаниях о Вселенной призвана совершить астрономия космического века — внеатмосферная астрономия: вынос телескопа на орбиту искусственного спутника Земли.

Вот что сказал по этому поводу член-корреспондент АН Арм. ССР Г. А. Гурзян: «Как показывают расчеты, телескоп с диаметром зеркала в один метр, работающий во внеатмосферных условиях, будет равен по своей эффективности наземному телескопу с диаметром зеркала пять метров. А если когда-нибудь удастся вывести на орбиту вокруг Земли или доставить на Луну, лишенную атмосферы, такой пятиметровый телескоп, то он будет эквивалентен земному телескопу с 25—30-метровым зеркалом! С помощью такого телескопа можно было бы сфотографировать крупные планеты типа «Юпитер», расположенные вокруг ближайших к нам звезд. Подобный телескоп позволил бы увидеть звезды до 28-й звездной величины. Отсюда следует, что вывод крупных астрономических инструментов в космическое пространство — это средство резкого повышения эффективности наблюдений и существенного расширения возможностей проникновения во Вселенную».

Но почему же все-таки астрономам мало вести наблюдения в оптическом диапазоне длин волн? А дело в том, что небесные тела испускают (и в огромных количествах) также ультрафиолетовые и рентгеновские лучи. Но они не попадают к наблюдателю, находящемуся на поверхности Земли. Бдительный страж — атмосфера (озон, кислород, азот) поглощает их без остатка. Между тем, как раз у этих лучей огромная информативность. Один только факт наличия или отсутствия, например рентгеновского излучения у того или иного объекта, может очень многое сказать о его природе. Так, именно средствами внеатмосферной астрономии было установлено существование небесных тел — исключительно мощных источников рентгеновского излучения. Некоторые из них совершенно недоступны для наблюдения в обычных оптических лучах. Речь идет о сверж-

плотных звездах (их называют также нейтронными), существование которых теоретически было предсказано более пятидесяти лет назад, но реально открытых только в последние годы.

Есть галактики — гигантские генераторы рентгеновского излучения, по суммарной мощности превышающего их излучения в оптическом и радиодиапазонах, вместе взятых. На область ультрафиолетовых и рентгеновских лучей приходится подавляющая доля излучения горячих звезд, солнечной и вообще звездных корон, хромосфер.

Уже сегодня астрофизики и физики стоят перед многозначительным фактом: в энергетическом балансе Вселенной на оптический диапазон приходится небольшая доля, основная же форма энергии представлена ультрафиолетовыми, рентгеновскими и гамма-лучами, а также элементарными частицами (космические лучи). Между тем, все наши умозаключения о строении и развитии Вселенной еще до недавнего времени основывались на той, по сути дела скудной информации, которую мы черпали средствами наземной астрономии.

Когда речь идет об отличии одной звезды от другой, то имеется в виду прежде всего разница в температурах поверхности. А она колеблется в огромных пределах — от 2500 К у самых «холодных» до 50 000 К и выше у «горячих» звезд. Если оставаться в обычных «тепловых» рамках выделения энергии излучения, то сразу можно сказать, что высокотемпературные звезды должны быть очень мощными источниками ультрафиолетового излучения, а холодные — нет. Так ли это в действительности? Так. Но вместе с тем, когда мы переходим в область очень коротких волн и рентгеновских лучей, качественные отличия между отдельными звездами становятся все меньше и меньше. Понятие «температура звезды» все больше и больше начинает терять свой первоначальный физический смысл. Например, взглянув на рентгеновские спектрограммы, мы не сможем догадаться, какая из них принадлежит, скажем, Солнцу, температура поверхности которого равна 6000 К, а какая звезде с температурой 100 000 К. Происходит это потому, что в области рентгеновских, гамма- и отчасти ультрафиолетовых лучей преобладающую роль играют процессы, которые астрофизики называют «нетепловыми». Такие процессы (во всяком случае так трактуют современные физика и астрофизика) связаны с ядерными превращениями в одних случаях и взаимодействиями элементарных частиц высоких энергий, в других.

Но многие факты — и прежде всего взрывы Новых звезд, регулярные вспышки холодных карликовых звезд, катастрофи-

ческие взрывы ядер галактик, само существование квазаров — говорят о том, что во Вселенной должны быть доселе неизвестные источники энергии или процессы, приводящие к постоянному выделению громадного количества энергии.

Таким образом, есть все основания предполагать, что за «ультрафиолетовыми», «рентгеновскими», «гамма» и им подобными объектами стоят качественно новые физические понятия, не совместимые с обычными представлениями о природе знакомых нам небесных тел. Вот почему их изучение приобретает особое значение для науки. История астрономии знает не один пример того, как каждое расширение достигнутых границ познания наталкивало на новые, совершенно до того не ведомые явления, связанные с иным состоянием вещества. Известные нам законы физики установлены на основе наблюдений окружающего нас пространства, так или иначе ограниченного из-за ограниченности средств наблюдения. Никто еще не доказал универсальность и неизбежность этих законов.

Как уже отмечалось, для того чтобы принимать ультрафиолетовые или рентгеновские лучи, необходимо поднять телескоп или целую астрономическую обсерваторию с соответствующими средствами регистрации излучения на сто и более километров над поверхностью Земли, иными словами, создать обсерваторию на околоземной орбите, на Луне или запустить ее в дальний космос. Но вынос астрономической аппаратуры за пределы земной атмосферы лишь половина дела. Надо еще суметь провести наблюдения с помощью такого телескопа в условиях космического пространства, без «опоры» под собой. А это совсем непросто, ибо возникают исключительно сложные проблемы автоматического управления ориентацией и стабилизацией платформы, несущей астрономические приборы. Такая платформа должна «уметь» следить за звездой, галактикой или планетой с очень высокой точностью, порядка секунды и даже долей секунды дуги.

Один из перспективных путей выноса астрономической аппаратуры за пределы атмосферы — установка астрофизической обсерватории на орбитальных станциях. Первая попытка такого рода была сделана в нашей стране, когда космическая станция «Салют» поднялась на орбиту, неся на борту астрофизическую обсерваторию «Орион», предназначенную для изучения ультрафиолетовых спектров отдельных звезд. Сама обсерватория была размещена в открытом космосе на корпусе станции. Задача космонавтов в этом случае заключалась в том, чтобы с помощью системы дистанционного управления направить телескоп на

выбранную звезду. Решалась задача с помощью специальной визирной системы, установленной напротив одного из иллюминаторов станции. Когда космонавт направлял эту визирную систему в сторону исследуемой звезды, специальная следящая система сама осуществляла нужные развороты телескопа так, что звезда оказывалась в поле его обзора. Затем с помощью другой, более тонкой автоматической системы изображение звезды постоянно удерживалось точно на оптической оси телескопа, хотя сама орбитальная станция испытывала в это время значительную «качку» во всех направлениях. После этих подготовительных операций космонавту оставалось нажать кнопку программного устройства, которое и обеспечивало получение намеренной серии спектрограмм звезды.

Первый опыт работы космической обсерватории «Орион» увенчался успехом, а заложенный в ее основу принцип работы оправдал себя полностью. Было получено шесть спектрограмм горячей звезды Агены (бета Центавра) и девять спектрограмм звезды Вега (альфа Лиры). Это были первые ультрафиолетовые спектрограммы звезд, полученные во внеатмосферных условиях в нашей стране.

Обработка спектрограмм дала очень интересные результаты. В частности, найденное в эксперименте распределение энергии в спектре Веги, температура которой равна 10 000 К, оказалось в хорошем согласии с теорией. Ученые получили основание использовать в дальнейшем эту звезду в качестве удобного энергетического «небесного стандарта». В ультрафиолетовой части спектра Веги обнаружили больше 60 линий, принадлежащих однажды ионизованным металлам (в основном железу, никелю, хрому, титану, ванадию). Наблюдения Агены — звезды с температурой около 24 000 К — указали на какой-то дополнительный источник в области ультрафиолетовых лучей.

Впрочем, хотя эти результаты были чрезвычайно любопытными, все понимали, что это пока пусть и многообещающее, но только начало. Настоящие поиски были впереди, как и бессонные ночи, уготованные ученым и конструкторам новой астрофизической обсерватории на орбите — «Ориону-2». Внеатмосферная астрономия становилась «на ноги».

И вот в соответствии с программой исследований в околоземное космическое пространство был запущен космический корабль «Союз-13». Командиру корабля П. И. Климуку и бортинженеру В. В. Лебедеву предстояло с помощью установленной на борту системы телескопов «Орион-2» провести астрофизические наблюдения звезд в ультрафиолетовом диапазоне.

Что же представлял собой «Орион-2»? От своего собрата «Ориона-1» он отличался тем, что имел широкопольный менисковый телескоп, который мог спектрографировать в ультрафиолетовом диапазоне звезды до 13-й звездной величины на площади в 20 квадратных градусов. Вся его оптика была изготовлена из плавленного кварца, пропускающего волны требуемой длины и не боящегося резких температурных колебаний в космосе.

Для того чтобы предохранить delicate узлы телескопа и управляющих им систем от вибрации, ударов и перегрузок, неизбежных во время работы ракетных двигателей при выводе корабля на орбиту, вся система жестко крепилась к корпусу корабля с помощью пирозамков. (В первый же день после старта П. И. Климук и В. В. Лебедев освободили обсерваторию от «захвата» этих замков и приступили к настройке аппаратуры.).

Телескоп «Орион-2» с фотоприставкой был установлен снаружи орбитального отсека, на месте стыковочного узла, имеющегося на орбитальных кораблях «Союз». «Орион-2» имел защитный купол, который обеспечивал нормальный температурный режим, предохраняя телескоп от перегрева на солнечной стороне орбиты и от переохлаждения — на теневой. В куполе напротив объектива телескопа находилось «окно» с двухстворчатой крышкой, открывающейся только на время проведения эксперимента.

Телескоп наводился на заданный участок неба следующим образом: сначала экипаж, пользуясь системой ручного управления и гироскопами корабля, как можно более точно ориентировал корабль так, чтобы оптическая ось телескопа была направлена в сторону достаточно яркой опорной звезды.

Опорная звезда (потому она и носит такое название) служит лишь ориентиром для того, чтобы удержать телескоп направленным на заданную область неба, где находятся именно те звезды, спектрограммы которых и представляют интерес.

Далее, бортинженер В. В. Лебедев, находящийся в орбитальном отсеке, с помощью оптического визира, связанного с телескопом дистанционной следящей системой, более точно наводил телескоп на опорную звезду. Для этого он поворачивал телескоп относительно корпуса космического аппарата. Затем включал автоматическую следящую систему, на долю которой приходились окончательное наведение и стабилизация телескопа в направлении на звезду с точностью до нескольких угловых секунд. Но одно дело, когда телескоп стоит на скалистой тверди

Бюракана и совсем другое — на борту космического корабля, который может поворачиваться в любом направлении. Чтобы не допустить вращения телескопа вокруг его оптической оси (это ведет к «смазыванию» изображения на фотографиях), телескоп стабилизировался не только по основной опорной звезде, но и по второй, так называемой «базисной» звезде. Далеко расположенные друг от друга, они образовывали жесткую базу для дальнейших работ. В качестве таких пар звезд были выбраны: бета Тельца и альфа Большой Медведицы или эпсилон Ориона и гамма Андромеды. Выбор этот не произволен, он — результат глубокого математического анализа, который проводился на электронно-вычислительных машинах.

Датчики удерживали в поле зрения «пойманные» базисные звезды автоматически, с помощью системы электроприводов. Они могли подправить самые незначительные, измеряемые несколькими угловыми секундами, смещения платформы «Ориона-2», тем более реальную качку, которая была много больше из-за колебаний корабля, неизбежных в процессе работы системы управления ориентацией.

Вся логика поиска и захвата небесных объектов «Орион-2» была отработана на «Орионе-1». Правда, на обсерватории «Орион-1» проводилось лишь индивидуальное спектрографирование отдельных звезд. На одном же кадре «Ориона-2» — сотни спектрограмм, а количество исследуемых звезд измерялось тысячами. Получаемые с помощью звездного телескопа спектрограммы излучения звезд выбранного участка неба фиксировались на специальной высокочувствительной фотопленке, причем каждый участок неба фотографировался с разными выдержками (от 1 до 18 минут). Это позволило получить на серии фотографий четкие спектрограммы большого количества как ярких (короткие выдержки), так и слабых звезд (длительные выдержки). За время полета экипаж провел 16 сеансов спектрографирования излучения звезд различных участков неба.

Но вот закончился полет, результаты которого многие ученые мира называли научной сенсацией. Экипаж корабля «Союз-13» доставил на Землю кассеты с отснятой фотопленкой космической обсерватории «Ориона-2». Этим завершился первый — орбитальный — этап эксперимента с «Орионом-2» и начался второй — наземный. Дальнейшая обработка фотопленки велась в лабораторных условиях. Специалисты тщательно обрабатывали привезенные с орбиты пленки, скрупулезно изучили каждое засвеченное «пятно», все эти незамысловатые белые,

чуть вытянутые капельки-дождевики на черном, как южное небо, фоне.

Прежде всего ученых порадовала чистота фона пленки. Вуаль от свечения ночного неба — досадная помеха при ведении астрофизических наблюдений с поверхности Земли — на доставленных из космоса пленках отсутствовала. Благодаря этому спектрограммы весьма отчетливы, что значительно увеличило их информативность, резко повысило эффективность работы телескопа. Удалось получить изображения слабых звезд. Астрономы стали обладателями ультрафиолетовых спектрограмм звезд двенадцатой величины в области длин волн короче 3000 ангстрем. Эти звезды в тысячу с лишним раз слабее тех, которые видит человек невооруженным глазом. Очень ценно, что стабилизированная платформа, которая обеспечивала отслеживание звезды с точностью до нескольких секунд дуги, могла «удерживать» такую стабилизацию в течение всего периода прохождения космического корабля по теневой части орбиты, т. е. тридцать минут. Создание такой стабилизированной платформы само по себе представляло инженерную проблему исключительной сложности. Немало было трудностей и чисто навигационных. Даже подбор «опорных» звезд для каждого витка — задача далеко не простая.

За пять дней работы на орбите «Ориону-2» удалось получить спектральные снимки многих тысяч звезд. Звезды были сняты самые разные. Одни очень молодые, другие в весьма преклонном возрасте. На пленках есть звезды очень горячие и крайне холодные, звезды близкие и далекие, звезды гигантских размеров и совсем карлики. Только в одной области неба, вокруг яркой звезды альфа Возничего — Капеллы на пленках удалось зарегистрировать свыше двух тысяч звезд, не входящих в существующие каталоги. Среди них оказались объекты с совершенно необычной спектральной структурой.

Впервые удалось получить ультрафиолетовую спектрограмму интереснейшего для астрономов объекта — планетарной туманности. Эти объекты очень далеки и, несмотря на свои колоссальные размеры, не бывают ярче десятой звездной величины. Типичная туманность представляет собой газовое образование с горячей звездой в центре. Что же нового смог увидеть «Орион-2» в этих объектах? Например, впервые были зарегистрированы два новых для планетарных туманностей химических элемента — алюминий и титан. Надо сказать, что за все годы изучения таких туманностей с Земли у них обнаружено лишь 17 элементов, причем ни одного нового за последнюю четверть века!

Круг астрофизических проблем, решаемых с помощью спектрографирования в ультрафиолетовом диапазоне, очень широк. Даже первые, во многом еще несовершенные, работы в этой области спектра позволили, например, обнаружить в атмосфере Солнца таинственные слои с более низкой температурой, чем те, которые лежат выше и ниже их. Ультрафиолетовые спектры рассказали нам и о самых горячих гигантских звездах, температура поверхности которых больше 100 тысяч градусов. «Ультрафиолетовая астрономия только начинается, — писал незадолго до полета корабля «Союз-13» один известный американский астроном. — Мы достигли первых успехов в цепи многообещающих открытий, и по мере ввода в действие крупных телескопов на искусственных спутниках мы можем ожидать новых сюрпризов».

Получаемая ценная информация помогает лучше постигать сложные физические процессы, протекающие в атмосферах звезд, механизм их образования и формирования и закономерности развития.

К примеру, бытует мнение, будто термоядерные реакции бушуют только в недрах звезд. Но в последнее время все чаще наблюдаются факты, указывающие на возможность протекания таких реакций и в наружных областях звезды, сопровождаемых к тому же выделением мощного коротковолнового излучения. Астрофизики нередко сталкиваются с так называемыми нестационарными явлениями, когда излучательная способность небесного тела и даже состав самого излучения быстро меняются. Часто оно имеет нетепловое происхождение, т. е. не вызвано нагретым газом, а генерируется в специфических условиях элементарными частицами высокой энергии. Основная доля такого «нетеплового» излучения, оказывается, приходится на ультрафиолетовую область спектра и может быть обнаружена опять-таки в результате анализа спектрограмм.

Доставленную с орбиты фотопленку использовали и в целях спектральной классификации слабых звезд, что представляет большой практический интерес для звездной статистики и космогонии. Здесь уместно вспомнить, что на спектрограммах, полученных «Орионом-2», в области неба вокруг Капеллы имеется гораздо больше горячих звезд, чем было известно раньше. К тому же эти горячие звезды одновременно очень слабые. С точки зрения звездной космогонии такой факт может иметь немаловажное значение.

Эксперимент с «Орионом-2» в основном предусматривал изучение непрерывных спектров звезд. Однако на изображениях

многих объектов заметны отдельные спектральные линии, принадлежащие различным химическим элементам. Особенно четко видна линия с длиной волны около 2800 ангстрем, принадлежащая ионизованному магнию. Она является источником важных сведений о звездных атмосферах и ее изучение дает надежду установить закономерности «поведения» этой линии у звезд с различной температурой, массой, размером и другими физическими характеристиками.

Но сколько бы ни говорилось в превосходной степени о совершенстве научной аппаратуры, и выдающихся научных результатах эксперимента, проведенного на космическом корабле «Союз-13», необходимо всегда помнить: во многом успеху очень способствовала блестящая работа экипажа — П. И. Климука и В. В. Лебедева. Руководитель эксперимента член-корреспондент АН Арм. ССР Г. А. Гурзадян дал наивысшую оценку действиям обоих космонавтов: «Они работали как настоящие специалисты. Мы еще в Армении во время наземной подготовки обратили внимание на их увлеченность астрономией. Лебедев, например, настолько хорошо знает звездное небо, что работал без карт, без дополнительных потерь времени. Он сжился с Орионом, буквально чувствовал все его «запросы», работал уверенно и смело. Лебедеву требовалось всего 15—20 секунд, чтобы прицелиться на первый опорный объект. Четко и безупречно выполнял свою работу, управление кораблем, летчик-космонавт Климука.

Наша программа предъявляла нестандартные требования к их работе, и мы очень довольны тем, с какой быстротой и точностью они действовали в сложных условиях космического полета. Космонавты чувствовали «Орион-2», как настоящие исследователи. Они отлично справились со сложным экспериментом и тем самым внесли значительный вклад в молодую науку, можно сказать — в науку будущего.

Ученые и специалисты из разных стран выражали свое восхищение научными результатами, полученными с помощью «Ориона-2». Лео Голдберг, бывший тогда президентом Международного астрономического союза, писал Г. А. Гурзадяну: «Хочу поблагодарить за то, что Вы прислали мне материалы с великолепными результатами, полученными с космической обсерватории «Орион-2», и поздравить Вас и ваших сотрудников с прекрасным достижением...». Маргарет Бёрбидж, королевский астроном из Англии: «Эти ультрафиолетовые спектрограммы действительно очень интересны, и я хотела бы поздравить Вас с успехом...» А Уильям Шоукросс из американского журнала

НТБ п/я Г-4149

«Скай энд телескоп» выразился так: «...Публикуем ваши очаровательные(!) результаты по исследованию ультрафиолетовых спектров слабых звезд из космоса...».

Джеймс Е. Оберг (НАСА, США, 1977): «Взамен 20-тонной станции, в которой команда из трех человек может жить и работать в течение месяца, астрономы в этом случае могли бы быть удовлетворены, что семитонный «Союз» с двумя космонавтами так работал на орбите в течение всего одной недели. В результате фотографирования различных областей неба телескопом с полем зрения в пять градусов были получены спектральные снимки многих тысяч звезд до 13-й величины. Следует отметить, что при этом была получена первая спутниковая ультрафиолетовая спектрограмма одной планетарной туманности...»

Научная программа экипажа космического корабля «Союз-13» не была ограничена только вопросами астрофизики. С борта «Союза-13» был проведен также эксперимент по фотографированию земной поверхности в различных участках спектра. Съемку проводили специальным многообъективным фотоаппаратом. Каждый исследуемый участок земной поверхности фотографировали в девяти спектральных зонах — от видимой до ближней инфракрасной. Полученные снимки позволили уточнить (для дальнейших экспериментов) необходимые зоны спектра, фотоматериалы, экспозиции.

Помимо этого, П. И. Климук и В. В. Лебедев с помощью ручного спектрографа фотографировали природные образования земной поверхности сумеречного и дневного горизонта Земли. Такие съемки «космической зари» позволяют судить о содержании в атмосфере пыли и ее оптических свойствах.

В программу научных экспериментов входили медико-биологические исследования. Среди них нужно отметить изучение характера перераспределения крови в организме человека во время космического полета. В невесомости, как известно, из-за отсутствия гидростатического давления происходит отток крови от ног и приток ее к верхней части тела, в частности, к голове. Это становится причиной ухудшения самочувствия космонавтов в первые дни пребывания на орбите. Механизм реакции и адаптивных возможностей системы кровообращения головного мозга изучался с помощью аппаратуры «Левкой» и в спокойном состоянии и после выполнения космонавтами дозированных нагрузок.

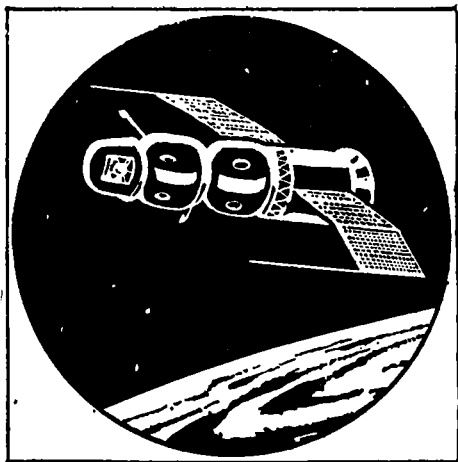
На борту космического корабля «Союз-13» исследовалось влияние факторов космического полета и, в первую очередь, невесомости на развитие низших растений (хлореллы и ряски).

Изучались также особенности развития двух видов микроорганизмов (водородных бактерий и уробактерий) в невесомости и получение в результате этого эксперимента белковой массы для последующего анализа ее биохимического состава.

Наряду с научными исследованиями экипаж «Союза-13» выполнил ряд технических экспериментов. Цель их — отработка новых приборов для дальнейшего их исследования в усовершенствованных бортовых системах.

1

Часть



АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ «ОРИОН-2» НА КОСМИЧЕСКОМ КОРАБЛЕ «СОЮЗ-13»

Подлинную революцию в наших знаниях о Вселенной призвана совершить астрономия космического века — внеатмосферная астрономия. В конце декабря 1973 года произошел поворот в советской космической астрономии. Космический корабль "Союз-13", в сущности, — внеатмосферная обсерватория, с космонавтами на борту был выведен на орбиту. В задачу этого полета входило прежде всего исследование звезд. Для этого на "Союзе-13" была установлена астрофизическая обсерватория "Орион-2". Обсерватория крепилась вне корабля, на "вершине" орбитального отсека. "Орион-2" — сложный комплекс оптических, электронных, электрических и механических систем. Основной прибор обсерватории — звездный телескоп, позволяющий снимать коротковолновые спектрограммы всех звезд ярче 9,5 звездной величины.

КОСМИЧЕСКИЙ КОРАБЛЬ «СОЮЗ-13»

1.1. Конструкция и возможности корабля «Союз-13»

Космический корабль «Союз-13» был создан на базе аналогичных кораблей этой серии, однако был существенно переоборудован для ведения астрофизических наблюдений с помощью космической обсерватории «Орион-2».

Космический корабль «Союз-13» состоит из бытового отсека, спускаемого аппарата и приборно-агрегатного отсека с двигательной установкой.

Бытовой отсек расположен в передней части корабля и сообщается со спускаемым аппаратом с помощью герметичного люка. Предназначен этот отсек для отдыха космонавтов и проведения научных исследований.

Если на кораблях «Союз», использовавшихся для полетов на орбитальные станции «Салют», в передней части отсека устанавливался стыковочный узел, то на корабле «Союз-13» в передней части располагался еще один отсек, негерметичный, внутри которого была установлена обсерватория «Орион-2».

В бытовом отсеке корабля размещены агрегаты системы обеспечения жизнедеятельности, продукты питания, запас воды, научная, кино- и фотоаппаратура, аппаратура связи, а также аппаратура наведения и управления обсерватории. Запасы продуктов и система жизнеобеспечения, расположенные в бытовом отсеке, позволяли осуществить полет корабля с экипажем из двух человек до 10 суток.

При проведении астрономических наблюдений герметичный люк между бытовым отсеком и спускаемым аппаратом находился в открытом состоянии. Это позволяло экипажу вести одновременно управление кораблем из спускаемого аппарата и обсерваторией — из бытового отсека.

Известно, что основное назначение спускаемого аппарата — доставка на Землю экипажа и полезного груза (как правило, — это результаты научной и экспериментальной работы экипажа в космосе, отснятые кино- и фотоматериалы, а также всевозможные образцы). Наряду с этим спускаемый аппарат является кабиной космонавтов, в которой сосредоточены основные элементы управления кораблем. В спускаемом аппарате экипаж находится на участке выведения корабля на орбиту, при маневрировании на орбите и при спуске на Землю.

Корпус спускаемого аппарата герметичен и защищен снаружи теплозащитным покрытием, предохраняющим его от нагрева

на участке спуска. Форма аппарата, обладающая соответствующим аэродинамическим качеством, обеспечивает при полете в атмосфере аэродинамическую подъемную силу необходимой величины. Путем ее изменения осуществляется управление полетом на участке спуска аппарата в атмосфере. Использование аэродинамического качества обеспечивает достаточно малые величины перегрузок, действующих на спускаемый аппарат и, естественно, на экипаж при спуске в атмосфере.

В спускаемом аппарате размещены два кресла космонавтов, аппаратура систем управления кораблем, жизнеобеспечения, терморегулирования, радиоаппаратура и др. В специальных герметичных контейнерах находятся две парашютные системы — основная и запасная.

На корпусе спускаемого аппарата установлены двигатели системы управления спуском, обеспечивающие поддержание требуемого положения аппарата в пространстве при его полете в атмосфере. На его нижней части установлено четыре двигателя мягкой посадки, позволяющие к моменту касания Земли практически полностью погасить удар при приземлении на парашюте.

В спускаемом аппарате, непосредственно перед космонавтами, установлен пульт управления кораблем. На пульте расположены приборы для контроля работы систем и агрегатов корабля, навигационное оборудование, телевизионный экран и клавишные переключатели и тумблеры для управления бортовыми системами корабля. Рядом с пультом на иллюминаторе установлен визир-ориентатор, обеспечивающий экипажу возможность визуального контроля положения корабля относительно Земной поверхности.

В центре кабины спускаемого аппарата расположено кресло командира корабля, а справа от него — кресло бортинженера-исследователя. По бокам кресла командира размещены ручки управления кораблем: правая — для управления ориентацией корабля и левая — для изменения линейной скорости корабля при маневрировании. По левому и правому бортам в спускаемом аппарате имеются иллюминаторы для визуального наблюдения, киносъемки и фотографирования.

В кабине установлены контейнеры с запасами воды и пищи. В верхней части спускаемого аппарата находится люк, сообщающийся с бытовым отсеком и служащий для посадки космонавтов на старте и выхода из аппарата после приземления.

В кабине спускаемого аппарата на всех участках полета системами терморегулирования и обеспечения жизнедеятель-

ности поддерживается нормальное атмосферное давление, газовый состав, влажность и температура, которая может регулироваться космонавтами для поддержания комфортных условий.

При спуске с орбиты на высоте около девяти километров открывается крышка основного парашютного контейнера и вводится в действие тормозной парашют, а затем купол основной парашютной системы, на котором осуществляется приземление. Непосредственно перед приземлением на высоте около метра включаются пороховые двигатели мягкой посадки.

Спускаемый аппарат оснащен радиосистемами, позволяющими проводить его пеленгацию на участке парашютирования и после приземления.

В приборно-агрегатном отсеке размещены основная аппаратура и двигательные установки корабля, работающие в орбитальном полете. Аппаратура и оборудование вмонтированы в герметичном отсеке, внутри которого поддерживаются условия, необходимые для нормального функционирования аппаратуры. В нем сосредоточены агрегаты системы терморегулирования, буферные блоки системы единого электропитания, аппаратура дальней радиосвязи и радиотелеметрии, приборы систем ориентации и управления движением со счетно-решающими устройствами.

В негерметичной части приборно-агрегатного отсека установлена жидкостная реактивная двигательная установка, которая используется для выполнения маневров на орбите, а также для торможения корабля при спуске на Землю.

На внешней поверхности приборно-агрегатного отсека размещены датчики системы ориентации и основные антенные устройства корабля, а также солнечные батареи и блоки резервной батареи системы единого электропитания корабля.

1.2. Бортовые системы корабля

Одной из основных систем корабля является система ориентации и управления движением. Она обеспечивает стабилизацию и ориентацию корабля в пространстве, управление при коррекции орбиты и маневрировании. Система может работать как в автоматическом режиме по командам с Земли, так и в режиме ручного управления экипажем.

Корабль «Союз» оснащен комплексом радиотехнических средств, обеспечивающих определение совместно с наземными пунктами параметров орбиты, прием команд с Земли, двустороннюю радиотелефонную и телеграфную связь космонавтов с

Землей в различных диапазонах волн, передачу на Землю телевизионного изображения из отсеков корабля и внешней обстановки.

Бортовая телевизионная система имеет три телекамеры и обеспечивает качественную передачу изображения нормального стандарта (625 строк при 25 кадрах в секунду), позволяющую вести непосредственно передачу в наземную телевизионную сеть.

Многоканальные телеметрические системы корабля обеспечивают возможность проведения большого объема измерений контролируемых параметров и передачу полученной информации как в режиме непосредственной передачи, так и в режиме записи ее на запоминающем устройстве с последующим воспроизведением в зоне наземных пунктов связи.

Создание нормальных физиолого-гигиенических условий для экипажа корабля обеспечивается комплексом систем жизнеобеспечения и средств регенерации атмосферы.

Температурный режим в отсеках корабля поддерживается системой терморегулирования. Она обеспечивает не только оптимальную температуру, но и необходимую влажность в отсеках, в которых находятся космонавты. По своему желанию они могут регулировать уровень температуры и влажность в отсеках.

Система единого электропитания корабля состоит из двух солнечных батарей, установленных на приборно-агрегатном отсеке корабля, а также блоков буферной и резервной батарей, позволяющих проводить их зарядку от солнечных батарей.

Система управления бортовым комплексом аппаратуры и оборудования выполнена таким образом, что управление кораблями «Союз» может выполняться как полностью автоматически по командам с Земли, так и вручную экипажем с пульта космонавтов.

Одна из особенностей корабля «Союз-13», предназначенного для астрофизических исследований, заключается в том, что в отличие от его обычных модификаций, использовавшихся для транспортных целей — доставки экипажей на орбитальную станцию, — он сам по сути дела является орбитальной станцией для выполнения астрофизических наблюдений и фотографирования отдельных участков звездного неба. В этом случае нужно было в программе полета обеспечить возможно большую эффективность использования времени, отводимого под эксперимент. С этой целью параметры орбиты, время пуска корабля, продолжительность полета, а также режим работы космонавтов были

выбраны прежде всего исходя из необходимости наблюдения участков звездного неба, предусмотренных программой полета. При этом время для наблюдений с учетом всех имеющихся ограничений должно быть максимальным.

Другой особенностью корабля «Союз-13» является то, что точности наведения и ориентации корабля и стабилизации его во время эксперимента совместно с системой управления обсерватории «Орион-2» должны были обеспечить достаточно высокие характеристики, ранее от корабля «Союз» никогда не требовавшиеся. Так, точность наведения и удержания астроплатформы с телескопом в режиме инерциальной ориентации должна была составлять единицы секунд, что потребовало разработки соответствующей схемы установки обсерватории и системы ее управления и серьезной ее отработки совместно с бортовым комплексом.

1.3. Бортовое оптическое оборудование

Космический корабль оснащен также и оптическими приборами — автоматическими и визуальными.

Основным оптическим автоматическим прибором является построитель местной вертикали. Принцип работы этого прибора основан на одном хорошо известном явлении: в инфракрасных лучах Земля на фоне космоса кажется ярким светящимся диском. Максимум излучения Земли лежит на длине волны порядка 10 мкм, а средняя радиационная температура слоев атмосферы, принимаемых за край Земли, соответствует 250 К. Температура звездного неба составляет всего 4 К. Поток же излучаемой энергии пропорционален четвертой степени абсолютной температуры, поэтому с помощью приемника теплового излучения достаточно просто обнаружить диск Земли — как в теневой части, так и в освещенной солнечной части — и, сканируя по ее лимбу, найти направление на геометрический центр. Такой построитель местной вертикали достаточно прост, надежен в работе и позволяет определять направление на центр Земли с точностью порядка одного градуса, что вполне достаточно для решения задач коррекции траектории с целью формирования заданной орбиты и предварительного наведения телескопа «Орион-2» на заданный участок звездного неба. Для работы этого прибора необходимо, чтобы часть его поля зрения сканировала по лимбу Земли, а остальная часть была свободна от излучения Земли и «видела» космос. Иначе говоря, для функционирования прибора необходимо постоянное сравнение сиг-

нала, поступающего одновременно от Земли и космического пространства. На Земле, на высотах порядка десятков километров, такой прибор работать не может, так как излучение верхней атмосферы вполне сравнимо с излучением поверхности Земли, и получить значительную разницу в сигнале при перераспределении заполнения поля зрения Землей и ее атмосферой не удастся.

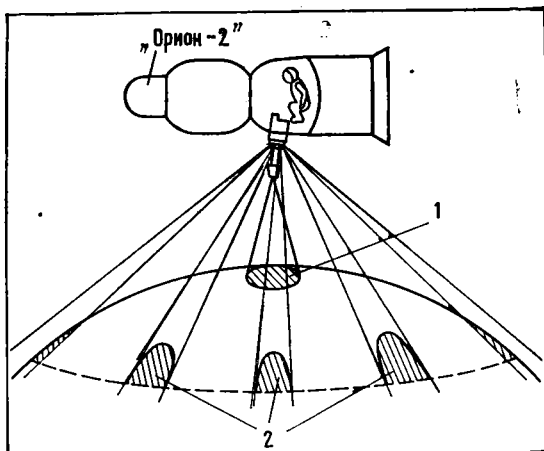
Хотя строители вертикали зарекомендовали себя как точные и надежные приборы, было бы противоестественным для пилотируемых кораблей не разработать простую и, следовательно, очень надежную систему визуального контроля ориентации. Для осуществления такого контроля прежде всего необходимо получать информацию в видимом диапазоне длин волн внутри гермоотсека корабля. Для этой цели внутри спускаемого аппарата размещены сложные иллюминаторы. Такие иллюминаторы, в отличие от иллюминаторов пассажирского салона самолета, должны сохранять свои характеристики после воздействия целого ряда факторов космического пространства. Вместе с тем оптические характеристики иллюминаторов должны быть настолько высокими, чтобы можно было сохранить разрешающую способность зрения человека. Необходимо так же, чтобы иллюминаторы не искажали естественный цвет объектов наблюдения, имели максимальный коэффициент светопропускания, создавали минимум светового фона и в то же время не загрязнялись и не запотевали при всех сложных условиях полета. Все это достигается использованием высококачественного кварцевого стекла и комплекса оптических покрытий, уменьшающих блики от поверхностей стекол и оправ иллюминатора и предотвращающих запотевание и обмерзание иллюминаторов.

Два оптических иллюминатора спускаемого аппарата диаметром более 200 мм, расположенных друг против друга, обеспечивают удобный обзор пространства в пределах конуса с углом не менее 90° , что позволяет легко обнаруживать Землю и определять направление разворотов. В ночных условиях (теневая часть орбиты) космонавт достаточно легко может опознать участок звездного неба и проконтролировать, а при необходимости и построить заданную ориентацию. Третий иллюминатор спускаемого аппарата занят стационарно установленным визиром контроля орбитальной ориентации. Его ось совпадает с осью автоматического строителя местной вертикали.

В бытовом отсеке корабля установлены четыре более простых по конструкции иллюминатора, размещенных по осям корабля, что обеспечивает обзор почти всей сферы, за исключе-

Рис. 1.1. Схема наблюдения поверхности Земли для контроля ориентации по местной вертикали:

1 — участок поверхности Земли, наблюдаемый в ИВ;
2 — участки видимого горизонта Земли, наблюдаемые в канале вертикали



нием участков вдоль продольной оси космического корабля. Такой обзор особенно необходим при проведении астрофизических экспериментов с автономным наведением корабля и телескопа на заданные участки звездного неба.

В спускаемом отсеке корабля космонавт может контролировать и строить орбитальную ориентацию, сначала наблюдая в боковые иллюминаторы, а затем через визир-ориентатор. Идея контроля вертикали очень проста. С помощью восьми простых оптических систем прибора ВСК-3 на матовом экране создаются изображения восьми участков пространства (рис. 1.1). В случае наблюдения равномерного диска Земли, при осуществленном построении вертикали, участки земной поверхности создают картину с центральной симметрией. При любом отклонении от вертикали картина перестает быть симметричной, что легко обнаруживается экипажем. В районе терминатора, где лимб Земли имеет различную яркость, приходится контролировать или строить вертикаль по положению в поле зрения трех — четырех зон освещенных Солнцем участков Земли и атмосферы, что, конечно, труднее и вызывает ухудшение точности контроля в 1,5—2 раза.

На ночных участках траектории полета корабля яркость диска Земли, освещенного звездами или Луной, недостаточна для получения изображения с удовлетворительной яркостью на матовом экране, поэтому в этих случаях экипаж ведет контроль вертикали по хорошо наблюдаемому ночью эмиссионному све-

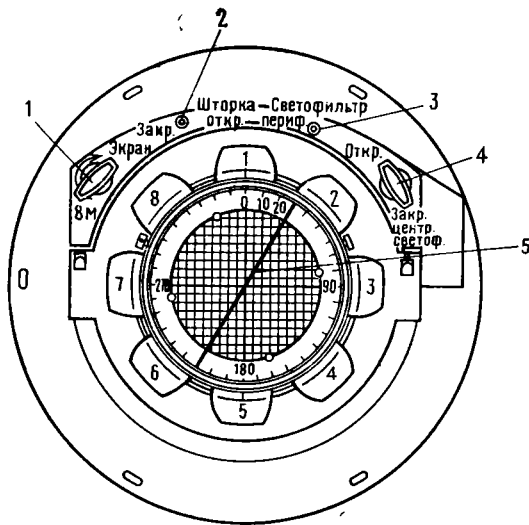


Рис. 1.2. Лицевая панель прибора ВСК-3:

1 — рукоятка фокусировки изображения; 2 — рукоятка шторки, полностью закрывающей канал вертикали; 3 — рукоятка светофильтра полей зрения, предназначенного для уменьшения яркости; 4 — рукоятка центрального светофильтра, служащая для уменьшения яркости; 5 — индикатор заданного курсового угла

чению атмосферы (на высоте около 100 км) с использованием специального линзового экрана, концентрирующего все излучение атмосферы, прошедшее через визир, на зрачок космонавта. Общий вид экрана показан на рис. 1.2.

Решение задач, поставленных перед «Орионом-2», требует построения трехосной орбитальной ориентации корабля, и для контроля за ее осуществлением используется центральный канал визира. Суть контроля в следующем: космонавт наблюдает на экране перемещение элементов подстилающей поверхности (облаков, контрастных образований на земной или водной поверхности, огней городов и т. д.) и сравнивает его с заданным направлением перемещения. Перемещение этих элементов на экране визира связано с поступательным движением корабля относительно Земли. Естественно, что угловая скорость перемещения зависит от высоты полета и достигает единиц градусов, т. е. примерно соответствует угловой скорости бега местных предметов, наблюдаемых в иллюминаторе реактивного пассажирского самолета при его полете на крейсерской высоте.

В случае контроля ориентации по звездам используются простые оптические приборы и вспомогательные устройства. Так, например, на борту имеется планшет со смещенными звездными картами, каждая из которых соответствует участку звезд-

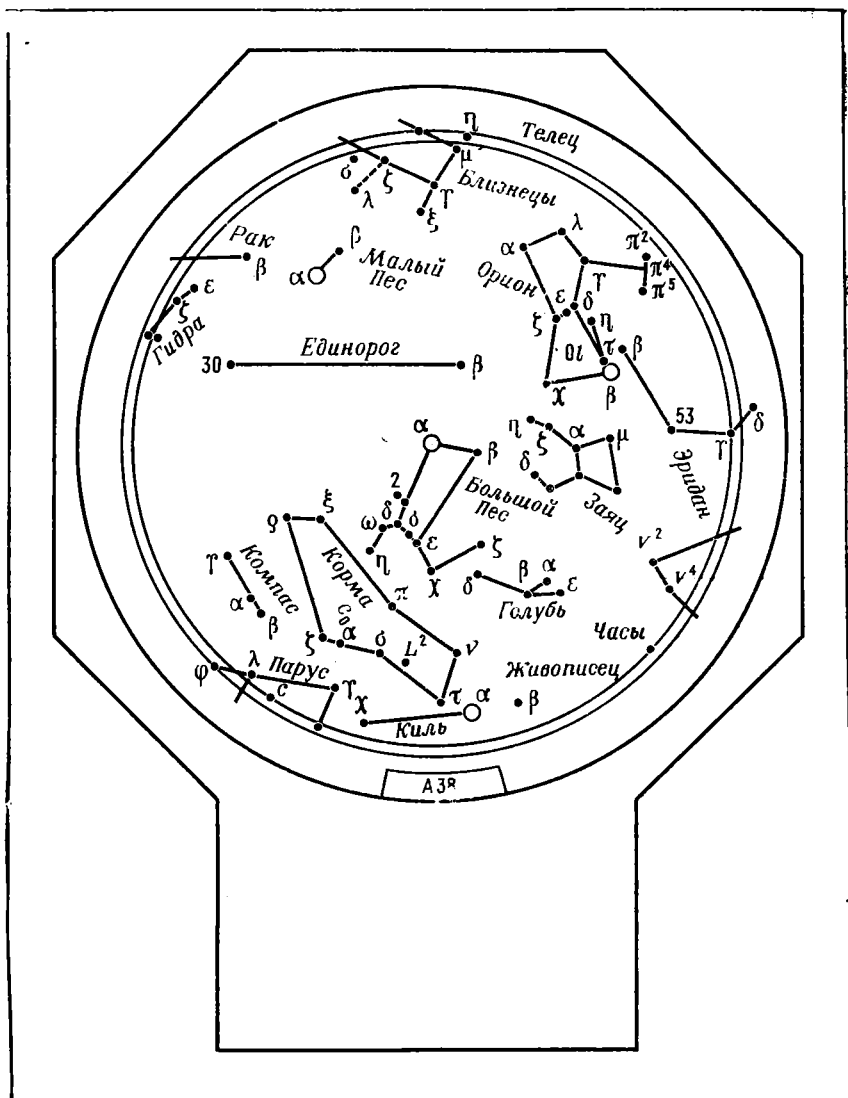


Рис. 1.3. Фрагмент изображения звездного неба, использовавшегося для контроля наведения телескопа «Ориона-2» на опорную звезду

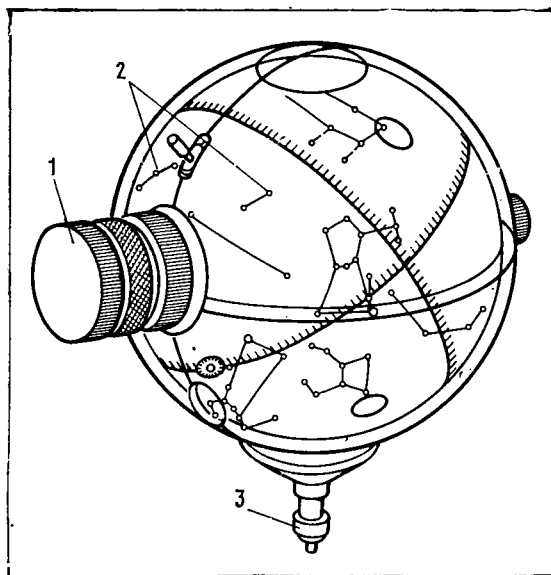


Рис. 1.4. Бортовой звездный глобус:

1 — рукоятка управления поворотами звездного глобуса; 2 — светопроводы, имитирующие звезды до +4-й звездной величины; 3 — штырь крепления глобуса на кронштейнах иллюминатора

ного неба, лежащему в полюсе орбиты (рис. 1.3). Аналогичные карты использовались при наведении корабля на конкретные астрономические объекты при работе с «Орионом-2».

Для оптимального выбора направления разворота корабля при переходе от одного объекта исследования к другому используется бортовой звездный глобус (рис. 1.4), на котором имитируются с помощью светопроводов звезды и созвездия по их блеску и нанесены эклиптическая и экваториальная системы координат. Подвеска глобуса позволяет имитировать на нем последовательность перемещения созвездий при осуществлении тех или иных разворотов космического корабля.

1.4. Купол обсерватории

При размещении на корабле «Союз-13» обсерватории «Орион-2» возникла необходимость в разработке нового отсека, который должен был обеспечить благоприятные условия для работы телескопа. Космическая обсерватория — это сложная, уникальная аппаратура, которую необходимо защищать от воздействия различных внешних факторов.

Как известно, на Земле телескопы защищены от воздействия атмосферных осадков, пыли, солнечного излучения специальны-

ми подвижными куполами. В космосе условия иные — там отсутствуют атмосфера, осадки и пыль, но зато сказывается воздействие космического излучения, теплового излучения от Земли, планет и Солнца. Кроме того, на вертикальном участке вывода космического корабля на орбиту, после сброса головного обтекателя ракеты, аэродинамическое воздействие со стороны набегающего воздушного потока на переднюю часть космического корабля, где размещена обсерватория «Орион-2», еще сохраняется в течение некоторого времени. Кроме того, в результате трения в атмосфере происходит разогрев внешней оболочки корабля до довольно высоких температур. Для защиты обсерватории «Орион-2» от этих воздействий был создан специальный отсек, имеющий внешние отводы в виде купола и поэтому получивший название «купол обсерватории».

Купол обсерватории на «Союзе-13» — это негерметичный отсек, устанавливаемый на шпангоут бытового отсека корабля. Он защищает обсерваторию от воздействия набегающего воздушного потока при выведении корабля на орбиту, обеспечивает тепловую защиту конструкции, а в дальнейшем, в период программной работы на орбите, обеспечивает необходимый температурный режим для обсерватории.

Конструктивно купол обсерватории состоит из следующих основных элементов: блистера, крышки бытового отсека и рамы внутри отсека, на которой крепится сама обсерватория (см. рис. 2.5).

Блистер — это сферическая оболочка, подкрепленная снаружи поперечным силовым набором, которая крепится к крышке бытового отсека опорным силовым шпангоутом. Купол обсерватории имеет люк с двумя створками, открывающимися и закрывающимися специальными электроприводами по команде космонавтов на борту. Положение створок контролируется специальными телеметрическими датчиками.

Были предусмотрены также дублирующие механические приводы: в случае отказа одного из электроприводов можно подать команды с пульта однократно открыть створки люка из любого начального положения и зафиксировать их раз и навсегда в открытом положении.

Крышка бытового отсека — это стенка между отсеком телескопа и бытовым отсеком. Состоит она из сферической оболочки, шпангоута и двух фланцев для шлюзов, предназначенных для транспортировки кассет с пленкой из негерметичного отсека телескопа в герметичный бытовой отсек.

Рама, на которую крепится обсерватория «Орион-2» — это

пространственная конструкция, состоящая из трубчатых стержней. С одной стороны рама имеет опорные кронштейны для ее установки на шпангоут крышки бытового отсека, а с другой стороны — специальные опоры для крепления обсерватории.

1.5. Шлюзы для транспортировки кассет

Для доставки фотопленок с результатами научных экспериментов в корабль на днище купола обсерватории «Орион-2» был размещен специальный шлюз, имеющий внешний герметичный контур, образованный корпусом и входящими в него элементами, а также внутренний герметичный контур, образуемый в процессе шлюзования.

Конструкция шлюза (рис. 1.5) разрабатывалась специально для корабля «Союз-13».

К шлюзу предъявлялся ряд требований. Прежде всего он должен был быть надежен и прост в эксплуатации, обеспечивать герметизацию во всех стыках, так как входил в герметичный контур корабля, кроме того, иметь минимальные массу и

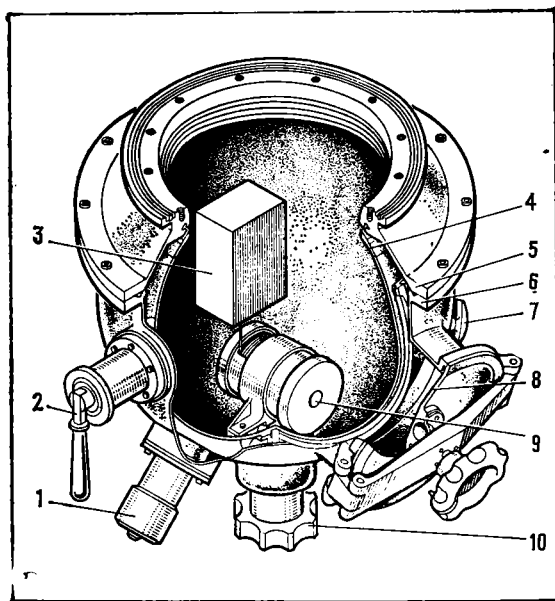
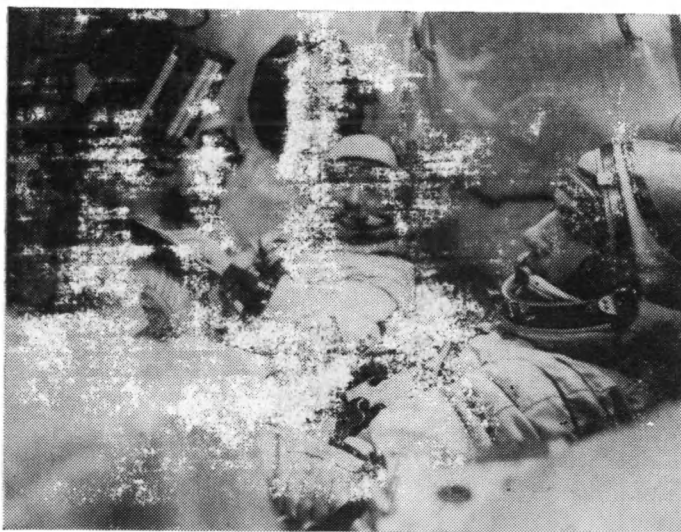


Рис. 1.5. Шлюз для транспортировки кассет



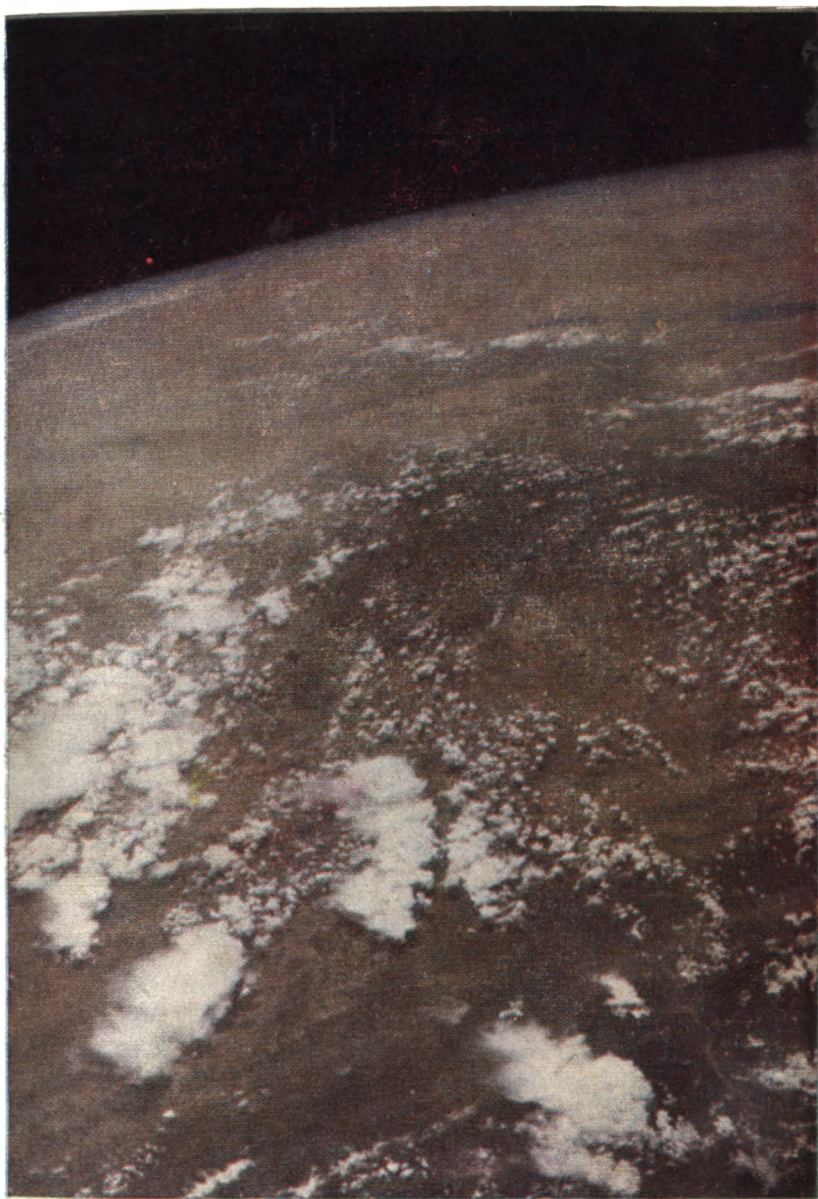
П. И. Климук и В. В. Лыбада в Центре подготовки космонавтов им. Ю. А. Гагарина готовятся к астрофизическим исследованиям



Экипаж «Союза-13» в Центре подготовки космонавтов им. Ю. А. Гагарина на предполетных тренировках



Руководитель подготовки В. А. Шаталов с экипажем «Союза-13»



Снимок Земли из космоса, сделанный экипажем «Союза-13»



И. Климук и В. В. Лебедев на борту космического корабля «Союз-13»





Академик В. А. Амбарцумян беседует с летчиком-космонавтом В. В. Лебедевым



Зодиакальный свет. Снимок сделан аппаратурой ПСН космонавтами В. В. Лебедевым и А. Н. Березовым с борта станции «Салют-7» во время проведения астрофизических экспериментов (1982 г.)

габариты. Было рассмотрено несколько вариантов, и в результате была выбрана конструкция, описанная ниже.

Конструктивно шлюз состоит из следующих элементов (см. рис. 1.5): корпуса 6, механизма поворота 2, люка с крышкой 8 для извлечения кассеты, клапана выравнивания давления объемов шлюза и корабля 7, сигнализатора давления 1 в шлюзе, механизма герметизации шлюза 10, переходного фланца 5, внутренней подвижной сферы 4 и лебедки 9.

Корпус состоит из сферической оболочки, переходящей в цилиндр, а также фланцев для установки органов управления и контроля процессом шлюзования.

Переходной фланец — коническая оболочка с двумя фланцами: одним — для крепления к корпусу шлюза, другим — для крепления к фланцу крышки бытового отсека.

Внутренняя сфера — это оболочка с двумя фланцами, отверстием большого диаметра, предназначенным для транспортировки кассеты в шлюзовую камеру и извлечения кассеты 3 из нее. Указанная сфера имеет два рабочих положения: для доставки в нее кассеты и для извлечения кассеты из нее.

Лебедка предназначена для доставки кассеты в шлюз. Она состоит из корпуса, барабана для троса и пружины.

Механизм поворота внутренней сферы обеспечивает закрепление ее в корпусе, поворот сферы относительно корпуса и перемещение вдоль продольной оси шлюза при его герметизации.

Механизм герметизации шлюза обеспечивает перемещение внутренней сферы вдоль продольной оси шлюза путем вращения рукоятки с винтом.

Люк шлюза предназначен для извлечения кассеты из шлюза, он состоит из крышки с силовой балкой и рукоятки управления.

В процессе изготовления шлюз в целом и отдельные его детали прошли большой цикл наземных испытаний, имитирующих реальные условия его работы (воздействия ударных и вибрационных нагрузок), проверки на герметичность, устойчивость к тепловым воздействиям и внешнему давлению, а также испытания на нагрузки, возникающие при транспортировке. А сам процесс шлюзования кассет отрабатывался на специальном стенде.

1.6. Операция шлюзования кассет

При подготовке к полету тросик лебедки был прикреплен к кассете на телескопе «Орион-2». В дальнейшем, во время полета, тросик оставался натянутым с помощью пружин, а внут-

рення сфера шлюза была повернута своим отверстием в сторону отверстия в корпусе орбитального отсека.

В конце полета, после выполнения программы астрономических наблюдений, космонавтам предстояло отделить кассету с пленкой от менискового телескопа «Орион-2» и транспортировать ее внутрь корабля. Эта операция состояла из следующих этапов:

отстрела кассеты и автоматической доставки ее в шлюзовую камеру;

разворота внутренней сферы;

герметизации шлюзовой камеры;

выравнивания давления;

открывания шлюзовой камеры и извлечения кассеты.

Перед отстрелом кассет телескопа космонавт дистанционно с пульта управления разворачивал телескоп в положение, при котором расстояние между кассетой и наружным отверстием шлюза оказывалось наименьшим. Затем с пульта давалась команда на срабатывание пирочки, фиксирующей кассету к корпусу телескопа. В результате срабатывания пирочки кассета освобождалась и под действием пружины лебедки транспортировалась во внутреннюю сферу шлюзовой камеры.

После того как кассета оказывалась в шлюзе, космонавт вручную с помощью механизма поворота разворачивал внутреннюю сферу в положение, при котором ее отверстие оказывалось обращенным внутрь шлюзовой камеры, а кольцевой герметизирующий буртик — в сторону наружного отверстия шлюзовой камеры.

Для герметизации шлюзовой камеры космонавт с помощью винтового механизма перемещал внутреннюю сферу вдоль продольной оси шлюза до плотного прижатия буртика внутренней сферы к буртику переходного фланца шлюзовой камеры. Герметичность обеспечивалась обжатием резинового уплотнения между двумя буртиками. В результате полость внутренней сферы и полость корпуса шлюзовой камеры оказывались отделенными от окружающего пространства.

Перед тем как открыть шлюз, космонавту необходимо было выравнивать давление внутри шлюза с давлением внутри корабля. Для этого служил специальный клапан, открывающийся вручную и сигнализирующий о равенстве давления в шлюзе и корабле. Для того чтобы убедиться в надежности герметизации шлюза, космонавт после выравнивания давлений перекрывал клапан и спустя несколько минут по тому же сигнализатору оценивал падение давления в шлюзе.

1.7. Комплексные наземные испытания

Основным содержанием наземной подготовки космического корабля на космодроме является проведение работ по окончательной сборке составных частей корабля в целом, проверка всех его систем на функционирование, проверка герметичности отсеков и пневмогидросистем, заправка компонентами топлива для работы двигательных установок, зарядка сжатыми газами, снаряжение другими расходуемыми материалами, в том числе пищей и водой, сборка головного блока и стыковка с ракетоносителем и, наконец, предстартовая подготовка и пуск.

Многообразны и сложны системы космического корабля. Каждая из этих систем нуждается в тщательной проверке перед стартом ракеты. От проверки зависит многое. Но как это сделать? Нужно создать специальное наземное испытательное оборудование, воздвигнуть специальные сооружения на космодроме, смонтировать экспериментальные установки для проверки параметров и характеристик, которые невозможно получить при наземной подготовке ракеты, космического корабля, космической обсерватории.

Приведем несколько примеров.

1. Система приземления. Испытания проводятся при сбросе с самолета специально изготовленного спускаемого аппарата. При проверках в составе корабля основное внимание уделяется контролю целостности цепей управления, проверке датчиков, концевых контактов, работе автоматики.

2. Двигательная установка для корректировки орбиты спуска. Особое внимание уделяется проверке работы пусковых клапанов, датчиков давления и пр. А вот как проверить работу автоматики контроля аварийных ситуаций в двигателе, если для этого нужно на комплексе датчиков и исполнительных органов смитировать сложнейшую логическую и временную зависимость? Пришлось разработать специальный имитатор, обеспечивший эту и другие проверки автоматики управления двигателем.

3. Система ориентации и управления движением. Как проверить работу гироскопов в составе системы в режимах стабилизации и программных разворотов? Можно вынести гироскоп на поворотное устройство и подключить его к системе на кабелях-удлинителях, однако для этого нужно предусмотреть специальный люк или установить их в доступном месте в спускаемом аппарате, что не всегда возможно, да и не решает задачу проверки после установки и штатного

подключения системы. Следует иметь в виду, что в системе предусмотрен контроль режима стабилизации, и если даже просто разарретировать (отключить) гироскоп, то через некоторое время, например вследствие вращения Земли, ось гироскопа отклонится на заданные пределы, система сформирует сигнал «Авария стабилизации» и проверка не получится. На кораблях «Союз» для обеспечения таких проверок принято кардинальное решение. Весь корабль устанавливается на поворотную установку, которая снабжена собственной системой управления приводами по всем трем пространственным осям, которая работает от сигналов исполнительных органов бортовой системы управления. Таким образом получается, что корабль «сам себя разворачивает», т. е. система управления движением работает абсолютно так же, как в космическом пространстве, а это обеспечивает наиболее полную проверку.

Такое решение с точки зрения качества проверок близко к идеальному, однако появляются новые трудности в технологии работ, связанные с монтажом космического корабля, с переборкой испытательной схемы, обеспечением обслуживания и т. д.

В целом космодром оснащен большим комплексом оборудования, позволяющим проверить все параметры и характеристики систем, назначенных к контролю при наземной предпусковой подготовке корабля. Тут и оборудование проверки систем радиосвязи, телеметрии, телевидения, командной радиолинии, системы электропитания, системы обеспечения газового состава и других систем.

Далеко не простая задача — выбор технологии подготовки корабля, удовлетворяющий всем многообразным и часто противоречивым задачам, которые нужно решить в отношении каждой системы. Испытатели кропотливо анализируют особенности каждой операции, увязывают их в единый сетевой график подготовки. Заранее определяются специалисты, которые будут выполнять каждую работу, предусматриваются необходимые условия для их проведения.

При отработке первых «Союзов» сетевые графики вывешивались для непосредственного обозрения и сведения участников подготовки и занимали все стены довольно просторного помещения оперативного руководства, где отмечался ход их выполнения. Утром, по традиции, руководитель подготовки полушутливо спрашивал, имея в виду длину графиков: «Ну, сколько метров прошли за сутки?», и затем уже серьезно выслушивал доклады ведущих испытателей и других специалистов.

Чем дальше «двигался» корабль по графику подготовки, тем

меньше невыполненных работ, тем в большей готовности к пуску он находился. Одновременно накладывалось больше ограничений на условия проведения дальнейших работ.

Так, например, после заправки корабля компонентами топлива и подключения цепей управления исполнительными пирозузлами нельзя включать те режимы системы, которые приводят к их срабатыванию. Проще говоря, не все уже можно проверить. Находиться же в заправленном состоянии корабль может ограниченное время, так как в составе топлива есть химически агрессивные вещества, которые постепенно разрушают элементы конструкции двигателей. Это пример критической или необратимой операции. После таких операций проводятся лишь заключительные проверки, т. е. такие, которые связаны с проверкой установки бортовых блоков питания, сборки головного блока и т. д.

К моменту, когда решено было использовать корабль типа «Союз» для экспериментов с космической обсерваторией «Орион-2» технология подготовки корабля была достаточно отработана.

В связи с изменением задач полета большое внимание уделялось при испытаниях проверке новых или доработанных систем и вновь вводимых режимов «старых» систем. В соответствии с приведенными выше принципами построения испытаний в программу были введены проверки с полной имитацией выполнения участков полета с функционированием системы «Орион-2». При этом не было сделано никаких принципиальных замечаний, т. е. полностью подтверждалась правильность заложенных в научную аппаратуру решений.

Много внимания потребовали испытания самой системы «Орион-2». Проверка электронных блоков не вызывала особых затруднений, хотя бы потому, что для проверки чувствительных звездных датчиков были предусмотрены специальные звездные имитаторы, вмонтированные в сами датчики.

Много вопросов возникает у испытателей при проверках механически перемещающихся устройств. Часто бывает, что механизмы, рассчитанные на работу в космосе, в невесомости, трудно проверить на Земле: не хватает мощности двигателей, привода, да еще если их надо двигать вместе с имитаторами, возникают перегрузки, а это недопустимо; мощный двигатель — опять плохо, теперь можно перегрузить саму конструкцию, если вовремя не сработает концевой выключатель или в зоне движения случайно не окажется какое-нибудь наземное проверочное устройство. Отсюда закон для испытателя: при таких про-

верках будь особенно внимателен, «гляди в оба» (хотя, конечно, проверок, при которых не надо «глядеть в оба» вообще не бывает). Общими усилиями испытателей и разработчиков все эти вопросы удалось решить и избежать неприятностей при проверках хрупких механизмов оптической системы.

Много пришлось поломать голову над проверкой такой системы, как обогрев купола «Орион-2», предохраняющего тонкую оптико-механическую систему от чрезмерного охлаждения и других нежелательных воздействий.

По идее система «проста»: на куполе стоят датчики температуры, соединенные с электронным блоком, обеспечивающим по заданной программе включение электродвигателей. Разумеется, электронный блок был тщательно проверен с помощью соответствующего имитатора, специальным прибором проверены датчики. Конечно, существовали способы проверить целиком весь тракт датчик — электронный блок — нагреватель. Все эти вопросы были продуманы заранее с таким расчетом, чтобы купол был установлен сразу после проверки «Ориона-2». Однако уже в ходе подготовки корабля на космодроме было принято решение провести еще одну операцию контроля наружной оптической части «Ориона-2» перед «надеванием» головного обтекателя. Возник вопрос, как проверить качество стыковки электро-разъемов купол — корабль? Дело в том, что в этот момент корабль уже заправлен компонентами топлива, заряжен газами под высоким давлением и по условиям техники безопасности подходить к кораблю со всякими устройствами нагрева, охлаждения и просто с приборами, включенными в сеть 220 В нельзя. Общими усилиями и этот вопрос был решен. Помогло знание особенностей работы системы обогрева и системы телеизмерений.

Наконец приступили к сборке головного блока. Обсерватория «Орион-2» скрылась от взглядов, теперь только в космосе оживут ее приборы. Сработай как надо, не подведи! А у испытателей очередные хлопоты: проверки, стыковка с ракето-носителем, вывоз на старт и опять проверки, проверки...

Затем много раз описанное, не однажды пережитое, но всегда волнующее, с холодком в груди: «...Главная! ...Подъем!»

КОСМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ «ОРИОН-2»

2.1. Принцип создания обсерватории «Орион-2»

При выборе принципа работы, структурной схемы космической обсерватории «Орион-2» и разработке ее конструкции были учтены специальные требования и особые условия эксплуатации этой обсерватории в составе корабля «Союз-13».

Прежде всего в связи с тем, что не были выдвинуты чрезмерно жесткие ограничения по допустимым массам и габаритным размерам аппаратуры главный упор был сделан на обеспечение высокой надежности самой аппаратуры, сокращение сроков ее разработки, изготовления и наземной отработки.

Поскольку рабочее поле зрения ее менискового телескопа очень большое — 5° в диаметре, то ясно, что в момент фотографирования отдельных участков звездного неба телескоп должен быть стабилизирован по всем трем осям. Иначе говоря, в этом случае нужно иметь пространственную, т. е. трехосную стабилизацию. Это было первым, наиболее существенным и вместе с тем наиболее трудным в отношении реализации требованием.

Второе требование связано с рабочей продолжительностью экспозиции фотографирования менисковым телескопом — она может быть до 20—30 мин, т. е. соизмерима с продолжительностью нахождения корабля в теневой части орбиты. Стало быть, неизменную и нерасстроенную стабилизацию надо иметь в течение не менее 30 мин.

Третье требование относится к точности стабилизации; она должна быть порядка нескольких секунд дуги по всем трем осям стабилизации.

Конечно, удержать многотонный корабль в стабилизированном состоянии с точностью нескольких секунд дуги по всем осям невозможно, тем более, когда внутри живут космонавты. Поэтому пришлось прибегнуть к так называемому «принципу ступенчатой, или последовательной стабилизации». Впервые этот принцип был реализован в 1971 г. на другой космической обсерватории — «Орион-1», которая была установлена и эксплуатировалась на орбитальной станции «Салют-1». Однако в отличие от «Ориона-1» речь идет о необходимости создания системы с трехосной стабилизацией на «Орионе-2».

Смысл принципа ступенчатой стабилизации заключается в следующем. Корабль «Союз-13» осуществляет наведение глав-

ной оси обсерватории в заданную точку небесной сферы с точностью $\pm 3^\circ$, при этом корабль переводится в режим инерциальной ориентации и обеспечивает поддержание этого положения неизменным в течение всего периода эксперимента, т. е. периода экспонирования телескопом заданного участка звездного неба. Для удержания корабля в состоянии пространственной стабилизации с точностью нескольких градусов в качестве датчиков ориентации использовались гироскопы.

Но для работы обсерватории необходимо иметь, как было отмечено выше, стабилизацию с гораздо большей точностью — порядка нескольких секунд дуги. Поэтому была создана специальная платформа — астроплатформа, на которой крепится менисковый телескоп и которая отрабатывает совершенно автономным образом и с применением астронавигационных средств ориентации окончательную стабилизацию с требуемой точностью. При этом соответствующие изменения положения главных осей платформы осуществляются с помощью электроприводов, т. е. фактически «отталкиваясь» от корпуса корабля. Очевидно, применение такого принципа стабилизации возможно только в том случае, когда отношение момента инерции массы корабля к моменту инерции массы обсерватории, вернее, подвижной части обсерватории очень велико — порядка нескольких десятков и сотен. Это условие в случае системы «Орион-2» — «Союз-13» выполняется даже с достаточным запасом. Что касается датчиков ориентации для второй ступени отработки стабилизации, то в случае «Ориона-2» были использованы звездные фотогиды. Гироскопов на астроплатформе «Ориона-2» не имелось.

Следующая проблема связана с наводкой главной оси обсерватории (телескопа) в сторону нужной звезды на небе. Имея в виду, что обсерватория находится вне корабля, а космонавты — внутри, ясно, что эту операцию нужно осуществить путем дистанционного управления движением астроплатформы. Это делается с помощью специальной визирной системы, установленной напротив одного из иллюминаторов корабля, вернее, бытового отсека, и введением первичной следящей системы грубой наводки между этой визирной системой и монтировкой астроплатформы. При этом в качестве датчиков положения (или угла) используются потенциометры, установленные по одной паре на осях монтировки астроплатформы и на осях визирной системы. Разумеется, оптические оси визирной системы и телескопа заранее устанавливаются строго параллельно друг другу.

Принцип работы всех этих систем совместно взятых, включая и самого космонавта — оператора «Ориона-2», следующая. Космонавт нацеливает визирную систему на заданную звезду А. После «захвата» этой звезды на нее направляется один из звездных датчиков, поле зрения которого равно 3° . Как только звезда окажется в поле зрения звездного фотогида, автоматически подключается следящая система тонкой наводки — астронавигации, которая, работая уже независимо от первичной следящей системы, доводит эту звезду до оптической оси звездного фотогида и осуществляет автоматическое слежение за ней с данной точностью астростабилизации.

Так астроплатформа переводится в режим стабилизации по двум плоскостям, т. е. по двум осям. Удержание той же платформы по третьей оси осуществляется с помощью второй звезды В, на которую направляется уже другой — одноосный звездный датчик. Процедура захвата звезды В иная, и она будет изложена в последующих разделах.

Именно на основе описанного принципа была создана космическая обсерватория «Орион-2». В последующих разделах настоящей главы будут даны краткие описания оптики, конструкции, кинематической, электронной, электрической и прочих систем «Ориона-2», более подробно эти вопросы описаны в статье, опубликованной в журнале *Astrophysics and Space Science* 40, 393—446, 1976 (G. A. Gurzadyan, A. L. Jarakyan, M. N. Krmoyan, A. L. Kashin, G. M. Loretyan, J. B. Ohanesyan).

2.2. Приборный состав обсерватории «Орион-2»

Обсерватория «Орион-2» состоит из следующих четырех блоков: блока телескопа; блока питания и управления; визира; пульта управления.

Блок телескопа предназначен для выполнения основной научной задачи. Он представляет собой трехосную монтировку, в которой установлены телескоп и служебные приборы системы прецизионной стабилизации. В состав блока телескопа входят (рис. 2.1): телескоп, блок спектрографов, солнечная рентгеновская камера, основной и резервный звездные двухкоординатные датчики, основной и резервный звездные однокоординатные датчики, солнечный датчик.

Несущей конструкцией, в которой закреплен телескоп, является титановый стакан, на котором параллельно оптической оси телескопа закреплены двухкоординатные звездные датчики,

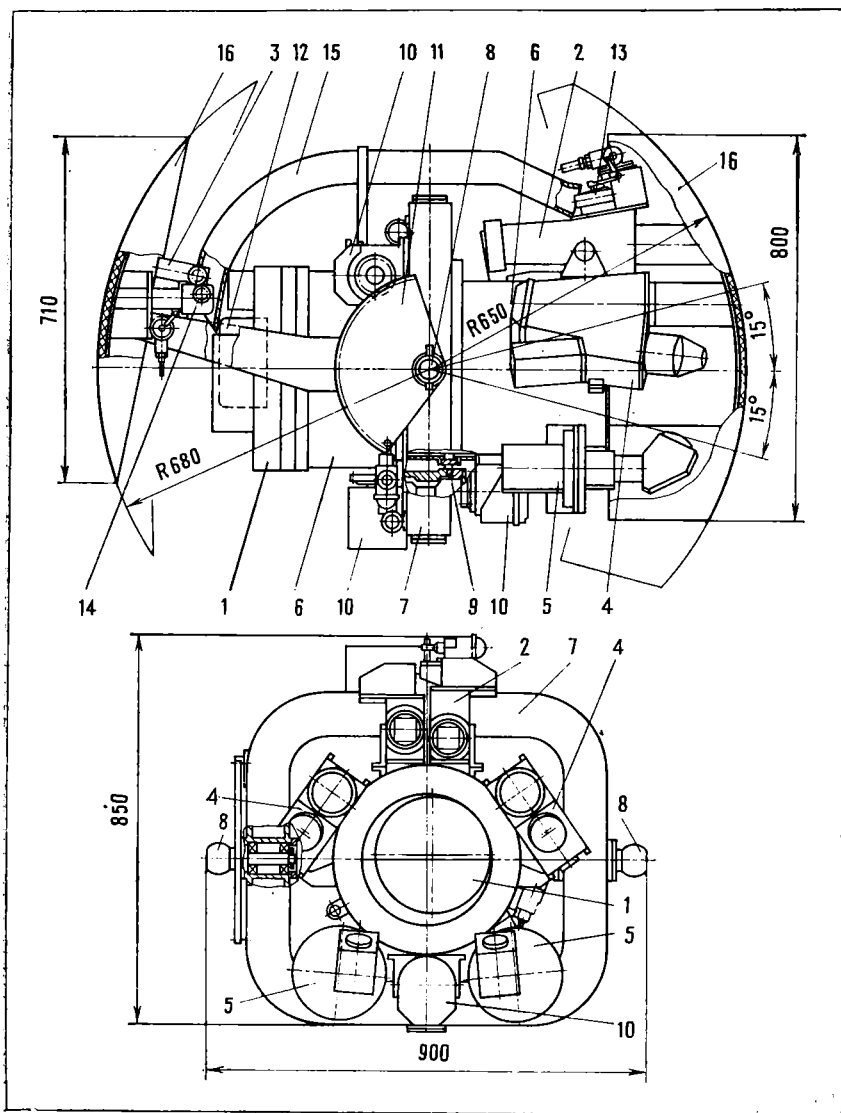


Рис. 2.1. Блок телескопа:

1 — телескоп; 2 — блок спектрографов; 3 — солнечная камера; 4 — двухкоординатный звездный датчик; 5 — однокоординатный звездный датчик; 6 — несущий стакан; 7 — рама монтировки; 8 — установочные опоры; 9 — подшипник; 10 — привод слежения; 11 — секторы приводов монтировки; 12 — кассета телескопа; 13 — кассета блока спектрографов; 14 — кассета солнечной камеры; 15 — кассетопровод; 16 — тепловой экран

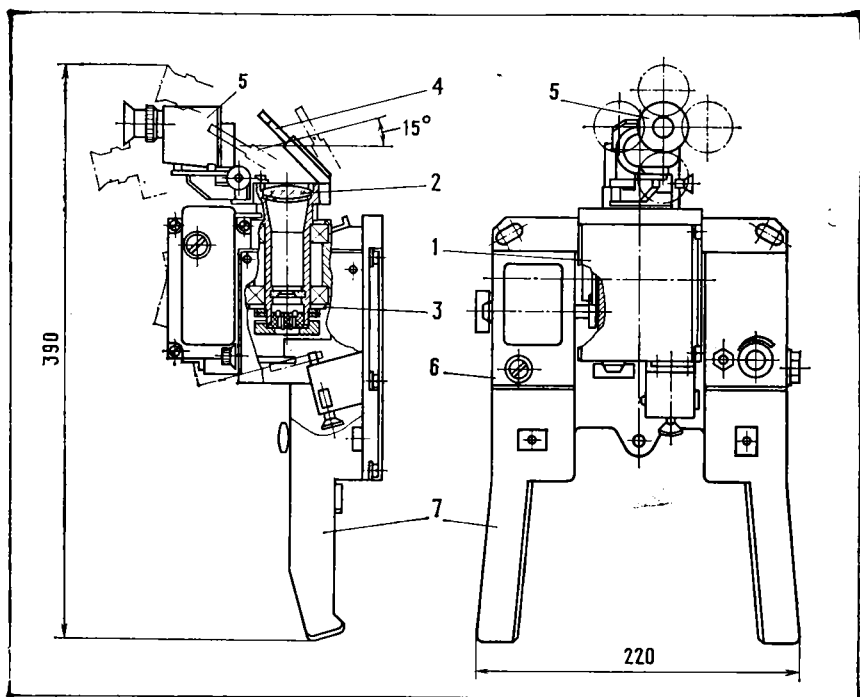


Рис. 2.2. Визир системы наводки:

1 — корпус; 2 — объектив коллиматора; 3 — пластинка с перекрестием; 4 — плоско-параллельная пластина; 5 — откидная монокулярная трубка; 6 — монтировка визира; 7 — ручка управления

обеспечивающие стабилизацию телескопа по двум осям. На стекле установлены также однокоординатные звездные датчики. Оптические оси этих датчиков находятся под углом 65° относительно оси телескопа, что позволяет получить сигнал расогласования для стабилизации телескопа по третьей оси. Стекло установлено в подшипнике, который с рамой, волновыми приводами, секторами образует трехосную монтировку, позволяющую развернуть ось телескопа по каждой из трех осей на $\pm 15^\circ$. На выходные шестерни приводов и сектора нанесено специальное антифрикционное покрытие, обеспечивающее работоспособность открытых зубчатых зацеплений в условиях вакуума.

Со стороны кассетной части телескопа на станке закреплены приборы солнечной площадки. На солнечной площадке и входе

телескопа установлены теплоизолирующие экраны. Для предохранения приводов слежения от воздействия перегрузок на основном участке полета ракеты монтировка по каждой оси разворотов снабжена арретирами на базе пирочек.

Монтировка закреплена на объекте через сферические шарнирные опоры, позволяющие избежать температурных деформаций монтировки из-за разных коэффициентов линейного расширения материалов рамы телескопа и космического корабля.

Блок питания и управления предназначен для управления работой обсерватории и включает в себя следующие субблоки: блок питания, усилители астродатчиков, блоки системы слежения, блок автоматики управления.

Визир (рис. 2.2) служит для предварительного наведения телескопа на опорную звезду А. Оптическая схема визира приведена на рис. 2.7. За основу принят обычный коллиматорный прицел с перекрестием в поле зрения для прицеливания на опорную звезду. Коллиматорная схема прицела состоит из объектива и пластинки с крестом прицеливания, установленной в фокальной плоскости объектива и подсвечиваемой лампой. В глаз наблюдателя попадает не только изображение звезды, но и с помощью плоскопараллельной пластины — изображение проектируемого в бесконечность креста прицела.

Конструктивно визир представляет собой двухосную монтировку, позволяющую с помощью двух электроприводов разворачивать коллиматорный прицел по двум осям. Предварительное наведение производится со скоростью около 1 градус/с, точное прицеливание возможно на скорости 0,3 градус/с. Для удобства космонавта визир снабжен откидной монокулярной трубкой, позволяющей производить более точное наведение. В приводе визира встроены прецизионные потенциометрические датчики, имеющие выход в систему наведений телескопа.

При наземной взаимной юстировке на корабле блока телескопов и визира после выставки в параллель их от оптических осей была предусмотрена возможность согласования показаний прецизионных потенциометров телескопа и визира, для чего в визире были сделаны специальные съемные крышки, через которые имелся доступ к прецизионным потенциометрам.

Визир имеет арретирующее устройство, позволяющее предохранить приводы визира от повреждения из-за воздействия перегрузок на участке выведения.

Пульт управления предназначен для ручного управления и визуального контроля за работой обсерватории. Пульт

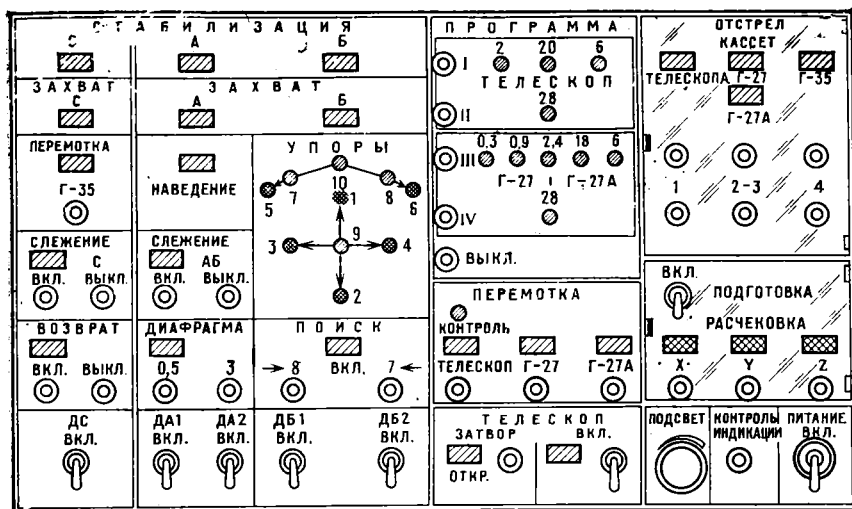


Рис. 2.3. Лицевая панель пульта управления. Пульт имеет подсветку, что позволяет работать с органами управления обсерватории в затемненном отсеке. Кнопки управления арретиром и пирочками фиксации кассет установлены под предохранительными прозрачными крышками

включает в себя: программное устройство, блоки логики управления, панель управления.

На лицевую панель пульта (рис. 2.3) выведены индикаторы контрольных датчиков обсерватории и органы управления работой обсерватории. С пульта управления можно выдать следующие команды: включения обсерватории, контроля индикации, разарретирования монтажки, выбора астродатчиков, управления диафрагмой датчика А, включения режимов слежения, включения режима поиска звезды Б, управления затвором телескопа, перемотки фотопленок, включения и отключения программ экспонирования, приведения обсерватории в исходное положение, отстрела фотокассет.

2.3. Компоновка обсерватории «Орион-2» на корабле «Союз-13»

Общий вид корабля «Союз-13» с установленной на нем обсерваторией «Орион-2» представлен на рис. 2.4.

Блок телескопов был установлен над бытовым отсеком корабля «Союз-13» (рис. 2.5) вместо стыковочного узла. С целью

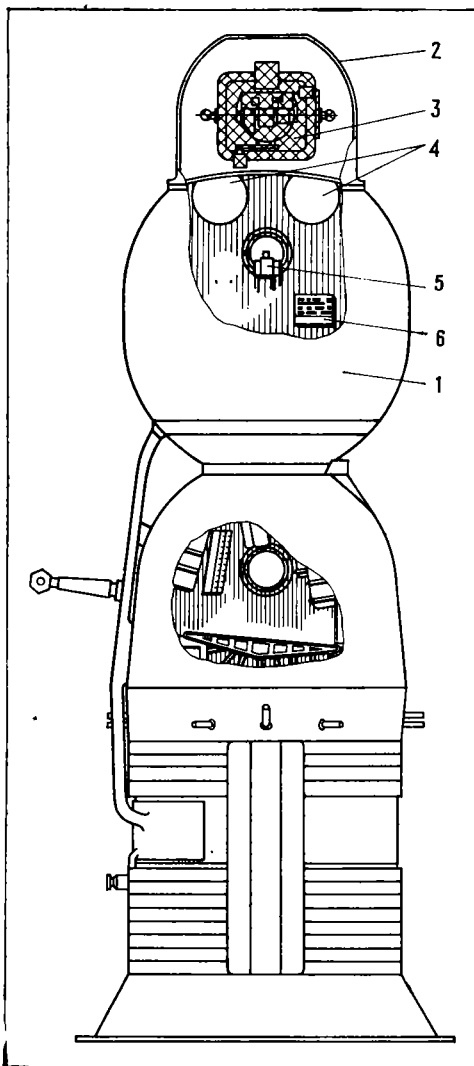


Рис. 2.4. Орбитальная обсерватория «Орион-2» на космическом корабле «Союз-13»:

1 — орбитальный отсек корабля; 2 — купол обсерватории; 3 — обсерватория «Орион-2»; 4 — шлюзовые камеры для транспортировки фотокассет; 5 — визирная система; 6 — пульт дистанционного управления работой обсерватории

обеспечения теплового режима он находился под специальным астрономическим куполом, имеющим открывающиеся створки. Для переноса во внутрь корабля кассет с экспонированными фотопленками на орбитальном отсеке были установлены шлюзовые камеры.

Внутри бытового отсека на одном из иллюминаторов был установлен визир обсерватории, а рядом находился пульт управления обсерватории. Эти приборы были размещены таким образом, чтобы один космонавт мог одновременно работать и на пульте, и на визире.

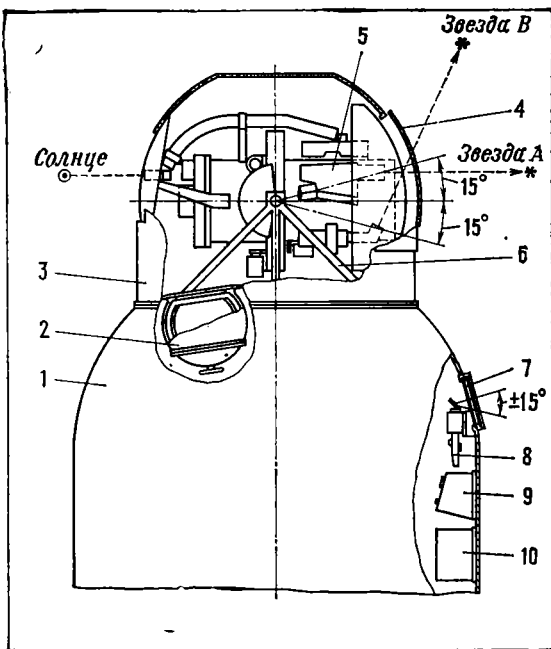
Совмещение оптических осей визира и телескопа было проведено еще при наземной отработке во время юстировки обсерватории относительно осей корабля.

Блок питания и управления обсерватории также находился внутри гермообъема орбитального отсека. Электрическая связь между блоками обсерватории осуществлялась с помощью бортовой кабельной сети.

Таким образом, эксплуатационные условия работы трех блоков обсерватории были достаточно хорошими, так как

Рис. 2.5. Компоновка обсерватории «Орион-2» на бытовом отсеке корабля «Союз-13»:

1 — орбитальный отсек; 2 — шлюзовая камера; 3 — купол; 4 — створка купола; 5 — блок телескопа; 6 — опора блока телескопов; 7 — иллюминатор; 8 — визир; 9 — пульт управления; 10 — блок питания и управления



обуславливались параметрами микроклимата отсека корабля.

Условия же эксплуатации блока телескопа были значительно хуже не только из-за того, что он находился в открытом космосе, но еще и из-за того, что, имея значительную массу (порядка 200 кг) и будучи установлен на самой высокой точке корабля, он подвергался значительным перегрузкам на участке выведения корабля на орбиту.

2.4. Оптическая система широкопольного телескопа «Ориона-2»

Выбор оптической системы телескопа-спектрографа «Ориона-2» определялся его назначением: получение бесщелевых спектральных снимков одновременно для большого количества звезд на различных участках звездного неба в диапазоне длин волн 2000—4000 Å. Этим требованиям удовлетворяют широкоугольные системы (Шмидта, Максутова), работающие в комбинации с объективной призмой.

При выборе основных параметров оптической системы и объективной призмы была принята во внимание возможность работы телескопа в теневой части орбиты с экспозицией до 20—25 мин и необходимость получения за это время спектральных снимков горячих звезд по крайней мере до десятой величины. Ставились также ограничения в отношении габаритных размеров телескопа, в особенности, его длины.

Исходя из этих требований, а также принимая во внимание конструкторско-технологические соображения, была выбрана в качестве оптической схемы менисковая зеркально-линзовая система Максутава — Кассегрена. Эта система даже при значительном фокусном расстоянии обеспечивает большое поле зрения и малую длину телескопа. Кроме того, в этом случае все рабочие поверхности оптических элементов имеют сферическую форму, облегчающую их изготовление.

Оптическая схема менискового телескопа представлена на рис. 2.6. Отрицательный мениск диаметром в 250 мм совместно с вогнутым главным зеркалом диаметром 305 мм образует недоисправленную систему с фокусом перед зеркалом. Вторичное сферическое зеркало диаметром 135 мм переносит изображение на главное зеркало и в то же время исправляет аберрацию всей системы. Для устранения остаточной кривизны поля применяется полеисправляющая линза Пиацци — Смита (диаметром 90 мм), задняя плоская поверхность которой совмещена с фокальной плоскостью системы.

В качестве диспергирующего элемента телескопа-спектрографа была выбрана объективная призма с преломляющим углом 4° .

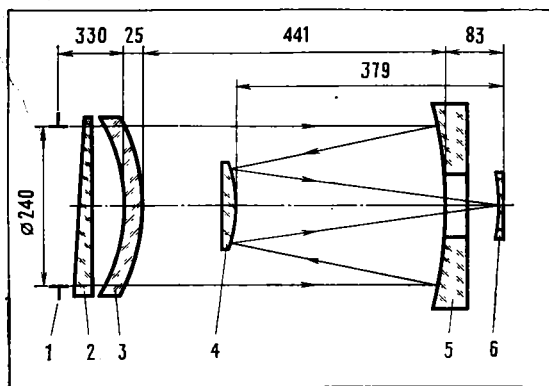
Все оптические детали телескопа, работающие на пропускание — мениск, объективная призма и линза поля — выполнены из плавленного кварца марки КУ; в этом случае может быть обеспечена работа телескопа в ближнем ультрафиолете — до 2000 Å. Вместе с тем исходя из соображений обеспечения благоприятных температурных условий для всего телескопа было принято решение изготовить из плавленного кварца также оба зеркала — главное и вторичное.

Отражающие поверхности обоих зеркал покрыты слоем алюминия.

При нахождении оптимального варианта оптических параметров менискового телескопа с объективной призмой нужно было выполнить противоречащие друг другу требования — обеспечить высокую спектральную дисперсию с хорошим пропусканием и возможно высоким качеством изображения. Так,

Рис. 2.6. Оптическая система менискового телескопа «Орион-2» с объективной призмой (Максутов — Кассегрен):

1 — входная диафрагма;
2 — объективная призма;
3 — мениск; 4 — вторичное зеркало; 5 — главное зеркало; 6 — линза Пиацци — Смита



например, во избежание наложения спектров близлежащих звезд, вообще говоря, необходимо иметь большое фокусное расстояние, что приводит к ухудшению изображения и к резкому увеличению рабочего диаметра поля зрения. Требование же большой дисперсии связано с большим преломляющим углом призмы, что в свою очередь не сочетается с требованием малого поглощения, в особенности в далеком ультрафиолете.

Аберрационные и светоптические расчеты позволили выбрать наиболее оптимальный вариант оптических параметров телескопа. Окончательно эти параметры оказались следующими:

Диаметр входного зрачка, мм	240
Эквивалентное фокусное расстояние, мм	1010
Геометрическое относительное отверстие	1:4,2
Эффективное относительное отверстие (с учетом экранирования)	1:5,4
Угловое поле зрения, градус	5,1
Линейное поле зрения, мм	90
Преломляющий угол объективной призмы, градус	4

Оптическая система была исправлена для длин волн $2500 \text{ \AA}$ и охроматизирована для длин волн 2000 и $5525 \text{ \AA}$. Остаточные светохроматические аберрации были частично устранены ретушью поверхности мениска. Остаточные полевые аберрации несколько ухудшили разрешающую способность оптической системы на краю поля зрения.

По рассчитанным оптическим параметрам и оптико-физическим данным материалов для преломляющей и отражающей оп-

тики были определены все необходимые спектральные характеристики телескопа-спектрографа: светопропускание, дисперсия, разрешающая способность и пр. Значения этих характеристик на некоторых длинах волн оказались следующими:

Длина волны, Å	2000	2500	3000	4000
Светопропускание, %	20	38	48	55
Линейная дисперсия, Å/мм	170	280	550	1380
Спектральное разрешение, Å	8	14	28	69

2.5. Оптические системы вспомогательной аппаратуры «Ориона-2»

«Орион-2» был снабжен также вспомогательными оптическими приборами. Наиболее важными из них являлись визир, двух-осевой и одноосевой звездные датчики.

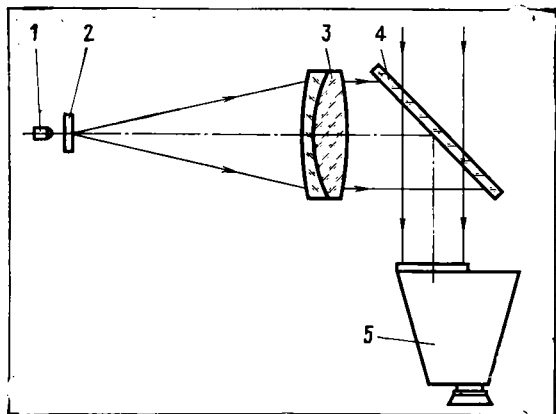
Визир представляет собой коллиматорный прицел с перекрестием в поле зрения для прицеливания; его оптическая схема показана на рис. 2.7. Коллиматор системы состоит из источника света для подсветки перекрестия на стеклянной пластинке, установленной в фокусе двухлинзового объектива. Пучок лучей из коллиматора, отражаясь от наклонной плоскопараллельной пластины, формируется с помощью откидной монокулярной трубки на сетчатке глаза наблюдателя. Одновременно космонавт видит сквозь пластинку небо со звездой А, на которую надлежит нацеливать подсвеченный крестик. Оптическая ось визира устанавливается строго параллельно главной оси телескопа.

Ниже приводятся основные оптические характеристики визира.

Диаметр входного зрачка, мм:	
коллиматора	32
монокуляра	25
Фокусное расстояние, мм:	
коллиматора	73
монокуляра	100
Относительное отверстие:	
коллиматора	1:2,3
монокуляра	1:4
Поле зрения, градус:	
коллиматора	2,5
монокуляра	10

Рис. 2.7. Оптическая схема визира:

1 — лампа подсветки; 2 —
пластинка подсветки; 3 —
объектив; 4 — плоскопа-
раллельная пластина; 5 —
монокулярь



Двухкоординатный звездный датчик (ДЗД) предназначен для точного наведения телескопа-спектрографа на первую опорную звезду А по двум плоскостям (осям) — его оптическая схема представлена на рис. 2.8. Двухлинзовый наклеенный объектив 1 строит изображение гидируемой звезды — после отражения от плоского зеркала 2 — на вращающийся зеркальный полудисковый модулятор 4, расположенный в фокусе объектива. Зеркало 2 введено для придания оптической схеме необходимой конструктивной компактности. Вращающийся полудиск одновременно выполняет роль оптического анализатора изображения, ведя первичную обработку информации о местонахождении изображения звезды. Поле зрения датчика (3°) определяется световым диаметром ($\varnothing 27$ мм) вращающегося полудиска. Для стабильной работы датчика перед модулятором вводится в процессе слежения диафрагма 3, ограничивающая поле зрения до $0,5^\circ$ и тем самым существенно устраняющая фоновые помехи.

Отраженные от зеркального полудиска лучи собираются двухлинзовым конденсатором 5 ($\varnothing 32$ мм) на плоскость светоприемника совмещенным с выходным зрачком системы.

Оптические параметры датчика выбраны таким образом, чтобы обеспечивалась точность слежения не ниже $3''$ гидируемой звезды спектрального класса А0 с блеском не ниже $3^m 5$. При этом учитывалась и спектральная чувствительность светоприемника.

Основные оптические параметры звездного двухкоординатного датчика ДЗД следующие:

Диаметр входного зрачка, мм	80
Фокусное расстояние, мм	500
Относительное отверстие	1:6,2
Угловое поле зрения, градус	3
Линейное поле зрения, мм	27,2
Угловое поле зрения с подвижной диафрагмой, градус	0,5
Рабочий диапазон длин волн, Å	3500—6000
Спектральное светопропускание на 5000 Å, %	62
Предельная звездная величина гидрируемой звезды	3 ^m 5

Однокоординатный звездный датчик (ОЗД) предназначен для захвата и слежения за второй опорной звездой В по одной плоскости (оси) — его оптическая схема показана на рис. 2.9. Световой пучок от звезды В принимается двухлинзовым объективом 1 и после отражения от плоского зеркала 2 и прохождения через стеклянную пластинку 3 направляется в плоскость ребра призмы 4. Эта призма с внешним отражением служит в качестве оптического анализатора; отраженный на поверхности призмы световой пучок делится на две части. Далее, после отражения от плоских зеркал 5 и прохождения через двухлинзовый конденсатор 6 и вращающийся обтюратор-модулятор 7, поочередно пропускающий разделенный световой поток, эти лучи собираются наконец на фотоприемнике, совмещенном с выходным зрачком 8 системы.

Выбранная оптическая схема позволяет этому датчику работать при прямоугольном поле зрения с угловыми размерами $8^\circ \times 1^\circ$. Ребро призмы было изготовлено шириной 10 мкм.

Оптических элементов в датчике ОЗД больше, чем в ДЗД, поэтому светопропускание оказалось на 20 % меньше. Важным

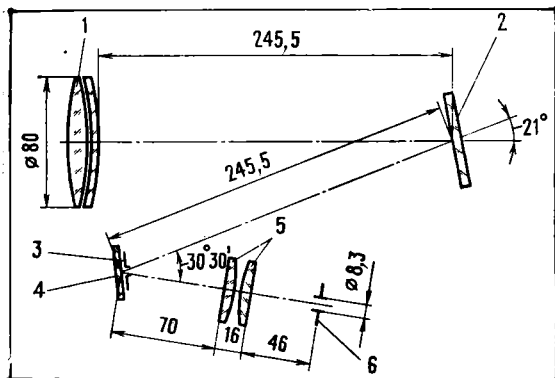
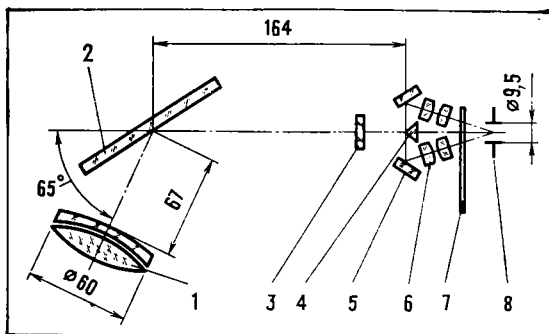


Рис. 2.8. Оптическая схема двухкоординатного датчика (ДЗД):

1 — объектив; 2 — плоское зеркало; 3 — диафрагма; 4 — вращающийся модулятор; 5 — конденсатор; 6 — выходная диафрагма

Рис. 2.9. Оптическая схема однокоординатного датчика (ОЗД):

1 — объектив; 2 — плоское зеркало; 3 — плоскопараллельная стеклянная пластинка; 4 — призма; 5 — плоские зеркала; 6 — конденсатор; 7 — обтюратор; 8 — выходная диафрагма



преимуществом ОЗД является наличие в нем статичного — не-вращающегося — модулятора (призмы).

Основные оптические параметры однокоординатного звездного датчика следующие:

Диаметр входного зрачка, мм	60
Фокусное расстояние, мм	240
Относительное отверстие, с	1,4
Угловое поле зрения, градус	1×8
Линейное поле зрения, мм	4,2×34
Рабочий диапазон длин волн, Å	3500—6000
Предельная величина гидрируемой звезды	3

На рис. 2.10 представлено аксонометрическое изображение всех оптических систем «Ориона-2» — менискового телескопа и двух типов звездных датчиков А и В.

2.6. Конструкция менискового телескопа

При проектировании телескопа основная задача заключалась в выборе конструкции, обеспечивающей большую стабильность взаимного расположения элементов оптической схемы при заданных тепловых воздействиях и механических перегрузках. Так как для оптики телескопа был выбран плавленый кварц, то и для корпуса телескопа было признано целесообразным применение инвара, также имеющего низкий коэффициент линейного расширения. Те или иные детали, которые не влияли на разъюстировку и расфокусировку телескопа при изменении температуры, были выполнены в основном из титановых и алюминевых сплавов.

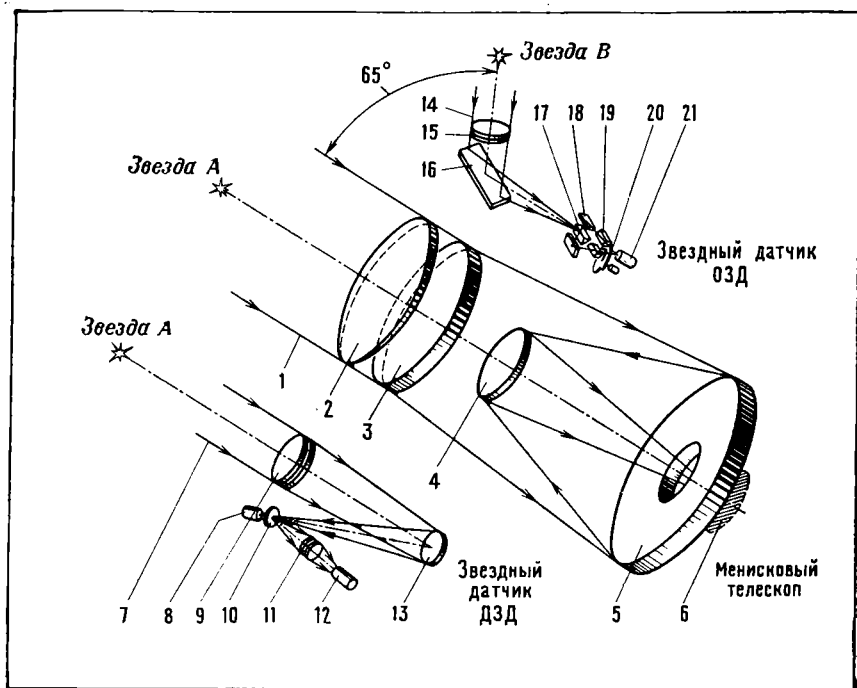


Рис. 2.10. Аксонометрическое изображение всех оптических систем «Ориона-2»:

Менисковый телескоп: 1 — входная диафрагма (бленда); 2 — объективная призма; 3 — мениск; 4 — вторичное зеркало; 5 — главное зеркало; 6 — фокальная плоскость. Звездный датчик ДЗД: 7 — входная диафрагма; 8 — электропривод; 9 — объектив; 10 — модулятор (анализатор); 11 — конденсатор; 12 — тахогенератор; 13 — плоское зеркало. Звездный датчик ОЗД: 14 — входная диафрагма; 15 — объектив; 16 — плоское зеркало; 17 — призма (анализатор); 18 — плоское зеркало; 19 — конденсатор; 20 — обтюратор; 21 — электропривод

Конструктивно телескоп (рис. 2.11) можно разделить на две основные части: объектив и кассетную часть. В объективе закреплены мениск, объективная призма, главное и вторичное зеркала. При этом близкие коэффициенты линейного расширения материалов оптических деталей и их оправ позволили избежать трудностей в выборе способов радиальной фиксации оптики, так как зазор между оправой и оптикой находился в пределах 0,01 мм. Фиксация в осевом направлении была выбрана беззазорной и осуществлялась подгонкой лапок крепления оптики.

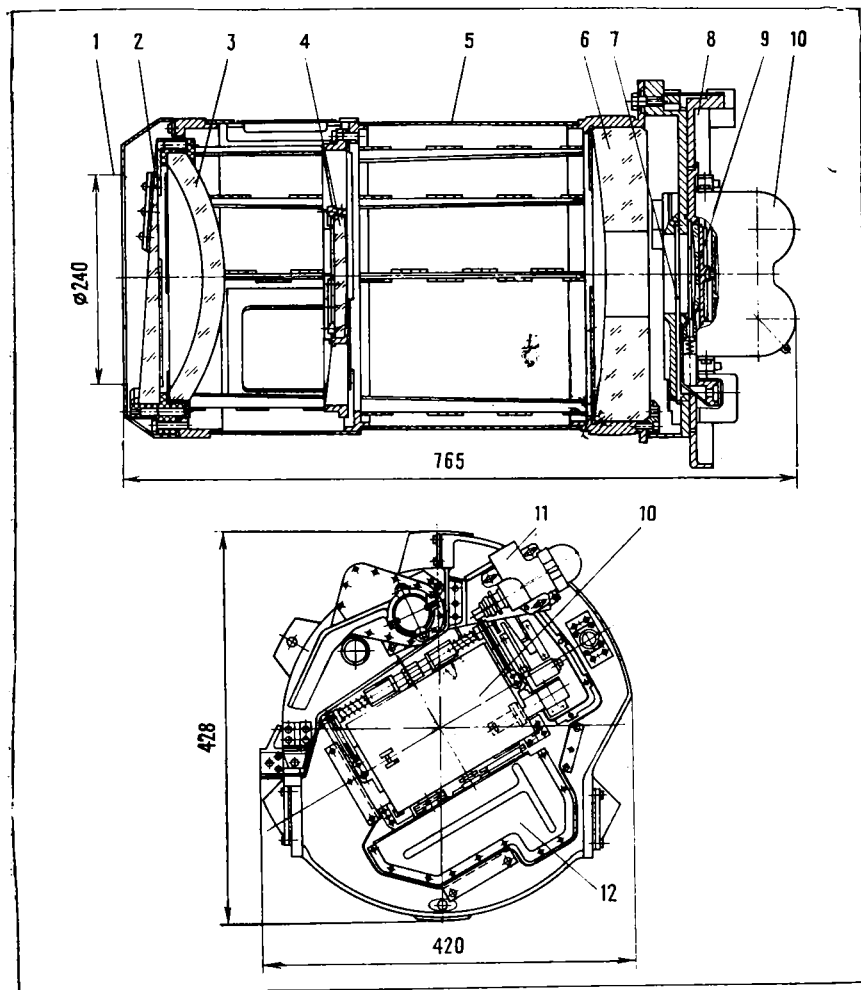


Рис. 2. 11. Конструкция телескопа:

1 — входное отверстие; 2 — объективная призма; 3 — мениск; 4 — вторичное зеркало; 5 — корпус телескопа; 6 — главное зеркало; 7 — затвор; 8 — кассетная часть; 9 — прикадровая линза; 10 — кассета; 11 — привод перемотки пленки; 12 — корпус

Кассетная часть телескопа включала в себя: кассетную площадку, кассету, фиксатор кассеты, привод перемотки пленки, привод затвора, счетчик кадров.

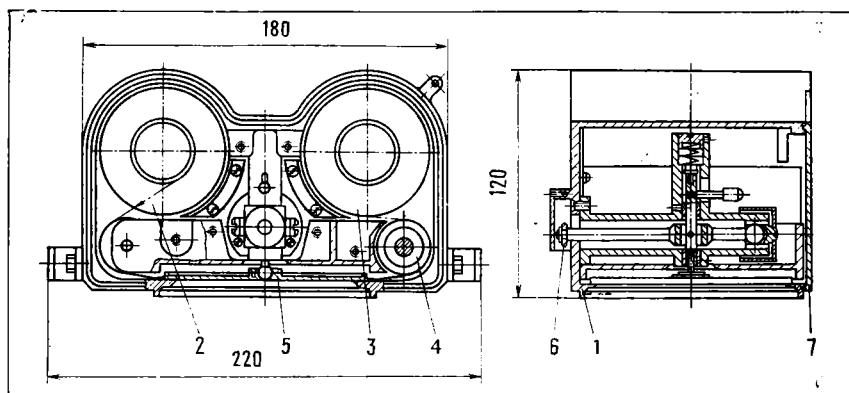


Рис. 2.12. Кассета телескопа:

1 — корпус кассеты; 2 — питающая катушка; 3 — приемная катушка; 4 — направляющие ролики; 5 — прижимной столик; 6 — кулачок; 7 — корпус

Кассетная площадка подведена к объективу телескопа на трех параллельных пластинах, что позволяет с помощью механизма расширения спектра (привода расширения, кулачка, рычагов) обеспечить расширение спектрограмм до 0,15 мм в направлении, перпендикулярном дисперсии с высокой стабильностью скорости расширения. На кассетной площадке установлена прикадровая линза, к которой прижимается фотопленка, находящаяся в кассете телескопа (рис. 2.12). Кассета закреплена на телескопе с помощью фиксатора, раскрываемого при отстреле кассеты с помощью пирочки. В зацеплении с приемной катушкой телескопа находится выходная шестерня привода перемотки фотопленки. Кинематическая схема привода перемотки (рис. 2.13) выбрана таким образом, чтобы при включении привода вначале срабатывал кулачок, приподнимающий прижимной столик кассеты и освобождающий пленку, и только после этого начинала вращаться приемная катушка кассеты. На питающей катушке кассеты установлен толкатель, который при повороте катушки периодически нажимает на микропереключатель, выдающий на пульт управления информацию о реальной протяжке пленки. Длина кадра в выбранной схеме формируется с помощью одного оборота приемной катушки и, следовательно, имеет разную длину в начале и конце пленки. Однако несколько больший расход фотопленки компенсируется повышением надежности привода перемотки. После каждой перемотки пленки на непродолжительное время включалась лам-

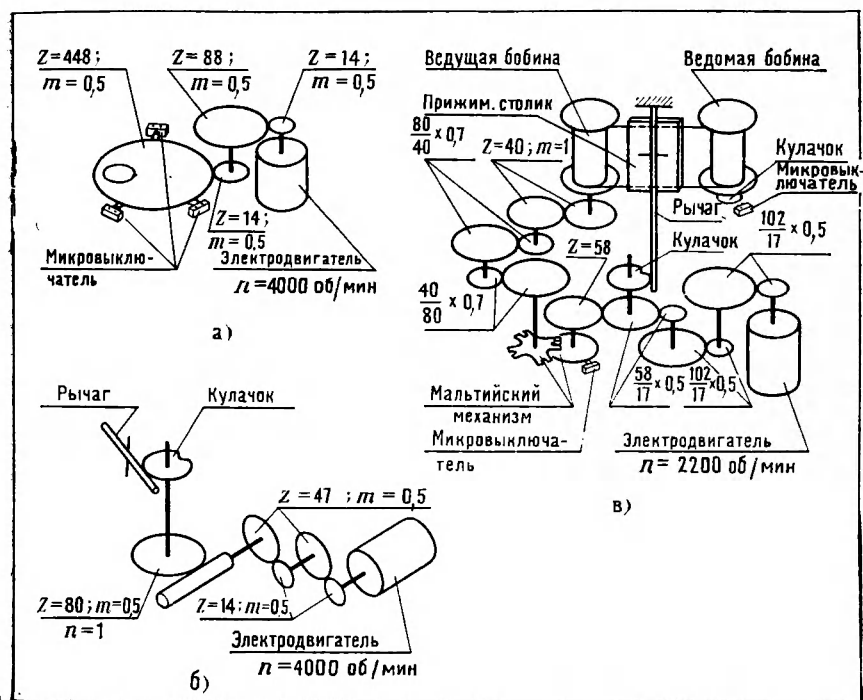
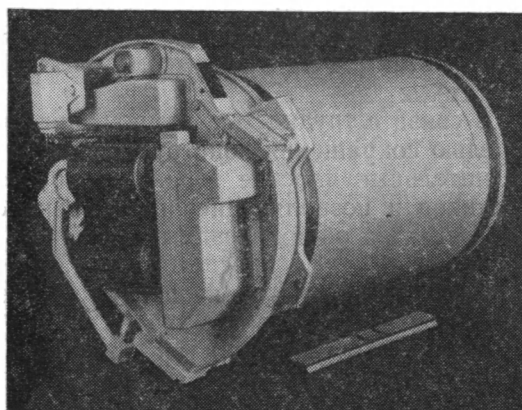


Рис. 2.13. Кинематические схемы механизмов телескопа:

а — фотозатвор; б — механизм расширения спектра; в — кассета

Рис. 2.14. Общий вид габаритно-массового макета менискового телескопа



почка подсветки электромеханического счетчика и через специальную оптику на фотопленке фиксировался порядковый номер кадра.

Перед прикадровой линзой (линза Пиацци — Смита) находится затвор телескопа, представляющий собой диск с эксцентричным отверстием, равным световому диаметру прикадровой линзы. При вращении диска, останавливаемого в различных положениях при срабатывании микропереключателей, выходное отверстие объектива телескопа открывается или закрывается в зависимости от поданной команды.

На рис. 2.14 приведен общий вид кассетной части габаритно-массового макета телескопа (кассета окрашена в черный цвет).

2.7. Конструкция астродатчиков

Для осуществления трехосной стабилизации на блоке телескопа были установлены две пары звездных датчиков, одна для двухкоординатной прецизионной стабилизации по опорной звезде А и вторая для менее точной однокоординатной стабилизации по звезде В. Хотя по принципу работы эти датчики значительно отличаются друг от друга, в их конструкции много общего.

В обоих астродатчиках были применены элементы, неработоспособные в условиях вакуума, поэтому было решено герметизировать эти датчики и заполнить их на Земле сухим воздухом. Герметизация внутренних объемов была выполнена путем заливки стыков крышек и оптики герметиком. Для контроля герметичности на обоих датчиках были установлены специальные клапаны, позволяющие производить в наземных условиях замену воздуха внутри датчика и контролировать степень его утечки. Унифицирован был и узел ФЭУ, включающий в себя кроме самого ФЭУ еще высоковольтный блок питания и предусилитель.

В связи с трудностью компоновки блока телескопа пришлось с целью сокращения конструктивной длины датчиков ввести дополнительные плоские зеркала, ломающие оптический тракт датчиков и позволяющие значительно сократить их габариты по длине. На обоих звездных датчиках были установлены съемные юстировочные приспособления, используемые при наземной юстировке для выставки оптических осей датчика относительно телескопа.

Двухкоординатный звездный датчик ДЗД (рис. 2.15) имеет перед объективом бленду, не только выполня-

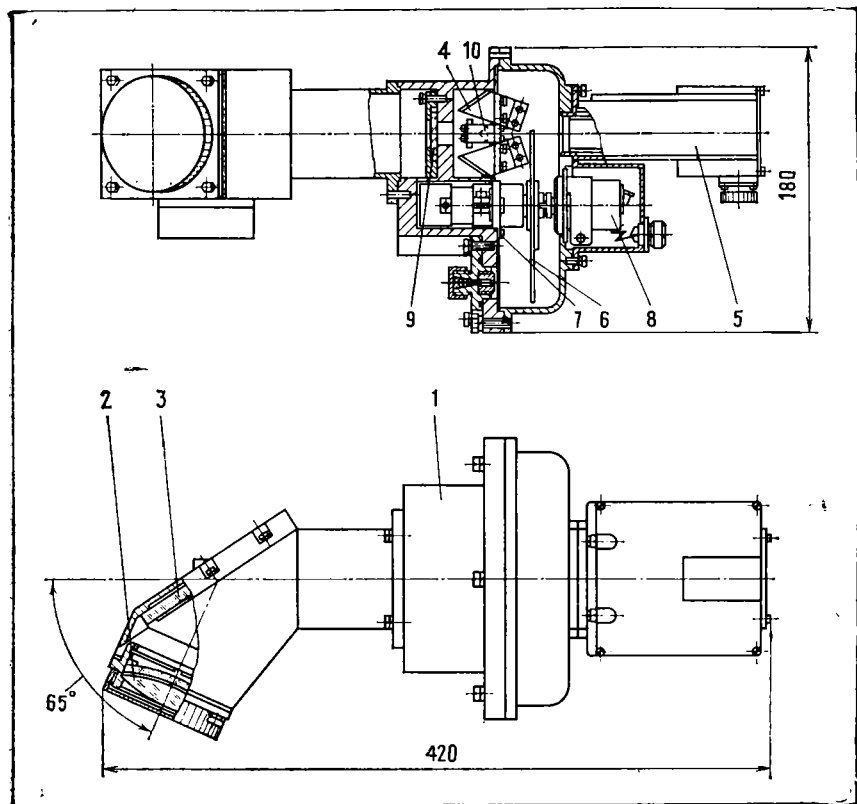


Рис. 2.15. Общий вид двухкоординатного звездного датчика:

1 — корпус; 2 — объектив; 3 — плоское зеркало; 4 — конденсатор; 5 — узел ФЭУ; 6 — обтюратор; 7 — привод обтюратора; 8 — ГОН; 9 — герметизирующая пластина; 10 — анализатор

ющую светозащитную роль, но и служащую теплозащитным элементом. Наибольшие требования по точности датчика относились к конструкции узла полудискового модулятора, являющегося основным элементом, от которого зависит угловая чувствительность датчика. Модулятор был закреплен на оси генератора опорных напряжений, имеющего прецизионные подшипники и приводимого во вращение с помощью высокоскоростного электродвигателя. Конструкция модулятора имеет возможность прецизионной выставки ножа модулятора относительно оси вра-

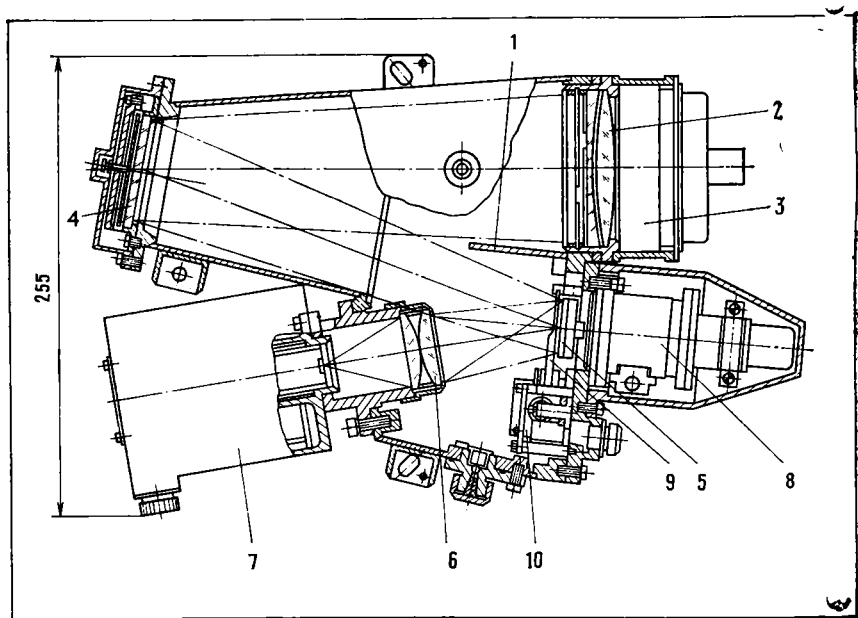


Рис. 2.16. Общий вид однокоординатного звездного датчика:

1 — корпус; 2 — объектив; 3 — блenda; 4 — плоское зеркало; 5 — полудисковый модулятор; 6 — конденсатор; 7 — узел ФЭУ; 8 — гон; 9 — откидная диафрагма; 10 — привод диафрагмы

шения модулятора, а также возможность последующей балансировки узла. Для захвата звезды необходимо довольно большое поле зрения (порядка 3°), но в процессе стабилизации после приведения звезды на ось датчика достаточно иметь поле зрения $0,5^\circ$. Уменьшение поля зрения улучшало соотношение сигнал/шум в звездном датчике, и следовательно, повышало точность стабилизации. Для реализации этого положения в датчике была установлена диафрагма, вводимая в поле зрения датчика после начала стабилизации. Управление положением диафрагмы осуществлялось с помощью двух электромагнитов, управляемых командами с пульта космонавта.

Однокоординатный звездный датчик ОЗД (рис. 2.16) по конструкции значительно проще датчика ДЗД. Анализатором положения звезды в этом датчике является двухгранная призма, расположенная в фокальной плоскости объектива. Световой поток от обеих граней призмы попеременно прерывается с помощью дискового obtюратора, вращаемого

электродвигателем, на оси которого находится также генератор опорного напряжения. Датчик ОЗД также продублирован путем установки двух одинаковых датчиков, однако их оси относительно друг друга немного наклонены, что позволяет в режиме поиска звезды В расширить зону ее поиска переходом на резервный датчик.

2.8. Кинематические и структурные особенности трехосной системы астростабилизации «Ориона-2»

Структурная схема трехосной системы гидирования орбитальной обсерватории «Орион-2» во многом определялась выбранной кинематической схемой установки звездных датчиков на астроплатформе, а также способом наведения самого телескопа на исследуемые объекты.

Кинематическая схема обсерватории «Орион-2» показана на рис. 2.17, где через $OZXY$ обозначена прямоугольная система координат, связанная с осями слежения телескопа, а через $OZ_kX_kY_k$ — система координат, связанная с осями карданова подвеса. Наведение телескопа на исследуемую звезду осуществлялось поворотом вокруг оси карданова подвеса OY_k на угол α и последующим поворотом относительно оси $OX = OX_k$ на угол β . При $\beta \neq 0$ ось OY_k не совпадает с соответствующей осью слежения телескопа OY , причем в случае малых угловых отклонений космического аппарата относительно центра масс углы поворота осей слежения телескопа связаны с углами поворота осей карданова подвеса матрицей

$$M = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & -\sin \beta & 1 \end{vmatrix}.$$

По существу матрица M характеризует взаимные связи между отдельными каналами системы слежения телескопа, обусловленные неортогональностью осей карданова подвеса.

Измерение отклонений телескопа относительно инерциального пространства производится при помощи двух звездных датчиков ДЗД и ОЗД, установленных жестко на корпусе телескопа и направленных на две заранее выбранные опорные звезды достаточной яркости, расположенные под углом $\psi = 65^\circ$. На звезду А, которая находится в центре исследуемой области, наводится ДЗД с полудисковой модуляцией светового потока, а на звезду В — ОЗД с призмным анализатором.

Сигналы с ДЗД подаются на приводы поперечных осей карданова подвеса OX_K и OY_K , а сигнал с ОЗД — на привод по оси OZ_K , осуществляющий слежение относительно оптической оси телескопа.

Наведение ОЗД на опорную звезду В производится разворотом всего телескопа вокруг оси OZ на угол захвата Φ . Таким образом, привод по оси карданова подвеса OZ_K выполняет в обсерватории «Орион-2» две функции — поиск и захват датчиком ОЗД опорной звезды В на начальной стадии наблюдений и последующее слежение телескопа относительно оптической оси OZ .

То обстоятельство, что датчик ДЗД и ОЗД установлены на телескопе жестко, приводит к интересным кинематическим и структурным особенностям трехосной системы слежения обсерватории «Орион-2». Дело в том, что датчик ДЗД в исходном положении отъюстирован так, что его оси чувствительности (на рис. 2.17 это оси Ol и Om), вокруг которых датчик измеряет отклонения центральной опорной звезды А, совпадают с поперечными осями слежения OX и OY . Поэтому, когда осуществляется захват опорной звезды В в результате разворота телескопа вокруг оптической оси OZ , указанные оси чувствительности смещаются относительно осей слежения OX и OY на угол захвата Φ , оставаясь в то же время в плоскости OXY . Это приводит к тому, что каждая ось чувствительности датчика ДЗД измеряет не чистое отклонение вокруг одной, требуемой оси слежения (оси OX и OY), а линейную комбинацию этих отклонений. Кроме того, ось чувствительности On однокоординатного датчика также занимает относительно телескопа некоторое угловое положение, не совпадающее с направлением оптической оси OZ . Вследствие этого сигнал с датчика ОЗД содержит не только полезную информацию об угловых отклонениях вокруг оси OZ , но и «паразитную» информацию об углах поворота телескопа в инерциальном пространстве вокруг поперечных осей OX и OY .

Применяя математические методы линейной алгебры и аналитической геометрии, можно показать, что сигналы со звездных датчиков связаны с угловыми отклонениями вокруг осей слежения телескопа (в случае малости этих отклонений) числовой матрицей R следующего вида:

$$R = \begin{vmatrix} \cos \Phi & -\sin \Phi & 0 \\ \sin \Phi & \cos \Phi & 0 \\ \cos \Phi \cos \psi & \sin \Phi \cos \psi & \sin \psi \end{vmatrix},$$

где элементы первых двух строк представляют собой направляющие косинусы осей чувствительности датчика ДЗД в системе координат $OXYZ$, а элементы третьей строки — направляющие косинусы оси чувствительности датчика ОЗД в той же системе координат. С точки зрения теории автоматического регулирования эта матрица представляет матрицу взаимных связей в измерительной части трехосной системы слежения, обусловленных несовпадением осей чувствительности обоих звездных датчиков с осями слежения OX , OY и OZ .

Нетрудно понять, что взаимные связи между каналами в измерительной и силовой частях ухудшают динамические и, в частности, точностные характеристики системы слежения обсерватории «Орион-2». На практике эти связи проявляются в том, что движение вокруг любой из взаимно перпендикулярных осей системы координат $OZXY$, связанной с корпусом (осями инерции) телескопа, передается в виде возмущения на две другие оси, тем самым искажая процесс слежения по данным осям и нарушая их ориентацию в пространстве. Однако проведенное в лаборатории следящих систем исследование показало, что при углах захвата Φ , не превышающих 10° , эти связи малы и практически не влияют на точность системы.

Существенную роль в формировании структуры трехосной системы слежения играет принцип работы двухкоординатного звездного датчика с полудисковой модуляцией светового потока (см. разд. 2.7). В этом датчике осуществляется амплитудно-фазовая модуляция светового потока, в результате чего информация об отклонениях опорной звезды A содержится в комплексной огибающей переменного сигнала на выходах ФЭУ и резонансного усилителя. Говоря проще, отклонения в измерительной и преобразующей частях датчика ДЗД определяются в полярной системе координат, причем амплитуда сигнала на выходе резонансного усилителя показывает величину отклонений, а фазовый сдвиг — направление. После демодуляции на выходах датчика получаются сигналы об отклонениях телескопа в прямоугольных, декартовых осях OX и OY .

Специфической чертой рассматриваемого датчика является одноканальный тракт передачи модулированного сигнала, чья частота определяется частотой вращения полудискового модулятора. Это значит, что такой же тракт имеется и в части структурной схемы, описывающей поперечные каналы слежения.

Резюмируя все сказанное, приходим к структурной схеме трехосной системы слежения, показанной на рис. 2.18. Эта схема составлена по основным правилам теории автомати-

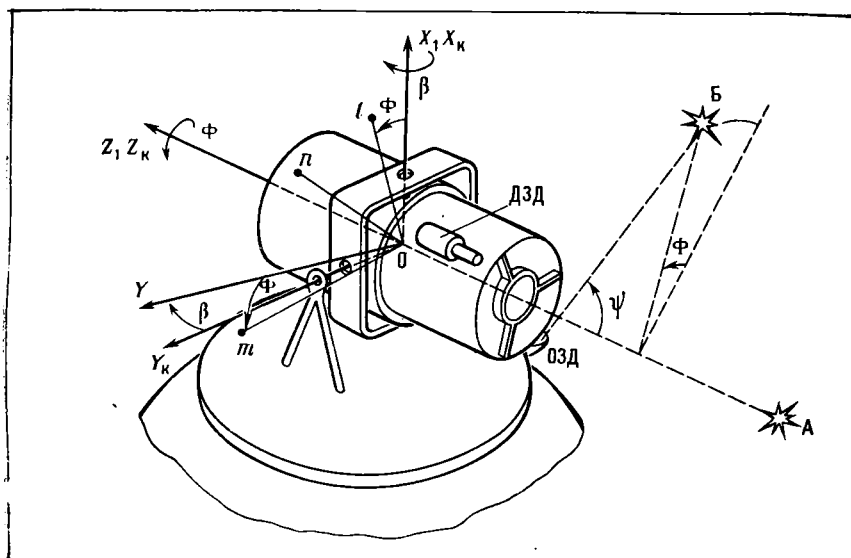


Рис. 2.17. Кинематическая схема астроплатформы обсерватории «Орион-2»: ДЗД — двухканальный звездный датчик; ОЗД — одноканальный звездный датчик

ческого регулирования и отражает все взаимосвязи и структурные особенности, имеющие место в трехосной системе слежения обсерватории «Орион-2».

Таким образом, трехосная система слежения орбитальной астрономической обсерватории «Орион-2», как и любая система косвенного гидирования телескопа при помощи двух опорных звезд, относится к классу взаимосвязанных (многосвязанных) систем автоматического регулирования с отрицательной обратной связью. Может оказаться, что трехосная система, сепаратные каналы которой спроектированы по обычным правилам классической теории регулирования систем с одним входом и выходом, из-за наличия взаимных связей окажется неустойчивой или же будет иметь недопустимо большие ошибки.

Поэтому при практической разработке взаимосвязанной системы слежения обсерватории «Орион-2» были применены современные методы теории многомерных систем автоматического регулирования, позволившие произвести учет взаимных связей между каналами и научно обосновать выбранную кинематическую схему установки телескопа и звездных датчиков.

Что касается анализа влияния взаимных связей на устойчи-

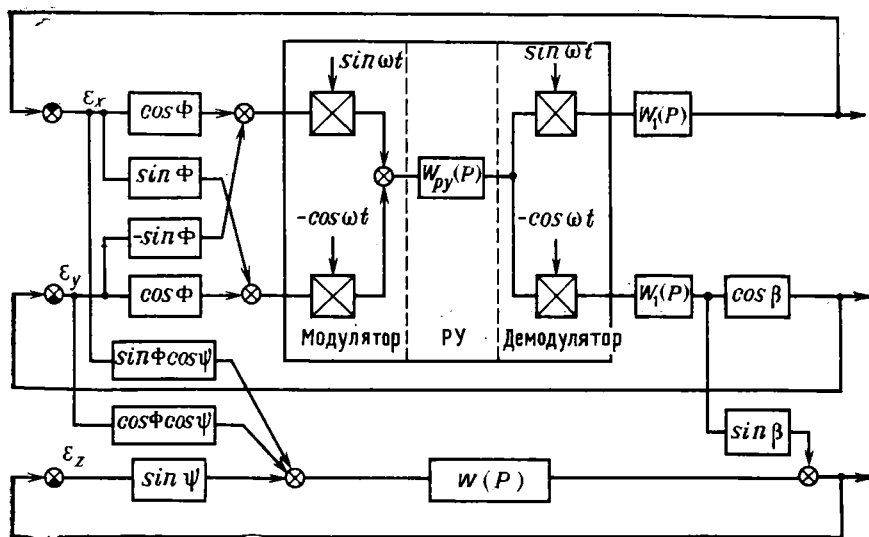


Рис. 2.18. Структурная схема трехосной системы астростабилизации и слежения обсерватории «Орион-2»

$W_{py}(P)$ — передаточная функция резонансного усилителя в одноканальном тракте; $W_t(P)$ — передаточная функция поперечных каналов; $W(P)$ — передаточная функция канала слежения относительно оптической оси телескопа

вость системы, то он требует привлечения сложного математического аппарата, известного в теории многосвязного регулирования как метод декомпозиции. Поэтому, не вдаваясь в подробности, укажем, что взаимосвязанная система слежения обсерватории «Орион-2» обладает достаточными запасами устойчивости при углах захвата Φ , не превышающих величину $\pm 10^\circ$, что удовлетворяется на практике.

Таким образом, проведенный анализ подтверждает правильность и эффективность выбранной кинематической схемы трехосной системы слежения орбитальной астрономической обсерватории «Орион-2».

2.9. Трехосная следящая система астростабилизации «Ориона-2»

Согласно принципу работы «Ориона-2» следящая система должна реагировать на возмущающие действия: от датчика наведения, т. е. от визирной системы, находящейся в орбитальном от-

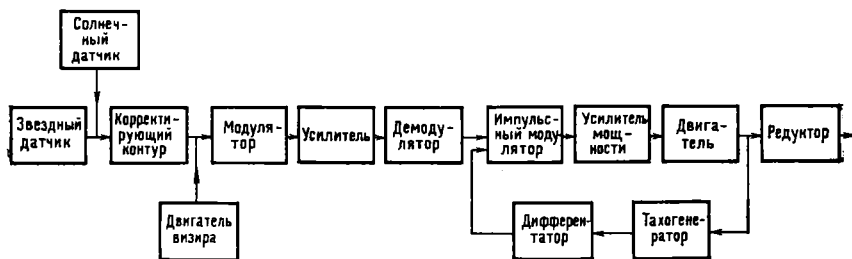


Рис. 2.19. Функциональная схема трехосной системы астростабилизации «Ориона-2»

секе корабля; от двух звездных датчиков ДЗД и ОЗД; от датчика Солнца.

На рис. 2.19 показана функциональная схема трехосной следящей системы «Ориона-2». Особенностью этой системы является то, что в каждом канале слежения все основные узлы сохраняются каждый раз, когда система получает сигналы рассогласования от тех или иных датчиков. При этом происходит переключение самих датчиков либо автоматически, либо дистанционно от пульта управления.

При расчете, анализе и моделировании следящей системы, а также при выборе корректирующих звеньев схемы были учтены ошибки самих датчиков, скоростная установившаяся ошибка, ошибка от сухого трения и упругости в механических передачах, ошибка, вызванная зоной нечувствительности и т. д. Сумма всех этих составляющих ошибок была принята в качестве максимальной ошибки.

Основные качественные показатели и величины максимальной ошибки слежения в пиках возмущений были определены моделированием всей системы на цифровой вычислительной машине. Составленная для этой цели программа позволяла легко и оперативно внести в машину не только структуру и параметры системы, но и параметры внешних воздействий, и все дополнительные данные и требования, необходимые для анализа переходных процессов.

2.10. Функциональная электрическая схема «Ориона-2»

Аппаратура «Ориона-2» представляла собой автономную систему в корабле «Союз-13», связь с которым осуществлялась лишь

по бортовому электропитанию (27 В) и телеметрическими каналами.

В структурную схему «Ориона-2» (она не приводится здесь в виде чертежа из-за ее громоздкости) входят системы электропитания и управления. Первая из них включает в себя следующие блоки и функциональные узлы: блок управления, блок вторичного электропитания, блок расчеховок (схема подрыва пиропатронов), усилители звездных датчиков, усилитель солнечного датчика, блок следящей системы по осям X, Y, Z, корректирующие узлы следящей системы.

В основу схемы управления был заложен принцип оптимального распределения обязанностей между автоматической системой и оператором, находящимся на борту корабля. Ставилось требование — предельно упростить работу оператора-космонавта и свести к минимуму количество выполняемых им операций.

На блок управления было возложено: управление работой научной аппаратуры, подключение и отключение датчиков рассогласования, выдача информации о состоянии аппаратуры по каналам телеметрии.

По характеру выполняемых работ блок управления можно разбить на три группы условных систем:

- систему управления визиром, звездными датчиками и солнечным датчиком, их подключением к системе слежения, управления режимами наведения, поиска и стабилизации;

- систему управления научной аппаратурой;

- вспомогательные системы подготовки и контроля аппаратуры.

2.11. Температурный режим обсерватории

Хотя условия в космическом пространстве относительно постоянны, температура телескопа обсерватории, ведущей наблюдения за звездами с орбиты, близкой к Земле, будет все время меняться. При входе корабля с обсерваторией в земную тень температура наружных открытых частей телескопа быстро падает. Сохранение оптических характеристик точного инструмента, каким является телескоп, при наличии таких колебаний температуры является весьма сложной задачей.

При проектировании космической обсерватории «Орион-2» была поставлена задача обеспечения теплового режима телескопа в пределах от -15°C до $+20^{\circ}\text{C}$. Для предотвращения переохлаждения на теневом и перегрева на солнечном участках орбиты обсерватория была установлена под специальный купол,

покрытый теплоизоляцией. Перед звездными и солнечными приборами обсерватории в куполе были проделаны отверстия, обеспечивающие свободный обзор приборов обсерватории при ее разворотах в пределах $\pm 15^\circ$ по каждой из трех осей монтировки. Так как размеры этих отверстий были довольно большими (около 1 м^2 и $0,5 \text{ м}^2$ для звездной и солнечной площадок соответственно), на самой обсерватории были дополнительно установлены теплоизоляционные экраны с прорезями под световые входы приборов и датчиков ориентации (см. рис. 2.1), что позволило уменьшить площадь открытых излучающих поверхностей до $0,06 \text{ м}^2$ на звездной и до $0,0005 \text{ м}^2$ на солнечной площадках. Если излучениями через входы солнечных приборов при массе обсерватории порядка 200 кг можно было практически пренебречь, то довольно значительная площадь открытых поверхностей звездных приборов потребовала принятия дополнительных конструктивных мер. Отверстие в куполе перед звездной площадкой было перекрыто специальной крышкой, открываемой только на время активной работы аппаратуры во время звездных сеансов.

Для компенсации тепловотерь через зазоры между экранами обсерватории и поверхностью купола, а также через световые входы оптических приборов на внутренней поверхности купола были дополнительно установлены тепловые излучатели малой мощности, управляемые с помощью специальных термореле.

Наибольшее опасение вызывала тепловая деформация телескопа, которая могла бы существенно повлиять на качество полученной информации. Поэтому для телескопа была разработана специальная методика расчета теплового режима и проведена оценка воздействия температуры на качество изображения. Бленда телескопа (длиной около 330 мм) должна была не только играть светозащитную роль, но и выполнять функции элемента, обеспечивающего необходимый тепловой режим.

Численное решение системы уравнений, описывающих тепловой режим обсерватории, показало, что оптические характеристики телескопа будут находиться в заданных пределах даже в аварийной ситуации (если крышка купола остается открытой) не должна превышать допустимых значений.

Для контроля изменения температуры в условиях реального полета на обсерватории было установлено 16 температурных датчиков — на телескопе и на звездных датчиках. Данные температурных измерений показывают, что температурный режим

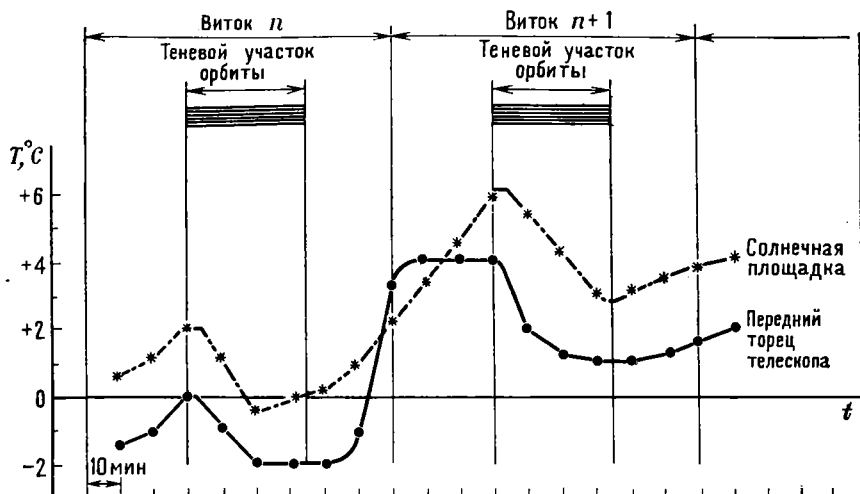


Рис. 2.20. Изменение температуры во время рабочих сеансов обсерватории «Орион-2»

обсерватории в основном находился в пределах от -10°C до $+12^{\circ}\text{C}$, при этом средний диапазон изменения температуры на одном датчике был 17° , а в течение суток температура менялась на $\approx 5^{\circ}\text{C}$.

Конечно, больший интерес вызывало измерение температурных перепадов за один рабочий сеанс, так как именно от этого зависело распределение градиентов температуры по полю оптических деталей. Этот перепад был достаточно мал и составил в среднем (для звездной площадки) от $1,5^{\circ}\text{C}$ до 4°C для одного датчика за один рабочий теневой участок. При этом перепад температур солнечной и звездной площадок составлял от 1°C в начале звездного сеанса до 4°C в его конце.

На рис. 2.20 показан типичный график поведения температурных датчиков звездной и солнечной площадок во время рабочих сеансов.

Таким образом, данные температурных измерений, а также анализ качества снимков, выполненных в начале и конце рабочего звездного сеанса, показывают, что тепловой расчет и конструктивное обеспечение теплового режима были выполнены верно и обеспечивали необходимые условия для нормального функционирования телескопа.

2.12. Контрольные датчики. Телеметрическая информация

Обсерватория «Орион-2» — сложное оптико-механическое устройство с большим количеством электрических связей; большое внимание при ее разработке было уделено системам контроля ее работоспособности на орбите. Контроль этот осуществлялся двумя способами: визуально космонавтом по пульту управления и наземной группой управления по цепям телеметрической связи.

На пульт управления были выведены индикаторы следящих контрольных датчиков: включения обсерватории; разарретирования осей; положения диафрагмы двухкоординатного звездного датчика; включения режимов слежения; прохождения процесса наведения на опорную звезду А, прохождения процесса поиска опорной звезды В; наличия захвата звезды или Солнца; наличия стабилизации по звезде или Солнцу; прохождения процесса возврата обсерватории в исходное положение; выхода приводов монтировки в концевые положения по каждой из осей, а также прихода в нулевое положение; включения телескопа; открытия затвора телескопа; включения режимов перемотки фотоплетки в научных приборах; протяжки пленки в кассете телескопа; включения и прохождения программ экспозиций; схода кассет в места фиксации при отстреле кассет.

Количество информации, введенной на пульт управления, было по возможности минимизировано с целью облегчения ее восприятия космонавтом.

Более основательный контроль функционирования обсерватории проводился наземной группой управления по показаниям телеметрических датчиков. Для контроля использовались как сигнальные, так и аналоговые датчики. Количество сигнальных параметров, имеющих два состояния «да» и «нет» и выдаваемых контактами реле, было равно 19. Распределены они были следующим образом:

шесть параметров контролировали входы и выходы блоков системы слежения по каждой оси. Срабатывали они, если уровень напряжения на входе или выходе превышал определенный порог;

четыре параметра контролировали работу программного устройства и срабатывали при выдаче автоматических команд на управление затвором телескопа и перемотку кассет научных приборов;

пять параметров контролировали процесс перемотки в научных приборах как в автоматическом, так и в ручном режимах;

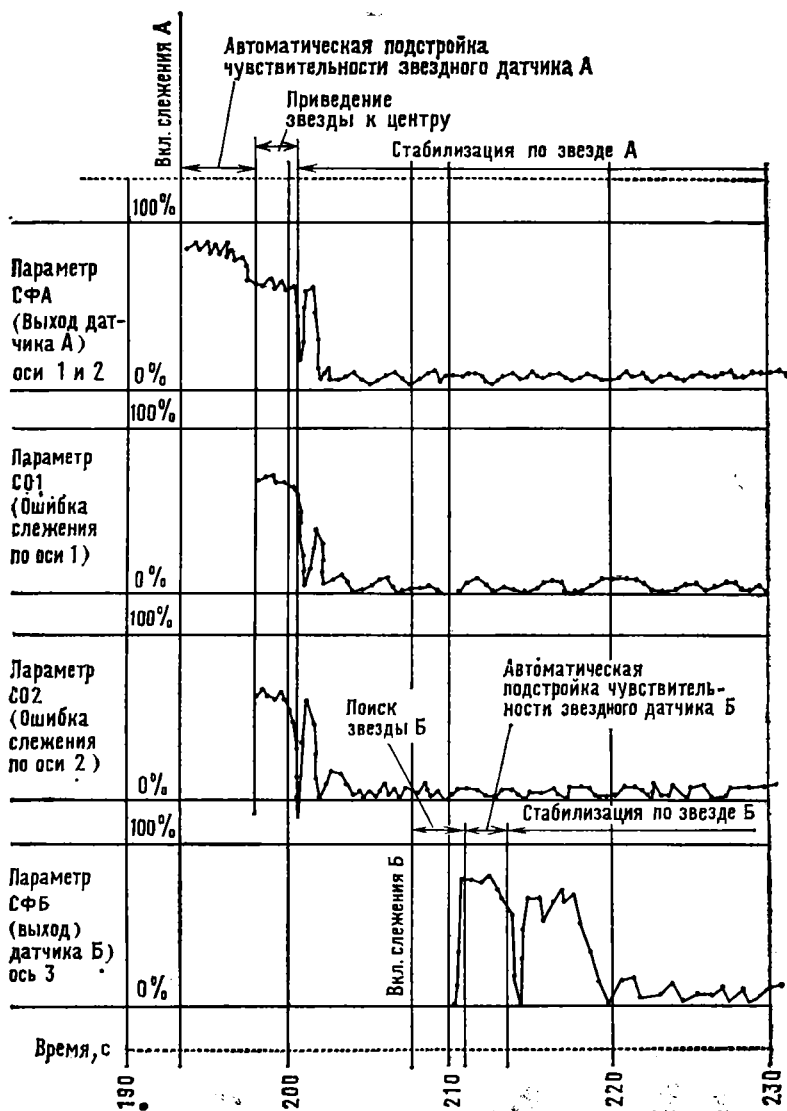


Рис. 2.21. Характерное поведение телеметрических параметров при захвате и стабилизации по опорным звездам А и В

три параметра контролировали положение затвора телескопа и выдачу команды на привод затвора;

один параметр контролировал захват Солнца солнечным датчиком.

Аналоговые телеметрические датчики, выход которых мог меняться от 0 до 6 В в зависимости от состояния аппаратуры, можно разделить на две группы:

датчики периодического контроля;

датчики непрерывного контроля.

Восемь датчиков периодического контроля предназначались для контроля работоспособности преобразователей как низковольтного, так и высоковольтного напряжений питания и поэтому не требовали высокой скорости опроса состояний телеметрических параметров.

Восемь датчиков непрерывного аналогового контроля обслуживали систему слежения и выдавали информацию о величине рассогласований оптических осей звездных и солнечного датчиков с направлением на опорные звезды или Солнце. При этом сигнал ошибки можно было контролировать как на выходе усилителя астродатчиков, так и на выходе блоков системы слежения.

На рис. 2.21 приведен пример изменения аналоговых телеметрических параметров, характеризующих работу системы слежения.

В периодическом виде были выведены аналоговые параметры, получаемые по показаниям шестнадцати температурных датчиков, установленных в различных точках обсерватории.

2.13. Спектральные и фотометрические характеристики «Ориона-2»

На «Орионе-2» использовался фотографический метод регистрации ультрафиолетовых спектральных снимков. Для расшифровки этих снимков и представления их в виде наблюдаемых кривых распределения энергии в ультрафиолете необходимо было иметь ряд вспомогательных кривых: характеристическую кривую использованной в «Орионе-2» фотопленки Кодак 103-O-UV, дисперсионную кривую и кривую энергетической чувствительности телескопа.

Характеристическая кривая предназначалась для перехода от плотности почернения на снимках спектров к интенсивности на данной длине волны.

Стандартные спектрограммы, необходимые для построения

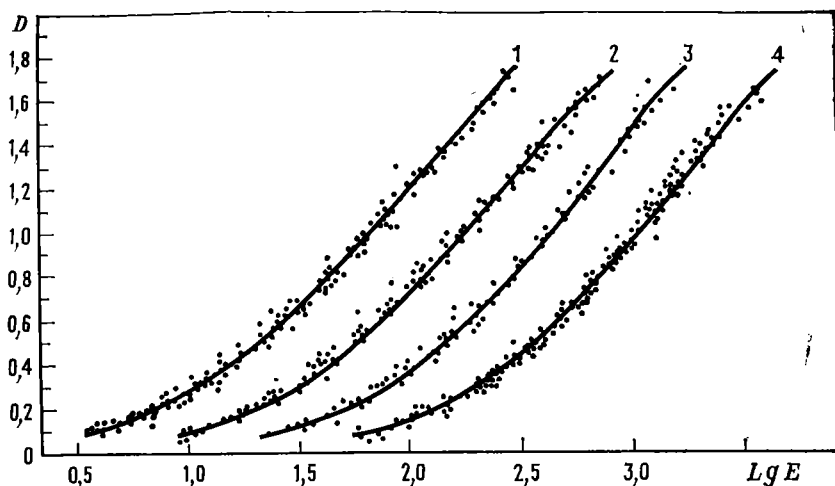


Рис. 2.22. Характеристическая кривая фотопленки Кодак 103-О-UV:

кривая 1 — 2300 ... 2500 Å; кривая 2 — 2500 ... 3200 Å; кривая 3 — 3200 ... 3500 Å; кривая 4 — 3500 ... 4 000 Å

характеристической кривой фотопленки Кодак 103-О-UV, были получены в лабораторных условиях (на коротковолновых спектрографах ИСП-30 и ДФС-29) и на кусках штатной фотопленки, побывавшей в космосе и специально оставленной неиспользованной в штатной кассете. Более того, этот кусок фотопленки после фотографирования стандартных спектрограмм проявлялся в бачке одновременно с рулоном фотопленки с фотоснимками, полученными в космосе. Выполнение этих условий очень важно для повышения надежности фотографических измерений «орионовских» спектрограмм, так как позволяет контролировать такие неконтролируемые факторы, как рецепт проявителя, время и температура проявления, от которых реакция эмульсии также зависит.

В качестве источника света была использована ртутная лампа ПРК-4, спектр которой представляет собой набор эмиссионных линий по всему ультрафиолету. Для обеспечения необходимого набора величин интенсивностей излучения I и соответствующих им плотностей почернения D излучение на спектрографах пропусклось также через 9-ступенчатый кварцевый ослабитель. В результате при одной и той же выдержке одновременно удалось получить девять спектрограмм ртутной лампы,

ослабленных относительно друг друга в известное число раз.

Наклоны характеристических кривых фотопленки Кодак 103-О-UV, представленные на рис. 2.22, оказались практически одинаковыми для четырех областей длин волн, покрывающих почти весь рабочий диапазон «Ориона-2»: 2300—2500 Å, 2500—3200 Å, 3200—3500 Å и 3500—4000 Å. Поэтому в процессе обработки «орионовских» спектрограмм переход от плотности почернения к интенсивности осуществлялся с помощью одной характеристической кривой, общей для всего рабочего диапазона «Ориона-2», от 2000 до 4000 Å.

Дисперсионная кривая отождествляла длины волн на спектрограммах, полученных тем же штатным менисковым телескопом «Орион-2» с объективной призмой. Для построения дисперсионной кривой были использованы также «орионовские» спектрограммы звезд, если удавалось распознать или отождествить те или иные спектральные линии. В большинстве случаев стандартизация длин волн осуществлялась без особого труда, так как были использованы следующие критерии:

а) резонансный дублет ионизованного магния, 2800 Mg II, являющийся самой характерной деталью звездных спектров в ультрафиолете начиная, по крайней мере, от класса В8 до К;

б) первые линии бальмеровской серии водорода H_β , H_γ , H_δ и H_ϵ , а также бальмеровский скачок, достаточно четко выделяющийся в спектрах звезд классов В—А—F, несмотря на очень низкую дисперсию в этой области спектра;

в) наблюдаемые также в ультрафиолетовом спектре линии 2542 Si III, 2712, 2755 Fe II, 2934 Mg II, 2852 Mg I, которые достигают максимальной силы у звезд тех или иных спектральных классов, практически от горячих до холодных.

Поскольку в каждом конкретном случае нуль-пункт шкалы выбирается по тем или иным ультрафиолетовым линиям, ошибка из-за изменения дисперсии по полю зрения телескопа сводилась к минимуму, а точность наших определений длин волн в спектрах измеренных звезд оценивается нами в 2—3 Å.

Калибровочная кривая предназначалась для нахождения истинного распределения энергии в спектрах звезд с учетом чувствительности фотопленки и спектрального пропускания всей оптики телескопа. Для построения этой кривой на штатной пленке с помощью штатного телескопа «Орион-2» фотографировался спектр источника света с известным распределением энергии в рабочем диапазоне длин волн.

В период подготовки обсерватории «Орион-2» к натурному эксперименту ее менисковый телескоп с объективной призмой

был откалиброван энергетически с использованием синхротронного излучения и фотопленки УФШ-4 (см. разд. 2.14).

Натурный эксперимент был проведен, однако, без предварительной энергетической калибровки и на фотопленке Кодак 103-O-UV, чувствительность которой оказалась в несколько раз выше чувствительности фотопленки УФШ-4 в интересующей нас области спектра 2000—3000 Å. Позднее, после завершения натурного эксперимента с «Орионом-2», был осуществлен переход редуccionной кривой от фотопленки УФШ-4 к фотопленке Кодак 103-O-UV уже в лабораторных условиях. К сожалению, большое число фотометрических переходов, неизбежных в подобных ситуациях, не обеспечило достаточной точности конечных результатов.

Более надежным в данном случае оказалось построение редуccionной кривой с помощью звезд класса A0, спектрограммы которых были получены тем же менисковым телескопом «Орион-2» во внеатмосферных условиях.

Для этого на «орионовских» снимках области неба вокруг Капеллы было отобрано несколько относительно ярких звезд спектрального класса A0 и, что особо важно, с нулевым показателем цвета — признак того, что непрерывные спектры этих звезд практически не искажены межзвездным селективным поглощением света. Эти звезды следующие: HD 34788 ($V = 7^m,52$), HD 34680 ($V = 9^m,2$) и HD 34131 ($V = 9^m,17$). Затем, сопоставляя усредненную для трех упомянутых звезд класса A0 наблюдаемую кривую распределения энергии в непрерывном спектре $I_{\lambda\text{набл}}$ с теоретической кривой распределения энергии $E_{\lambda\text{теор}}$ для модели фотосферы звезды класса A0, можно найти коэффициент редуccion δ_λ — относительную спектральную чувствительность телескопа при его работе с фотопленкой Кодак 103-O-UV:

$$\delta_\lambda = \frac{I_{\lambda\text{набл}}}{E_{\lambda\text{теор}}}.$$

Кривая зависимости δ_λ от длины волны, построенная описанным способом, приведена на рис. 2.23 (точки); при этом принято $\delta_{3200} = 1$.

К счастью, для одной звезды — HD 35708 (B3V, $V = 4^m,86$), спектрограммы которой были также получены «Орионом-2», имеются измерения потоков в отдельных полосах в ультрафиолете, произведенные с помощью американской орбитальной обсерватории ОАО-2. Сопоставление данных «Ориона-2» и ОАО-2

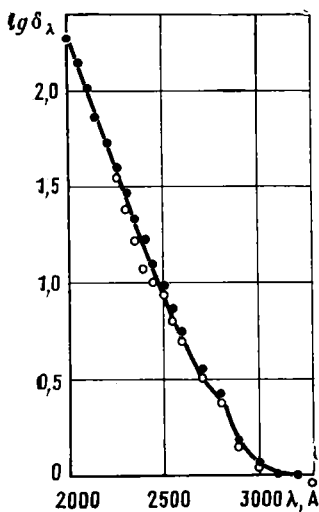


Рис. 2.23. Кривая относительной спектральной чувствительности (редукционная кривая) $\delta\lambda$ для менискового телескопа «Ориона-2», построенная с использованием трех звезд класса A0 (точки) и звезды HD 35708 (кружки)

для этой звезды позволило также построить редукционную кривую телескопа «Орион-2». Результаты, которые также показаны на рис. 2.23 (кружки), хорошо согласуются с первыми измерениями; во всяком случае разброс не превышает ошибок измерений (в области длиннее 3200 Å совпадение полное, почему эти данные на рисунке не приводятся).

Редукционная кривая, показанная на рис. 2.23, была принята в качестве рабочей при обработке и измерении всех спектральных снимков, полученных

«Орионом-2». В частности, для нахождения истинных потоков излучения F_λ , исправленных с учетом спектральной чувствительности менискового телескопа и использованной фотопленки, имеем

$$F_\lambda = I_{\lambda\text{набл}} \delta_\lambda,$$

где $I_{\lambda\text{набл}}$ — величины, найденные непосредственно из измерений спектрограмм [17].

2.14. Энергетическая калибровка астрономических телескопов с использованием синхротронного излучения

Для энергетической калибровки аппаратуры необходимо иметь стабильный источник света с известным распределением энергии в ультрафиолетовом спектре.

Были созданы различные типы ламп накаливания с окнами из фтористого лития, кварца или сапфира, газовые источники, содержащие водород или инертные газы и возбуждаемые постоянным или высокочастотным током, искровые разрядные трубки, рентгеновские трубки и т. п.

Все эти источники излучения имеют, однако, ряд существенных недостатков, делающих проблематичным их использование для энергетической калибровки астрономической аппаратуры:

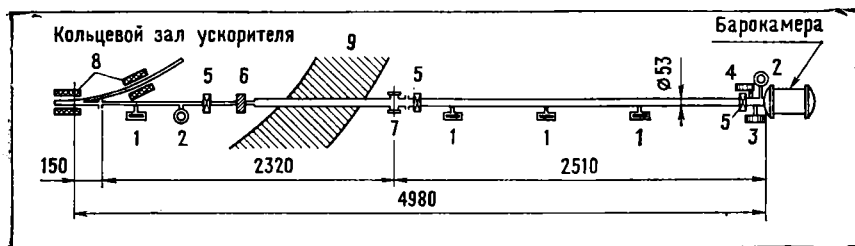


Рис. 2.24. Общая структура синхротронной установки:

1, 2, 3, 4 — вакуумные насосы различного типа; 5 — герметичный затвор (шибер); 6 — свинцовый затвор; 7 — патрубок с приспособлениями наводки на пучок; 8 — магниты ускорителя; 9 — защитная стена зала ускорителя

нестабильность излучения со временем, загрязнение оптических элементов, ограниченность спектрального диапазона использования закрытых трубок (ламп накаливания, газовых источников). Не совсем ясна также перспектива использования плазменного излучения, во всяком случае в области длин волн короче предела пропускания кварца (1600 Å).

Всех перечисленных выше недостатков лишено синхротронное излучение. Забегая вперед, можно смело утверждать, что синхротронное излучение в настоящее время является идеальным источником света для калибровки астрономической аппаратуры в любом диапазоне длин волн — от жесткого рентгена до видимых лучей.

Синхротронное излучение генерируется в электронных ускорителях в результате центростремительного торможения электронов в

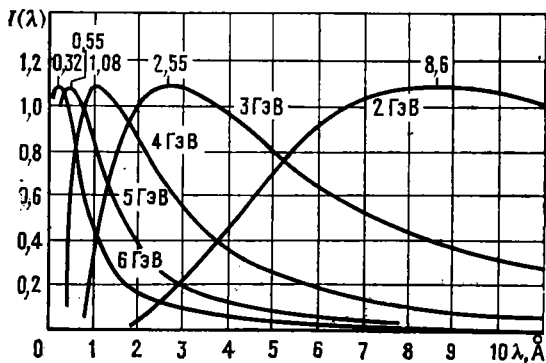


Рис. 2.25. Спектры синхротронного излучения в рентгеновском диапазоне при различных значениях энергии электронов

процессе их разгона в магнитном поле. Теория этого излучения достаточно хорошо разработана, а эксперименты подтвердили ее правильность.

Не вдаваясь в подробности расчета, опишем основные свойства синхротронного излучения, генерируемого электронно-кольцевым ускорителем Ереванского физического института. Именно на синхротронной установке, созданной при этом ускорителе специально для целей энергетической калибровки астрономических телескопов (рис. 2.24), была осуществлена калибровка телескопов — сперва «Ориона-1», затем и «Ориона-2».

На рис. 2.25 приведены теоретические спектры синхротронного излучения в рентгеновском диапазоне при различных значениях энергии электронов (2—6 ГэВ). Как видим, в диапазоне $1 - 10 \text{ \AA}$ зависимость спектра синхротронного излучения от энергии электронов E_0 очень сильна. Это следует иметь в виду всегда, когда речь идет об энергетической калибровке рентгеновской аппаратуры или о проведении того или иного физического эксперимента, имеющего отношение к рентгеновским лучам.

Далее, максимум синхротронного излучения по мере увеличения энергии электронов E_0 передвигается в сторону коротких волн, а интенсивность излучения сравнительно быстро падает

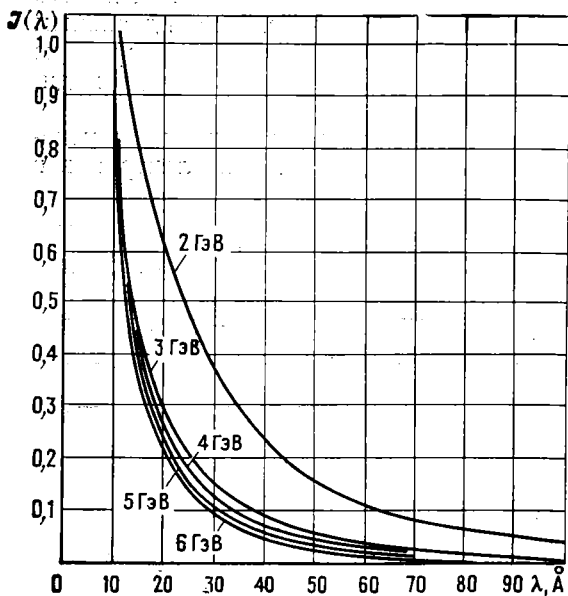
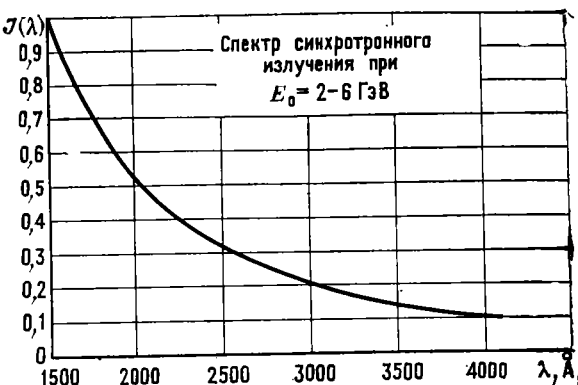


Рис. 2.26. Спектры синхротронного излучения в диапазоне мягкого рентгена при различных значениях энергии электронов

Рис. 2.27. Спектр синхротронного излучения в области 1500—4000 Å при энергиях электронов 2—6 ГэВ



по обе стороны от максимума. Оба эти фактора позволяют надеяться на использование синхротронного излучения почти в качестве отфильтрованного (монокроматизированного) излучения со сравнительно неширокой полосой пропускания. При этом максимум полосы пропускания можно иметь по желанию на любой длине волны, варьируя только величиной энергии электронов E_0 .

На рис. 2.26 представлены спектры синхротронного излучения в диапазоне 10—100 Å при различных значениях энергии электронов (2—6 ГэВ). В этом диапазоне зависимость спектра от E_0 менее сильна, чем в предыдущем случае, и тем слабее, чем больше E_0 . Поэтому при калибровочных работах в этом диапазоне энергия электронов должна быть строго зафиксирована в течение всего периода эксперимента.

Абсолютная величина энергии, излучаемой в диапазоне 100—1000 Å (область жесткого ультрафиолета), на несколько порядков меньше, чем в рентгеновской области. Зависимость же спектрального распределения излучения от энергии электронов в этом случае значительно слабее, чем в предыдущих случаях. Практически эта зависимость исчезает в диапазоне 1000—5000 Å. Благодаря этому можно рекомендовать одно общее спектральное распределение энергии синхротронного излучения при работе с энергиями электронов в интервале $E_0 = 2 \dots 6$ ГэВ и в диапазоне длин волн 1500—4000 Å (рис. 2.27).

Следующей интересной особенностью синхротронного излучения в диапазоне 1500—4000 Å является сравнительно медленное падение его интенсивности в сторону длинных волн.

Имея в виду перечисленные выше положительные качества синхротронного излучения как источника света, нами была создана специальная установка для вывода синхротронного излучения, возникающего на электронно-кольцевом ускорителе Ереванского физического института.

Указанная установка (для краткости будем называть ее синхротронной) предназначена в первую очередь для проведения энергетической калибровки астрономической аппаратуры, работающей в космосе. Первая синхротронная установка при электронно-кольцевом ускорителе Ереванского физического института была создана в 1971 г. Тогда же были получены первые результаты по калибровке астрономических телескопов. Позднее к этому ускорителю было создано еще несколько приставок-выводов синхротронного излучения для экспериментов в области физики твердого тела, биологии и пр. [7].

ОБСЕРВАТОРИЯ «ОРИОН-2» НА ОРБИТЕ

3.1. Баллистическое обеспечение полета

Запуск любого космического аппарата направлен на решение определенного круга задач. В число основных задач, которые ставятся перед экипажем пилотируемых космических кораблей, входит проведение научных, технических и народнохозяйственных экспериментов. Для осуществления этих экспериментов практически во всех случаях требуется проведение так называемого баллистического обеспечения, т. е. расчета и выдачи на борт космического корабля необходимых баллистических данных. При этом слово «баллистическое» понимается расширенно, так как обеспечение экспериментов включает в себя оперативный расчет и выдачу не только чисто баллистических, но и функционально-технических и уставочных данных, необходимых для управления движением космического корабля относительно центра масс и обеспечения работы установленной на корабле научной или технической аппаратуры, и поэтому зависящих от устройства приборов и систем корабля. Расчет и выдачу необходимых данных требуется производить, как правило, с высокой точностью, в ограниченное время, с учетом аппаратурных, энергетических, геофизических, астрономических и других ограничений.

Поскольку в настоящей книге рассказывается о космической астрономической обсерватории «Орион-2», мы рассмотрим, каковы необходимые баллистические данные для успешного проведения астрофизических наблюдений с помощью этой обсерватории.

Для осуществления астрофизического эксперимента, в том числе и в космосе, очевидно, необходимо навести на исследуемый источник излучения оптическую ось астрономического прибора (телескопа, спектрографа и т. п.) и заставить ее в пространстве с тем, чтобы за время сеанса наблюдения эта ориентация оптической оси с заданной точностью сохранялась неизменной. Следовательно, изготовить астрономический прибор, установить его на космический корабль и вывести его за пределы земной атмосферы — еще не означает решить весь комплекс задач по наблюдению далеких и таинственных космических объектов. Возникают исключительно сложные задачи по обеспечению управления ориентацией и стабилизацией корабля, по наведению астрономического прибора на выбранный косми-

ческий объект и удержанию оптической оси прибора с высокой точностью в требуемом направлении.

Стабилизация в пространстве телескопа «Орион-2» осуществлялась по опорным звездам, для чего на нем были установлены специальные фотогиды. К началу сеанса наблюдений было необходимо осуществить и поддерживать такую трехосную ориентацию корабля, при которой свет от заданных опорных звезд попадал бы в поле зрения звездных датчиков, а электромагнитное излучение от заданного источника — в поле зрения телескопа.

Возложение всех операций по обеспечению эксперимента «Орион-2» на космонавтов было признано нецелесообразным. Космонавты, прошедшие до полета в космос курс подготовки в планетариях и под открытым небом, безусловно могли опознать на небе требуемое созвездие и с помощью ручной системы ориентации развернуть корабль в требуемом направлении. Однако накопленный к тому времени опыт опознавания звезд через иллюминатор космического корабля говорил о возможности допущения ошибок. И не удивительно. Ведь звезд так много, они так похожи друг на друга, очертания созвездий столь условны, а условия наблюдения так сложны и необычны! Космонавт должен дожидаться когда требуемый участок неба не будет заслонен перемещающимся диском Земли, быстро опознать звезды через иллюминатор, поле зрения которого конструктивно ограничено, и выполнить развороты корабля непосредственно перед входом в тень, возможно, в условиях некоторой внутренней подсветки, а главное — в состоянии невесомости, к которому трудно привыкнуть и при котором трудно сосредоточиться. Но если даже космонавт быстро и безошибочно опознал звезды, то спрашивается, как, в какой последовательности он должен разворачивать корабль для достижения заданной пространственной ориентации за кратчайшее время? По-видимому, нет необходимости говорить о том, что в условиях космического полета полезное рабочее время и рабочее тело (сжатый газ), используемое для разворотов и стабилизации корабля, представляют большую ценность.

Для обеспечения эксперимента «Орион-2» необходимо было произвести расчет и выдачу на борт корабля «Союз-13» большого объема баллистических данных, содержащих информацию о видимом положении звезд относительно Земли, о требуемых разворотах корабля для достижения заданной пространственной ориентации, о времени начала и окончания эксперимента, о положении исследуемых звезд в поле зрения телескопа и т. п.

Для того чтобы ознакомиться с особенностями баллистического обеспечения, представим себя на несколько минут пассажирами космического корабля. Освоившись с непривычным состоянием невесомости, прильнем к иллюминатору. Мы увидим ослепительно яркое Солнце, алмазные россыпи звезд на черном бездонном небе и огромный разноцветный шар Земли. При этом мы обратим внимание на то, что примерно через каждые полтора часа панорама Земли меркнет, погружается в непроницаемый мрак, и тогда начинает казаться, что немерцающие огоньки звезд быстро разгораются, они становятся ближе и число их растет. Мы понимаем, что это происходит вследствие привыкания наших глаз к темноте быстротекущей космической ночи. Но вот снова занимается заря, из-за края Земли сквозь фантастические радужные арки снова сияет и быстро поднимается Солнце.

Присмотревшись внимательнее, мы замечаем, что не только одно Солнце, но и весь небесный свод с Солнцем, звездами и планетами вращаются вокруг некоторой оси, которая перпендикулярна направлению полета корабля. Эта воображаемая ось вращения небесной сферы пересекает ее в двух точках. Вблизи этих точек звезды, да и любые другие небесные светила, почти неподвижны, но чем дальше они отдалены от этих «точек подвеса небесной сферы», тем заметнее их участие во всеобщем вращении. Конечно, это вращение чисто кажущееся. Оно является отображением реального движения корабля на орбите Земли.

Наземные астрономические обсерватории обычно работают по ночам: рассеивание солнечного света в атмосфере препятствует успешному наблюдению звезд днем. Однако ночью можно наблюдать только те звезды, которые в данное время года удалены от Солнца на достаточно большое угловое расстояние (более 90°). Казалось бы, что с выходом за пределы земной атмосферы это препятствие должно устраниться, и космическому астроному-наблюдателю откроются более широкие перспективы как по выбору объектов, так и по длительности их наблюдения. Однако, попав на орбиту спутника Земли, мы вместо хорошей длинной земной ночи получили «мелькание», непривычно частую смену дня и ночи; вместо достаточно медленного вращения небесной сферы, когда звезды могут наблюдаться на протяжении нескольких часов, мы столкнулись со стремительным (4 градуса в минуту) вращением небесной сферы.

Таким образом, наблюдать звезды с орбиты спутника Земли оказалось делом совсем не легким. Как мы уже заметили, почти

половина небесной сферы закрыта земным шаром. Этот шар передвигается по небу с угловой скоростью 4 градуса за минуту, совершая полный оборот по небу вокруг космического корабля за полтора часа. В своем величественном перемещении земной шар закрывает собой не только звезды, но и Солнце, Луну, планеты. Когда за краем Земли исчезает Солнце, то говорят, что спутник вошел в тень Земли. За 24 часа спутник входит в тень Земли почти 16 раз. Возможны случаи, когда и без того короткая орбитальная ночь становится совсем короткой, длится всего несколько минут. Тогда Солнце, не успев глубоко погрузиться за край Земли, снова поднимается в своем ослепительном величии. Если же Солнце будет находиться еще ближе к одному из двух полюсов орбиты спутника (т. е. к одной из двух «точек подвеса» воображаемой оси вращения небесной сферы), то оно может даже не задевать видимый край Земли. В таком случае наступит непрерывный орбитальный день.

По многим причинам желательно, чтобы работа с телескопом «Ориона-2» осуществлялась в тени Земли: космонавтам трудно различать слабые звезды на освещенной части орбиты. Даже после захода спутника в тень Земли требуется определенное время для привыкания глаз (адаптация) к различению и опознаванию слабых звезд. При нахождении спутника на солнечном свете в поле зрения телескопа могут попадать отделившиеся от корабля материальные частицы, которые при солнечном освещении могут выглядеть как яркие искры, блуждающие в окрестности корабля и стремящиеся спровоцировать аппаратуру на ошибочные действия. Кроме того, имеется опасность, заключающаяся в том, что в телескоп может попасть свет, созданный бликами от солнечного света на деталях и конструктивных элементах корабля и телескопа. И совсем не просто продумать все так, чтобы исключить возможность возникновения подобных бликов.

Для исключения всех перечисленных выше причин и выполнения основной задачи эксперимента «Орион-2» — спектрографирования слабых звезд до 10^m визуальной величины — существует одно радикальное средство: проведение работ с телескопом «Орион-2» в тени Земли.

Перейдем теперь к сути вопроса: каковы баллистические данные для успешного выполнения эксперимента «Орион-2» и как они обеспечивались?

I. Дата и время старта ракеты-носителя, осуществившего выведение корабля «Союз-13» (с обсерваторией «Орион-2» на

борт) на орбиту искусственного спутника Земли, выбирались с учетом удовлетворения ряда ограничений со стороны работы систем корабля и выполнения условий, благоприятных для проведения экспериментов:

а) в течение восьмисуточного полета должна быть обеспечена надежная ориентация перед включением двигательной установки при возвращении экипажа в заданный район территории СССР;

б) возвращение экипажа должно происходить в дневное время в районе приземления;

в) в течение полета продолжительность теневого участка на орбите должна быть по возможности максимальной, а значение угла Солнце — объект исследования — Луна не должно превышать 90° .

Наиболее благоприятным с точки зрения выполнения всех этих условий был диапазон дат пуска с 16 по 24 декабря 1973 г. Московское время старта этого диапазона 14 ч 55 мин. Допуск на время старта не должен был превышать ± 10 мин.

Пуск ракеты-носителя с кораблем «Союз-13» был произведен 18 декабря 1973 г. в 14 ч 55 мин московского времени.

В 15 ч 04 мин корабль «Союз-13» был выведен на орбиту искусственного спутника Земли со следующими параметрами:

драконический период $T_{др} = 88,86$ мин,

наклонение к экватору $i = 51,6^\circ$,

минимальная высота $H_{min} = 193,3$ км,

максимальная высота $H_{max} = 272,7$ км.

В соответствии с программой полета для увеличения времени существования на орбите на 5-м витке в 21 ч 50 мин московского времени с помощью двигательной установки был произведен маневр по подъему высоты орбиты. После выдачи разгонного импульса скорости величиной 12 м/с корабль был переведен на рабочую орбиту, имевшую следующие параметры:

драконический период $T_{др} = 89,25$ мин,

наклонение к экватору $i = 51,6^\circ$,

минимальная высота $H_{min} = 226,8$ км,

максимальная высота $H_{max} = 272,6$ км,

продолжительность тени $T_T = 36$ мин.

В течение всего полета баллистические центры по данным траекторных измерений определяли и уточняли параметры движения корабля.

Штатное возвращение экипажа на Землю было запланировано на 129-м витке. 26 декабря 1973 г. на 128-м витке в 11 ч 08 мин 41 с было проведено включение двигательной установки

на торможение. После обработки импульса скорости 95 м/с спускаемый аппарат с орбиты искусственного спутника Земли, имевшей параметры

драконический период $T_{\text{др}} = 88,94$ мин,
наклонение к экватору $i = 51,6^\circ$,
минимальная высота $H_{\text{min}} = 215,9$ км,
максимальная высота $H_{\text{max}} = 256,2$ км.

перешел на траекторию спуска и возвратился на Землю в заданный район.

II. Для обработки разворотов корабля и достижения заданной конечной пространственной ориентации необходимо и достаточно иметь следующие данные: курсовой угол (КУ), момент разарретирования гироскопов t , программные развороты.

Для большей наглядности сущности пространственных разворотов корабля введем систему координат $MXYZ$, жестко связанную с кораблем. Начало этой прямоугольной правой системы координат совместим с центром масс корабля, ось MX направим вдоль корабля в сторону его сопла, а ось MY — нормально к плоскости солнечных батарей (она всегда совпадает с направлением текущего геоцентрического радиуса-вектора).

Космический корабль обладает возможностью вращения вокруг двух осей: MY и MX . Первоначальный разворот корабля вокруг оси MY на заданный курсовой угол (КУ) космонавты выполняют самостоятельно по отслеживанию видимого перемещения наземных предметов. Эта операция выполняется на освещенной части орбиты до входа корабля в тень. Затем производится *разарретирование гироскопов*, другими словами, осуществляется *постановка корабля на гироскопы*, т. е. его стабилизация относительно неподвижных звезд. Выбор момента разарретирования гироскопов t определяет положение оси MY в плоскости орбиты. Затем осуществляются так называемые программные развороты (в автоматическом режиме) на углы α_x и α_y . При этом первый разворот (на угол α_x) производится вокруг оси MX корабля, а второй разворот (на угол α_y) — вокруг оси MY .

Выполнение указанных операций позволяет достичь следующую заданную конечную пространственную ориентацию космического корабля по входу в теневую часть орбиты: ось MZ корабля наведена на исследуемую область неба, т. е. на звезду гидрирования А, направление на звезду гидрирования В лежит в плоскости XMZ корабля и составляет с осями MZ и MX корабля острые углы.

III. Таким образом, космический корабль вошел в теневую

часть орбиты с определенной пространственной ориентацией, и космонавт может начать работу непосредственно с обсерваторией «Орион-2», для чего на борт выдаются баллистические данные астрономического характера.

Согласно принципу работы обсерватории «Орион-2» космонавт с помощью визира, установленного перед одним из иллюминаторов внутри космического корабля, производит поиск звезды А, совмещение ее с перекрестием визира, а затем выдачу команды с пульта управления обсерваторией на захват звезды А фотогидом. Все эти операции он может выполнить после того как звезда А будет в поле зрения обсерватории «Орион-2», т. е. космонавту необходимо знать время восхода звезды А.

Звездная платформа «Ориона-2» имеет трехосную стабилизацию, которая осуществляется с помощью двух звезд А и В, поэтому время начала фотографирования звезд телескопом следует считать временем начала одновременной видимости обеих звезд фотогидами А и В. Кроме того, космонавту надо знать время окончания работы на телескопе (момент захода одной из звезд А или В за горизонт), время входа и выхода из тени.

IV. Даже если в момент запуска космического корабля выполняется условие, что угол Солнце — объект исследования — Луна меньше 90° , то на восьмые сутки полета Луна будет находиться в теневой части орбиты. Для предотвращения засветки спектральных снимков «Ориона-2» Луной космонавтам выдавалась информация о времени восхода и захода Луны (конец и начало работы «Ориона-2» соответственно) на рабочих витках.

V. Как уже отмечалось, для осуществления трехосной стабилизации звездной платформы «Ориона-2» необходимо гидирование (слежение) фотогидами за двумя звездами А и В, расположенными друг относительно друга под углом 65° . Каждой звезде А соответствует несколько звезд В, и вот для того, чтобы выбрать оптимальный вариант звезды В для звезды А (максимум времени одновременной видимости обеих звезд фотогидами), были произведены баллистические расчеты для всех вариантов пар звезд А и В (время восхода и захода).

Все баллистические расчеты по перечисленным выше пунктам производились на ЭВМ за много месяцев до старта, что дало возможность провести составление программы наблюдений и ее резервных вариантов более детально. В период штатной работы эти данные корректировались с учетом реальных параметров орбиты.

3.2. Выбор опорных звезд астростабилизации

Стабилизация в пространстве внеатмосферного телескопа «Орион-2» осуществлялась по опорным звездам А и В, требования к которым, вообще-то говоря, неодинаковые, и поэтому должно быть учтено следующее.

1. С помощью А обеспечивается стабилизация приборной платформы по двум плоскостям (осям) — снимается покачивание, в то время как звездой В — только по одной плоскости (снимается вращение телескопа вокруг оптической оси, проходящей через звезду А).

2. Звезда А всегда находится в направлении главной оптической оси телескопа, а звезда В — в направлении, составляющем угол 65° с направлением звезды А. В силу этого при выборе звезды А мы должны руководствоваться также тем, чтобы область неба вокруг звезды А, фотографируемая телескопом, представляла астрофизический интерес.

Имея в виду эти и другие характеристики, выбор опорных звезд А и В для астростабилизации приборной платформы «Ориона-2» осуществлялся нами по следующей программе:

а) для определенного времени года работы «Ориона-2» на орбите (определенное положение Солнца относительно звезд) составлялся список всех звезд ярче $3-3^m,5$, находящихся в конусе антицентра Солнца с углом раскрытия 60° ;

б) из списка исключались все звезды, для которых фоновое излучение от звездного неба в пределах поля зрения фототидов превышало определенную заранее заданную величину. В частности, вторая по яркости звезда в поле зрения фототиды должна быть на 1^m , а равномерный фон на $0^m,5$ слабее основной звезды (звезды гидирования);

в) из списка выбирались звезды (звезды А) исходя из требования, чтобы в круге радиусом $2,5''$ вокруг этой звезды имелись объекты, ультрафиолетовые спектры которых представляли бы астрофизический интерес;

г) из списка выбирались звезды (звезды В), находящиеся в полосе между конусами с углами раскрытия 60° и 70° вокруг звезды А. Как правило, одной звезде А соответствовало несколько звезд В;

д) баллистические расчеты времени восхода и захода для всех пар звезд А и В в теневой части рабочего витка позволяли выбрать оптимальную пару звезд А и В с точки зрения удовлетворения условия максимальной (более 15 мин) одновременной видимости их в тени.

Как видим, эти условия достаточно жесткие и удовлетворить им не так просто. Правда, на практике одной звезды А соответствует, как правило, более одной звезды В, удовлетворяющей всем этим требованиям. В таких случаях окончательный выбор звезды В делается по результатам баллистических расчетов (текущих, во время штатной работы) наилучшего сочетания звезд А и В.

Приведем один пример. Для фотографирования области неба вокруг Капеллы (α Aur) в качестве первой опорной звезды А служила сама Капелла, а в качестве второй опорной звезды могла быть использована одна из четырех — α Lep (видимая величина $2^m,72$), β CMa ($1^m,95$), α CMa ($-1^m,45$) и γ Leo ($2^m,43$). В действительности в реальной работе на орбите была использована в качестве звезды В звезда Сириус — α CMa.

3.3. Бортовые звездные карты и журнал

Хотя космонавты и прослушали цикл лекций по астрономии, ознакомились с принципом работы научной аппаратуры и уп-

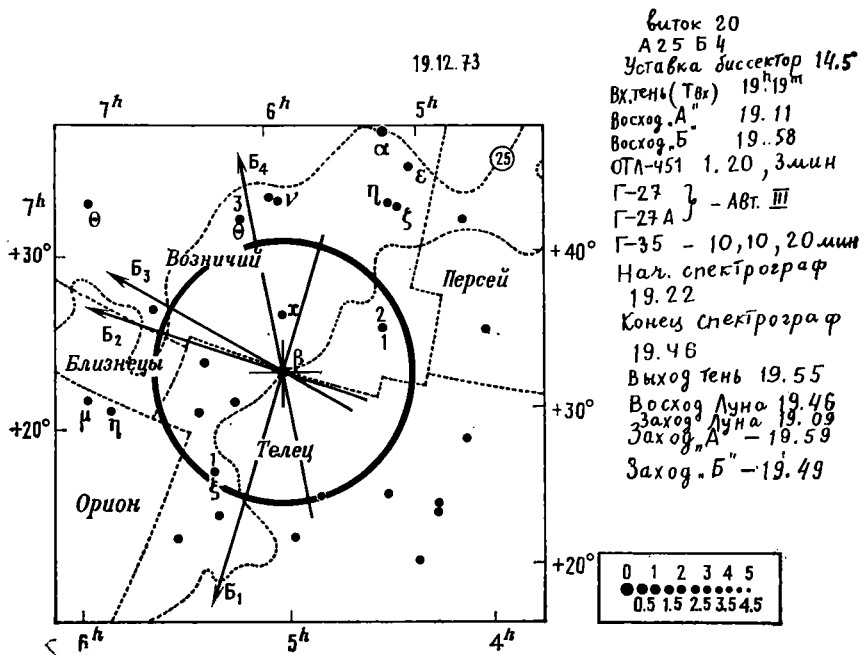


Рис. 3.1. Бортовая звездная карта «Ориона-2». Один из листов

равлением обсерваторией «Орион-2», прошли подготовку по опознаванию звезд в планетарии и под открытым небом, для успешной работы в космосе был создан бортжурнал «Орион-2».

В первой части — технической — дано краткое описание работы обсерватории, изложена последовательность операций по вводу в действие приборов, а также описаны действия космонавтов во время внештатных ситуаций.

Вторая часть — астрономическая — представляла собой звездные карты, на каждой из которых указан ее номер, обозначен кругом фотографируемый участок неба, отмечены направления на звезды В.

Космонавты при сеансе радиосвязи получали ряд данных (номер карты, баллистические расчеты, величины выдержек при фотографировании, номер звезды В), которые вместе со своими замечаниями записывали на листе звездной карты данного рабочего витка и привезли с собой на Землю. Все эти и другие данные использовались нами при обработке «орионовского» наблюдательного материала.

На рис. 3.1 приведена фотография одного листа из звездной карты с записями космонавта В. В. Лебедева.

3.4. Подготовка космонавтов

«Орион-2» — специализированный астрономический эксперимент, успех которого в большой степени зависел от того, насколько полно проведена подготовка космонавтов к его осуществлению.

В связи с этим за несколько месяцев до запуска корабля «Союз-13» была начата подготовка экипажа (командира корабля и бортинженера) к натурной работе с «Орионом-2». При этом, хотя обязанности членов экипажа при штатной работе на орбите отличаются, оба они прошли один и тот же курс подготовки по следующей программе:

1. Занятия по ознакомлению с устройством и принципом работы научной аппаратуры и управлению работой самой обсерватории.

2. Прослушивание цикла лекций по астрономии, информации о целях и задачах подготавливаемого эксперимента и об ожидаемых результатах.

3. Отработка элементов по управлению обсерваторией в условиях космического полета на специальном тренажере, имитирующем штатную работу обсерватории.

4. Изучение звездного неба в планетарии и полевых условиях (в Бюраканской астрофизической обсерватории АН Армянской ССР), а также распознавание отдельных звезд (опорных) в ограниченном поле зрения через визир «Ориона-2».

Завершающий этап подготовки космонавтов — выбор экипажа на основании сдачи космонавтами экзамена по полному курсу управления и работы с обсерваторией «Орион-2».

3.5. Наведение обсерватории «Орион-2» на опорные звезды слежения и астростабилизации

Эксперимент по получению спектральных снимков звезд с помощью менискового телескопа и объективной призмы начинается с выбора соответствующего звездного двухкоординатного датчика ДЗД-1 (или ДЗД-2) и однокоординатного ОЗД-1 (или ОЗД-2); это делается простым переключением с бортового пульта управления. Наличие системы взаимной блокировки предотвращает одновременное включение обоих датчиков.

Выбор датчика — ДЗД-1 или ДЗД-2 — перед началом работы оставляется на усмотрение оператора на борту. Далее, манипулируя визиром, оператор нацеливает приборную платформу на звезду А. После отработки сигнала рассогласования от визира, что означает: опорная звезда гидирования А появилась в поле зрения датчика ДЗД-1 (или ДЗД-2), снимается запрет с выхода двухкоординатного датчика, и оператор подключает его к следящей системе по каналам стабилизации X и Y . С этого момента начинается работа следящей системы в автоматическом режиме по двум осям.

После этого оператор приступает к наведению обсерватории «Орион-2» на звезду В с помощью датчика ОЗД-1 (или ОЗД-2) по команде, подаваемой через пульт управления. В режиме «поиск звезды В» начинается вращение телескопа со связкой датчиков вокруг оси Z , или, что то же самое, сканирование датчиком ОЗД звездного неба в поясе $8^\circ \times 20^\circ$. При появлении звезды В в поле зрения своего датчика поиск прекращается и выход датчика подключается к входу следящей системы по оси Z .

С «захватом» звезды В и слежением за ней начинается процесс трехосной стабилизации. В случае если звезда В не попала в поле зрения выбранного датчика, процесс сканирования, т. е. поиска звезды, прекращается и возобновляется уже на втором датчике после соответствующего переключения.

3.6. Функциональная программа «Ориона-2» на орбите

В основу схемы управления «Ориона-2» был заложен принцип оптимального распределения обязанностей между автоматикой и космонавтом, находящимся на борту корабля. Разработчики постарались максимально упростить работу космонавта, свести к минимуму количество выполняемых им операций и в то же время максимально упростить автоматику, освободив ее от выполнения функций, которые можно спокойно переложить на космонавта. Аппаратура была спроектирована таким образом, что для управления ею было достаточно одного космонавта, обычно это был бортинженер. Командир корабля в это время управлял кораблем и осуществлял контроль за работой его систем. Функциональная схема обсерватории «Орион-2» приведена на рис. 3.2. «Орион-2» на орбите должен был работать в режимах расконсервации обсерватории, звездного сеанса и шлюзования кассет.

Расконсервация обсерватории выполнялась после выведения космического корабля «Союз-13» на орбиту искусственного спутника Земли. При расконсервации производилось разарретирование осей монтировки блока телескопа, при этом команды на отстрел пирочек фиксаторов арретиров выдавались с пульта космонавта. После этого космонавт вручную разарретировал визир. На этом, собственно, и заканчивалась сама расконсервация обсерватории. Далее по программе шли тестовые проверки аппаратуры, при которых космонавт по командам с пульта включал те или иные режимы работы обсерватории, а также с помощью визира разворачивал блок телескопа в различные положения в режиме наведения по визиру.

Звездный сеанс работы обсерватории выполнялся только на теневой части орбиты, однако подготовка к нему начиналась задолго до входа в тень. Перед началом работы на борт передавалась радиограмма, содержащая необходимые данные для разворота корабля на исследуемую область, указывались опорные звезды А и В и номера звездных карт в бортовом журнале «Ориона-2», время начала и конца сеанса, обусловленное восходом или заходом опорных звезд, а также определялось время экспозиций для каждой звезды. Циклограмма работы во время звездного сеанса приведена на рис. 3.3.

До входа в тень экипаж ориентировал и стабилизировал космический корабль в инерциальной системе координат таким образом, чтобы опорные звезды А и В находились в поле зрения соответствующих звездных датчиков с учетом возможных раз-

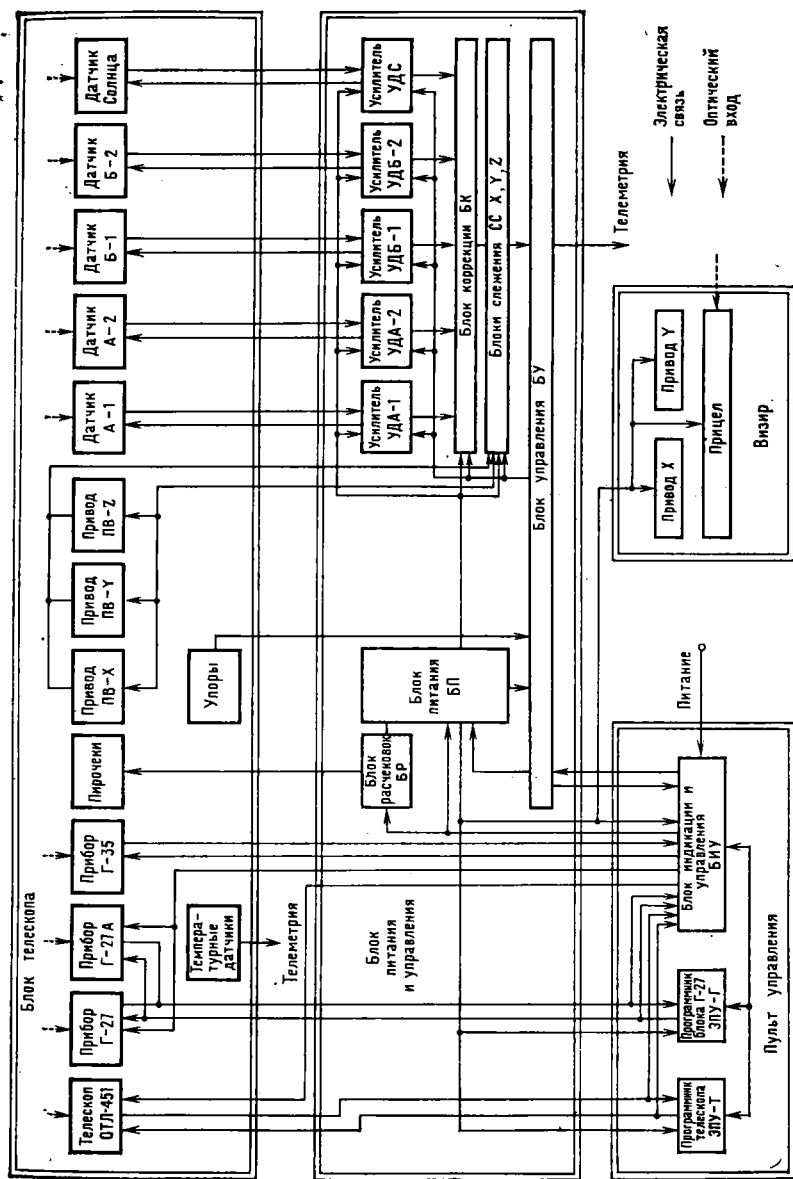


Рис. 3.2. Функциональная схема космической обсерватории «Орион-2»

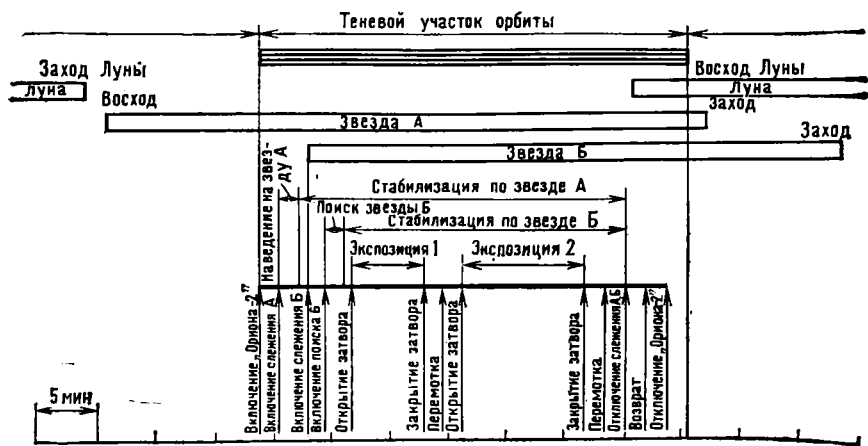


Рис. 3.3. Циклограмма работы «Ориона-2» на орбите

воротов блока телескопа и визира. После входа в тень и восхода опорной звезды А бортинженер опознавал звезду, открывал створки купола, наводил на нее прицел визира и включал слежение по звезде А (при этом выбор датчика ДЗД-1 или ДЗД-2, так же как и датчика ОЗД-1 или ОЗД-2, производился космонавтом еще до входа корабля в тень). Далее автоматика управления обсерваторией включала режим наведения блока телескопа по положению визира с помощью синхронно-следающей системы. После окончания наведения включался звездный датчик, происходила автоматическая установка чувствительности звездного датчика, что необходимо было для получения нужной крутизны управляющего сигнала, и только после этого полностью включался контур управления и стабилизации по обеим осям. Прохождение процесса космонавт наблюдал по состоянию специальных индикаторов на пульте управления и мог при необходимости вмешаться в процесс, например при отсутствии сигнала захвата звезды вновь дополнительно навести визир и повторно включить систему слежения.

При появлении на пульте управления сигнала о реализации стабилизации по звезде А оператор включает систему слежения по звезде В (но не раньше времени восхода опорной звезды В). Если нет сигнала захвата звезды, космонавт включает систему поиска звезды В. Поиск выполняется разворотом телескопа относительно продольной оси, т. е. относительно направления на

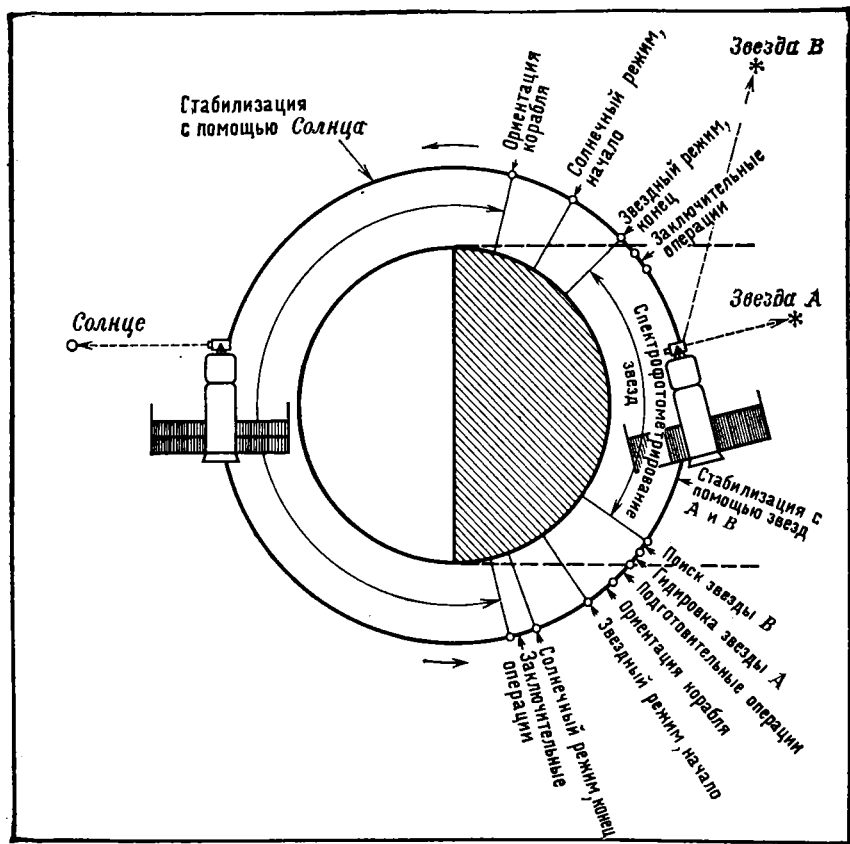


Рис. 3.4. Схема, иллюстрирующая отдельные этапы функционирования обсерватории «Орион-2»

звезду А. При попадании звезды в поле зрения датчика В поиск автоматически прерывается, происходит автоматическая калибровка чувствительности звездного датчика и включается контур управления и стабилизации по третьей оси.

Затем бортинженер после появления сигнала о получении стабилизации по звезде В (при нормальной стабилизации по звезде А) приступает непосредственно к спектрографированию. Управление работой научных приборов может производиться как вручную (при этом космонавт управляет положением

затвора и перемоткой пленки с пульта управления, а время экспозиции определяет по секундомеру), так и автоматически — от специальных программных устройств, встроенных в пульт управления.

После окончания программы экспозиций, к моменту окончания сеанса (указано в радиограмме) космонавт отключает звездные датчики, приводит блок телескопа в исходное положение, включая команду «Возврат», закрывает створки купола, а командир корабля отключает системы стабилизации корабля.

Шлюзование кассет проводилось по окончании программы научных работ обсерватории. При подготовке к шлюзованию бортинженер производил перемотку пленки в приборах обсерватории, затем переводил с помощью визира блок телескопа в положение, наиболее удобное для попадания кассеты в шлюзовую камеру и после этого производил отстрел пирочек фиксации кассеты. После попадания кассеты в шлюз проводилась операция шлюзование кассеты, при которой вначале проверялась герметичность шлюза, и только после этого кассета переносилась во внутренний объем корабля, где укладывалась в специальный укладочный контейнер.

На рис. 3.4 схематически показаны отдельные этапы функционирования обсерватории «Орион-2» при выполнении программы, в частности, и спектральных наблюдений звезд.

3.7. Программа полета

Для успешного выполнения задач любого космического полета необходимо правильно спланировать его программу.

Целью планирования полета является оптимальное распределение по времени проведения необходимых полетных операций, выполнение которых обеспечивает наибольшую эффективность работы экипажа и бортовых систем при максимально возможной безопасности.

Программа полета увязывает в единое целое работу экипажа, бортовых систем космического корабля, а также всех наземных средств управления. При планировании полета специалистам, ответственным за этот участок работы, приходится решать массу «компромиссных» задач по увязке зачастую противоречивых требований. Например, ученые требуют проведения наибольшего количества научных экспериментов, а количество топлива (рабочего тела) для их проведения далеко не бесконечно, или есть возможность использовать экономичный руч-

ной режим ориентации, но это приводит к перегрузкам экипажа.

В результате проведения сложных расчетов, проработки большого количества технических документов, обсуждений и споров со многими специалистами рождается сбалансированная во всех отношениях программа полета. При этом в программе учитывается не только так называемая штатная работа.

С самого начала советских пилотируемых космических полетов огромное внимание уделяется вопросу безопасности экипажа, поэтому отрабатываются различные нештатные ситуации, которые могут возникнуть из-за отказов в бортовых системах космического корабля. Что поделаешь, техника есть техника, и тем, кто отвечает за разработку программы полета, приходится предусматривать запасные варианты даже на самые невероятные ситуации полета. И это понятно, так как во время полета некогда раздумывать, надо своевременно принимать правильные решения и без задержки их реализовывать. Ошибка может стоить жизни космонавтов.

При разработке программы полета космического корабля «Союз-13», целью которого было проведение астрофизических экспериментов с телескопом обсерватории «Орион-2», длительность полета — 8 суток — была определена исходя из оптимальных условий для проведения всех необходимых научных и технических экспериментов, а также операций по проверке бортовых систем, маневрированию на орбите, подготовке и осуществлению спуска на Землю. С целью обеспечения максимальной безопасности экипажа в случае нештатных ситуаций были предусмотрены также резервные сутки полета для повторения (в случае необходимости) всего цикла операций по подготовке и проведению спуска.

Управление полетом корабля «Союз-13» осуществлялось из Центра управления полетом через станции слежения, расположенные на территории СССР, и плавучий измерительный комплекс АН СССР «Космонавт Юрий Гагарин» в акватории Атлантического океана у о. Сейбл. Между Центром управления полетом и станциями слежения была установлена устойчивая связь с использованием каналов связи различной информативности, включая спутниковую. Схема контура управления полетом приведена на рис. 3.5.

В связи с тем, что основной целью полета «Союза-13» являлась работа с орбитальной астрономической обсерваторией «Орион-2», главное внимание при планировании полета было уделено именно этому эксперименту. Алгоритм проведения стан-

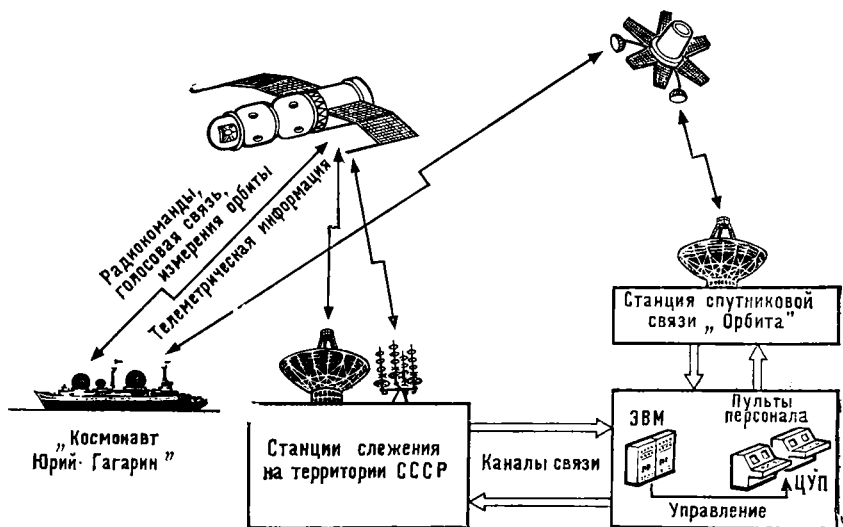


Рис. 3.5. Схема контура управления полетом «Союз-13» с «Орионом-2» на борту

дартного эксперимента с использованием «Ориона-2» строился в той последовательности, которая указана на рис. 3.6. При этом время стабилизации корабля в инерциальной системе координат могло быть выбрано так, что в процессе одного эксперимента с «Орионом-2» обеспечивалась возможность проведения

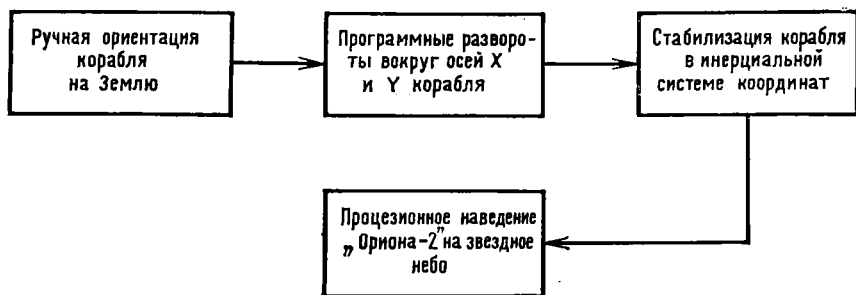


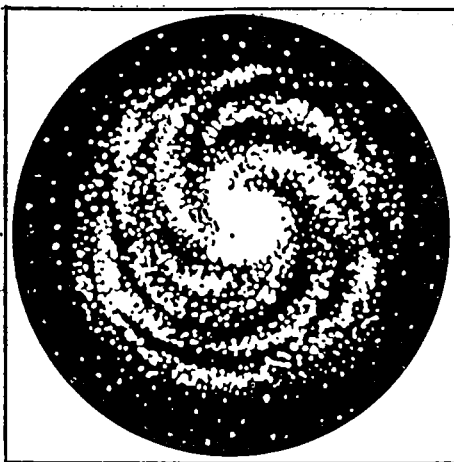
Рис. 3.6. Алгоритм проведения эксперимента с использованием «Ориона-2»

одного или двух циклов наблюдений на теневой и одного цикла наблюдений на освещенной частях орбиты.

Кроме работы с обсерваторией «Орион-2» в процессе полета планировалось проведение ряда небольших технических, геофизических и медико-биологических экспериментов, кинофотосъемок и телевизионных репортажей.

В целом эксперимент, осуществленный по весьма насыщенной программе полета космического корабля «Союз-13», завершился большим успехом: наука обогатилась большим объемом научной, технической и медико-биологической информации.

2 Часть



НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА «ОРИОН-2»

Открытие новой интересной звезды в астрономии — событие номер один. А когда в каталоге Вселенной справляют новоселье сразу тысячи представителей далеких миров, это уже становится научной сенсацией. Только в одной области неба, вокруг яркой звезды Капелла, на пленках "Ориона-2" удалось зарегистрировать еще свыше двух тысяч слабых звезд, не входящих в существующие каталоги. Среди них оказались объекты с совершенно необычной спектральной структурой. Были открыты звезды со сверхмощной хромосферой. Открыта новая категория небесных объектов — околозвездные облака вокруг горячих звезд. Впервые удалось получить в ультрафиолетовом диапазоне длин волн спектрограмму интереснейшего объекта планетарной туманности.

Эксперимент с помощью системы "Орион-2" дал возможность получить спектры многих тысяч звезд в ультрафиолетовой части спектра. Уже предварительный анализ снимков показал, что они дадут науке богатейшую информацию о далеких мирах.

ИЗЛУЧЕНИЕ ГОРЯЧИХ ЗВЕЗД

4.1. Спектральные снимки, полученные «Орионом-2»

Основная задача астрофизических наблюдений обсерватории «Орион-2», установленной на космическом корабле «Союз-13», заключалась в получении ультрафиолетовых спектральных снимков звезд в диапазоне длин волн 2000—3800 Å с помощью широкопольного менискового телескопа и объективной призмы.

В период программной работы «Ориона-2» на орбите были получены коротковолновые спектральные снимки большого количества звезд до тринадцатой звездной величины, впервые была получена ультрафиолетовая спектрограмма планетарной туманности, обнаружены сверхмощные хромосферы у некоторых звезд поздних классов, обнаружены звезды со странными характеристиками, а также звезды с сильной, не предсказанной теорией, депрессией в ультрафиолете в определенных областях непрерывного спектра, установлено существование большого разброса в макроструктуре непрерывных спектров в ультрафиолете среди звезд одного и того же подкласса, выделена непонятная группировка горячих звезд низкой светимости, выявлены интересные, ранее неизвестные закономерности в поведении ионизованного дублета магния 2800 Mg II в звездных спектрах, открыт новый класс звезд с аномальным содержанием магния в их фотосферах и т. д.

Программа работы «Ориона-2» на орбите предусматривала фотографирование через объективную призму 16-ти областей неба с разными экспозициями; перечень этих областей приведен в табл. 4.1, где под «центральной» понимается звезда, которая, являясь основной опорной звездой (из двух) системы астротаблизации и ориентации, одновременно находится в центре поля зрения телескопа. Качество полученных для указанных областей снимков (кадров) оказалось неодинаковым, неодинаковой была также предельная звездная величина — от $7^m,5$ до 13^m — в зависимости от качества снимка и величины экспозиции.

Наиболее удачными оказались три кадра, полученные 22 декабря 1973 года для области неба вокруг Капеллы (α Aur) с экспозициями 15 с (кадр F19), 1,5 мин (F20) и 18,4 мин (F21). Именно для этой области неба была достигнута предельная для «Ориона-2» звездная величина (13^m), обработано наибольшее

Таблица 4.1

**Программа наблюдений космической обсерватории «Орион-2»
(декабрь 1973 г.)**

Дата (декабрь 1973 г.)	Центральная звезда	Экспозиция, мин	Дата (декабрь 1973 г.)	Центральная звезда	Экспозиция, мин
19	β Tau 1 ^m ,67	1; 12; 1	22	ζ Tau 3,0	1,4; 16; 1,3
19	ζ Tau 3,0	1; 11,5; 0,3	22	η Aur 3,2	1,2; 20; 3
20	ε Ori 1,7	2; 18; 5,5; 0,1	22	α Per 1,8	1; 20; 5
20	δ Gem 3,5	3; 16	23	β CMa 2,0	4; 5; 10; 2,3
20	β Aur 1,9	15,5	23	α CMa—1,45	1,3; 1,8; 5; 10; 0,05; 2
21	ϵ Ori 2,8	19,5; 4	24	α Cas 2,2	1,0; 15; 3,5; 1
21	γ Cas 2,4	1; 16; 2,5	24	λ Ori 2,1	1,0; 2; 5; 10; 6; 1
22	α Aur 0,06	0,25; 1,5; 18,4	24	λ Vel 2,3	1,0; 1; 2; 5; 5

количество ультрафиолетовых спектрограмм и получено наибольшее количество интересных данных. На рис. 4.1 воспроизведена репродукция одного из снимков области неба вокруг Капеллы — кадр F21.

Число звезд, для которых были получены «орионовские» ультрафиолетовые спектрограммы для области Капеллы и которые к тому же могут представить интерес для дальнейшего изучения, — порядка двух тысяч. Лишь небольшая часть из этого количества звезд оказалась зафиксированной в существующих звездных каталогах (HD или SAO). Поэтому остальные звезды получили нумерацию ГЛКА (Гарнийская лаборатория космической астрономии), которой и были отмечены на 20 картах отождествления (примерно по одному квадратному градусу каждая), опубликованных в выпуске № 48 Сообщений Бюраканской обсерватории (1976 г.). Там же приведены таблицы оценок спектральных классов и U -, B -, V -величин для подавляющего количества этих звезд.

С помощью «Ориона-2» было сделано немало интересных открытий, был установлен ряд важных закономерностей, касающихся поведения звезд в ультрафиолете, собран достаточно однородный по своему качеству материал наблюдений, который можно использовать также для статистических целей; обо всем этом пойдет разговор в последующих разделах книги. Вместе с тем «Орион-2» поставил перед нами новые проблемы, разрешение которых требует как подготовки и осуществления новых

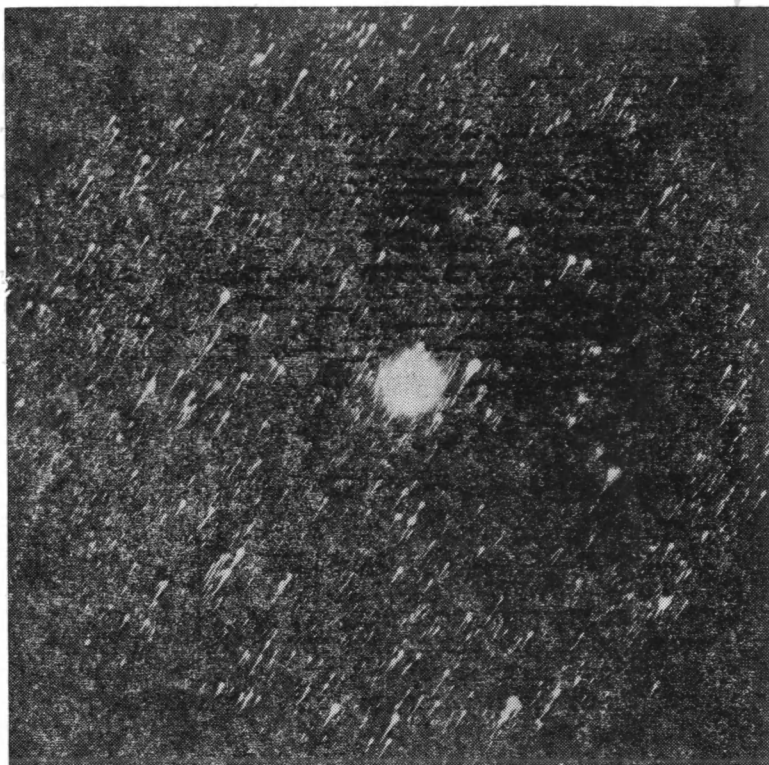


Рис. 4.1. Звездное поле вокруг Капеллы (звезда в центре), сфотографированное в ультрафиолетовых лучах (экспозиция 18 мин) на высоте 250 км над поверхностью Земли с помощью менискового телескопа и объективной призмы космической обсерватории «Орион-2» (на космическом корабле «Союз-13»). Коротковолновая граница спектрограмм отдельных звезд простирается до 2000 Å. Горячие звезды выделяются своими длинными ультрафиолетовыми «хвостами». Диаметр поля зрения — 5°

внеатмосферных экспериментов, так и проведения тщательных и комплексных наблюдений над наиболее интересными «орионовскими» звездами в наземных условиях с привлечением крупных телескопов и высокодисперсионных спектрографов.

Говоря о качестве «орионовского» наблюдательного материала, следует иметь в виду также следующее: оптические параметры менискового телескопа «Ориона-2», в частности зависимость пропускания телескопа от длины волны, таковы, что

относительно легко регистрируются ультрафиолетовые спектры горячих звезд — до 2000 Å — и плохо, или почти не фиксируются ультрафиолетовые концы звезд промежуточных и, в особенности, поздних классов — для них коротковолновая граница спектров в лучшем случае кончается на 2500 Å. Возникает поэтому невольная селекция: основная масса наблюдательного материала, пригодная для измерений, относится к горячим звездам. Это замечание, однако, не относится к случаю, когда речь идет об измерении дублета 2800 Mg II. Здесь ситуация как раз обратная: из-за слабости этого дублета в спектрах горячих звезд его отождествление и измерение связаны с немалыми трудностями и ошибки велики, между тем у звезд промежуточных и поздних классов (F—G—K) этот дублет очень силен, поэтому он отождествляется сразу и измерения его намного точнее.

4.2. Ультрафиолетовые спектры горячих звезд

Приступая к обработке и измерениям спектральных снимков, полученных с помощью «Ориона-2», мы первым делом решили проверить, в какой степени истинное излучение звезд в ультрафиолетовом диапазоне соответствует вычисленному на основе современных теорий строения звездных атмосфер. При этом мы начали с горячих звезд, имея в виду, что как раз для высокотемпературных звезд теория достигла наибольших успехов (рис. 4.2).

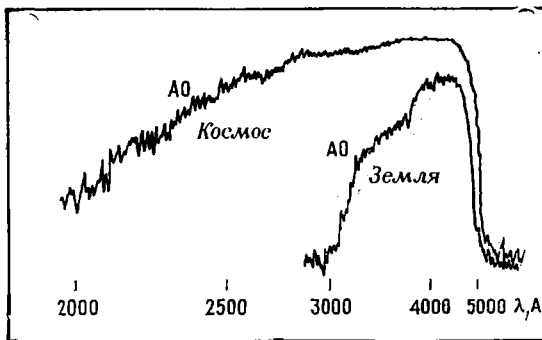
Горячие звезды, для которых получены «орионовские» спектрограммы, относительно слабые и поэтому находятся сравнительно далеко от нас. В таких условиях найденные из непосредственных измерений распределения энергии в непрерывных спектрах звезд в ультрафиолете подлежат исправлению с учетом влияния межзвездного селективного поглощения. В нашем случае это осуществляется применением одного из двух методов в зависимости от того, что известно для данной звезды — излишек цвета $E(B-V)$ или расстояние r .

В первом случае — назовем его «методом $E(B-V)$ » — истинная величина интенсивности на данной длине волны λ непрерывного спектра $\Delta m_{\lambda}^{\circ}$, выраженная в звездных величинах определяется из следующего соотношения:

$$\Delta m_{\lambda}^{\circ} = \Delta m_{\lambda} + (X_{\lambda} - X_{\lambda_0}) E(B-V), \quad (a)$$

где Δm_{λ} есть наблюдаемая интенсивность, так же выраженная в звездных величинах и на той же длине волны; очевидно при

Рис. 4.2. Микрофотометрическая запись спектров звезд класса A0, полученных с помощью «Ориона-2» на Земле и в космосе. Коротковолновая граница спектра определяется в первом случае прозрачностью земной атмосферы (до 3200 Å), во втором случае — пропусканием кварцевой оптики менискового телескопа (до 2000 Å)



этом Δm_λ будет представлена по отношению к потоку излучения F_{λ_0} на некоей условной длине волны λ_0 :

$$\Delta m_\lambda = -2,5 \lg \frac{F_\lambda}{F_{\lambda_0}}.$$

В приведенных соотношениях $X_\lambda = E(\lambda - V)/E(B - V)$, причем усредненные числовые значения этой безразмерной величины ($\bar{X}_\lambda$) были найдены многими исследователями по данным разных внеатмосферных экспериментов (Nandy и др.). Что касается λ_0 , то ее чаще всего мы принимали равной $\lambda_0 = 3200$ Å, иногда $\lambda_0 = 3000$ Å.

Во втором случае — «метод расстояний» — исправленные интенсивности Δm°_λ определяются следующим образом:

$$\Delta m^\circ_\lambda = \Delta m_\lambda - (a_\lambda - a_{\lambda_0})r, \quad (6)$$

где a_λ — величина межзвездного селективного поглощения на 1 килопарсек; усредненные численные значения этого поглощения, выраженные в звездных величинах, также известны, чаще всего для направлений отдельных звезд в Галактике.

Разумеется, в каждом отдельном случае мы отдаем предпочтение «методу $E(B - V)$ », если для рассматриваемой звезды известна наблюдаемая величина $E(B - V)$. И лишь в случае отсутствия этих данных мы прибегаем ко второму способу — «методу r ».

Описанным способом были введены поправки с учетом влияния межзвездного селективного поглощения и в конечном итоге были найдены истинные распределения энергии в ультрафиоле-

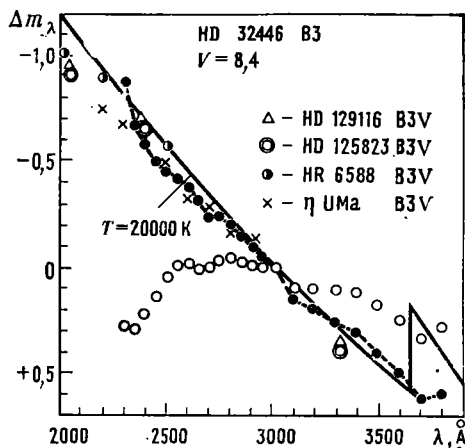


Рис. 4.3. Распределение энергии в спектре звезды HD 32446 класса B3, по данным «Ориона-2», наблюдаемое (кружки) и исправленное с учетом влияния межзвездного поглощения (точки). Для сравнения нанесены также результаты наблюдений четырех звезд класса B3 V.

товой области спектров около 500 горячих звезд, в основном спектральных классов В — А, из всех областей неба, сфотографированных «Орионом-2» (см. табл. 4.1). При этом полученные кривые рас-

пределения энергии в непрерывных спектрах этих звезд охватывают область длин волн от 3800 до 2500—2400 Å, а в некоторых случаях до 2000 Å. Ниже будет приведен ряд примеров из этой серии измерений.

Начнем с рис. 4.3, где приведено найденное из «орионовских» спектрограмм наблюдаемое распределение энергии (кружки) в спектре звезды HD 32446 класса B3. Там же сплошной линией нанесена теоретическая кривая, рассчитанная для модели звездной фотосферы при эффективной температуре $T = 20\,000$ К и $\lg g = 4$, что соответствует спектральному классу B3 (наблюдения и теоретическая кривая нормированы на $\lambda_0 = 3000$ Å). Как мы видим, наблюдения очень сильно расходятся с теоретической моделью.

Но звезда HD 32446 испытывает очень сильное межзвездное поглощение; для нее $E(B-V) = 0,38$. И когда мы внесли поправку с учетом влияния межзвездного поглощения, в соответствии с соотношением (а), то найденное в результате истинное распределение энергии в спектре этой звезды (точки) оказалось в очень хорошем согласии с теоретической кривой (Mihalas). Согласие получалось и в случае, когда поправку с учетом влияния межзвездного поглощения мы вносили «методом r », при расстоянии этой звезды $r = 1000$ пк.

На рис. 4.3 нанесены также данные, полученные с помощью других внеатмосферных наблюдений, проведенных американскими астрофизиками над четырьмя звездами класса B3V (Bottemiller, Sudbury, Stecher). В отличие от HD 32446 все эти че-

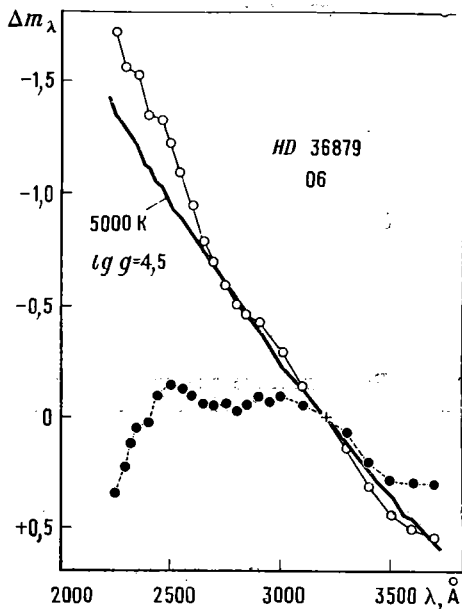
Рис. 4.4. Распределение энергии в спектре HD 36879, звезды класса O6, по данным «Ориона-2». Сплошная линия — теоретическая модель при $T=50000$ K и $\lg g=4,5$ (Kugacz)

четыре звезды очень яркие — от 3^m до 5^m и, стало быть, непокрашенные, поэтому полученные для них величины наблюдаемых потоков излучения, следует полагать, не нуждаются в исправлении с учетом влияния межзвездного поглощения — они являются истинными потоками. Судя по тому, что найденные для этих четырех звезд наблюдаемые потоки в ультрафиолете оказались в хорошем согласии как с теоретической моделью,

так и с «орионовским» распределением для звезды HD 32446, сделанное предположение не далеко от истины.

Аналогичный результат был получен и в случае более горячих звезд. Так, на рис. 4.4, приведено наблюдаемое распределение (точки) энергии в спектре HD 36879 звезды класса O6 ($V=7^m,6$) из области вокруг ξ Тау: оно оказалось сильно смещенным от теоретической кривой, соответствующей $T=50\,000$ K и $\lg g=4,5$. Однако после внесения поправки с учетом влияния межзвездного поглощения (методом $E(B-V)$) истинное распределение (кружки) оказалось в общем-то в хорошем согласии с теорией, если не иметь в виду некоторый излишек энергии излучения в области длин волн короче 2600 Å; если этот излишек не обусловлен ошибками измерения и реален, то его происхождение в какой-то мере можно объяснить слиянием слабых эмиссионных линий в ультрафиолете аналогично тому, как это, вероятно, имеет место в случае звезд типа Be.

На рис. 4.5 приведены кривые распределения энергии в ультрафиолете спектров двух звезд типов B5 и B2,5 из областей неба вокруг ξ Рип и γ Ори (см. табл. 4.1). Кривые построены по результатам измерений шести спектрограмм для каждой из этих



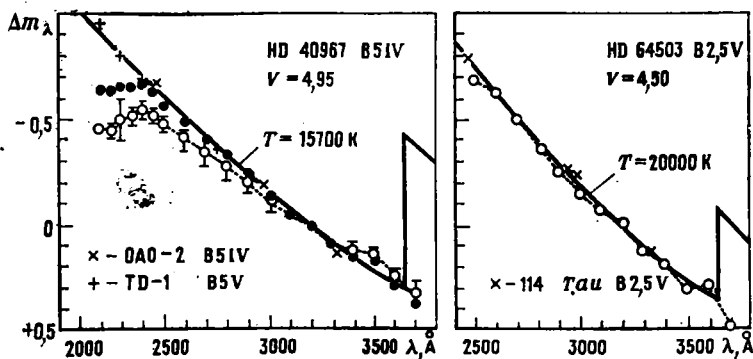


Рис. 4.5. Распределение энергии в ультрафиолете спектров двух звезд классов B5 и B2,5 из областей неба вокруг ζ Pup и κ Ori, по данным «Ориона-2»

звезд, что позволило оценить ошибки измерений «орионовского» наблюдательного материала — они отмечены на кривых вертикальными черточками (HD 40967).

В рассмотренных выше примерах все звезды принадлежат ранним спектральным классам O6 — B5. Наблюдаемые распределения энергии (исправленные с учетом влияния межзвездного поглощения) в их спектрах вплоть до 2000 Å оказались в полном согласии с теоретически предвычисленными моделями звездных фотосфер, в которых учтено только непрерывное поглощение водородом и гелием. Кроме того, обращает на себя внимание более или менее плавный ход этих кривых, без заметных депрессий или провалов. Поэтому можно сделать вывод, что по крайней мере в отношении звезд классов O6 — B5 сопоставление непрерывных спектров в ближнем ультрафиолете (2000—3000 Å) может быть осуществлено с теми теоретическими моделями, для которых поглощение в спектральных линиях не было учтено. Это относится, в частности, к теоретическим моделям Михаласа.

Совершенно иная картина у звезд несколько поздних классов — позднее B5. В качестве примера на рис. 4.6 приведены наблюдаемые и истинные распределения энергии в ультрафиолете четырех звезд классов B8 — B9, по данным «Ориона-2». Прежде всего у всех этих звезд наблюдаемые потоки (кружки) оказались расположенными значительно ниже теоретических кривых для модели фотосферы с $T=12\,600$ K и $\lg g=4$, соответствующими как раз классам B8 — B9. Однако и в этом слу-

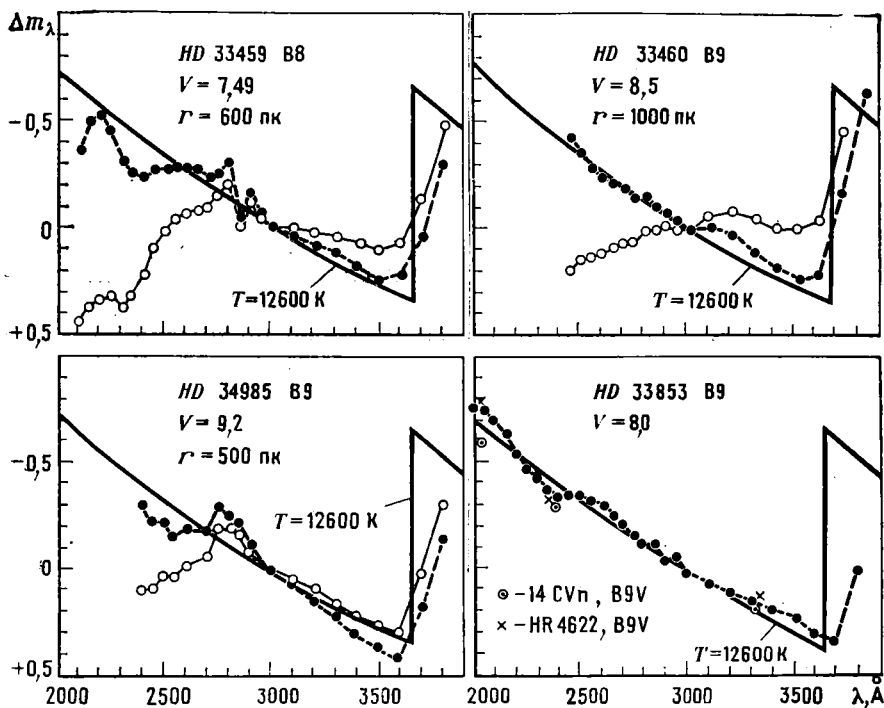


Рис. 4.6. Зависимость наблюдаемых (кружки) и исправленных с учетом эффекта межзвездного поглощения (точки) потоков излучения Δm_λ от длины волны λ для четырех звезд класса В, по данным «Ориона-2». Сплошные кривые — теоретическая зависимость Δm_λ от λ , соответствующая $T_{\text{eff}} = 12600$ К

чае исправленные по «методу r » распределения (точки) хорошо ложатся на теоретические кривые. Вместе с тем между этими звездами заметно некоторое различие в самом ходе исправленных кривых: слабый провал примерно на 2400—2500 Å в случае двух из этих звезд — HD 33 459 и HD 34 985 и полное его отсутствие в случае остальных двух — HD 33 460 и HD 33 853, хотя все четыре звезды принадлежат одному и тому же подклассу B8—B9.

Коль скоро речь зашла о звездах ранних классов, то следует заметить, что в некоторых случаях сопоставление «орлионовских» измерений с теоретическими моделями позволяет уточнить спек-

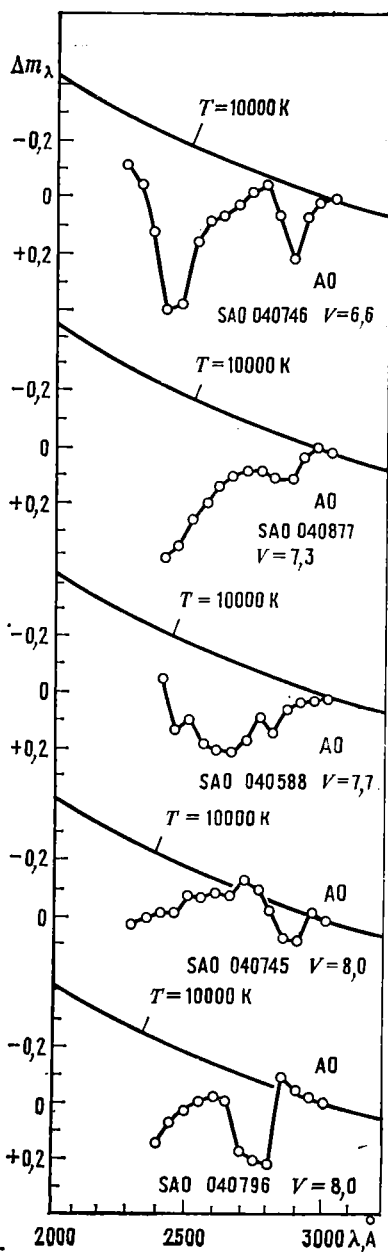


Рис. 4.7. Последовательность непрерывных спектров в ультрафиолете в спектрах пяти звезд класса A0 почти одного и того же блеска, по данным «Ориона-2», иллюстрирующая факт существования различия в макроструктуре ультрафиолетовых спектров этого класса звезд. Теоретическая модель Михаласа при $T=10000$ К (сплошная линия) здесь приведена сугубо условно

ральные классы (эффективные температуры) или же найти расстояние для той или иной звезды. Примеры подобного рода «утилизации» материалов «Ориона-2» будут приведены в последующих разделах настоящей книги [17, 20].

4.3. Непрерывные спектры звезд класса A в ультрафиолете

Отмеченное в предыдущем разделе различие в ультрафиолетовых спектрах звезд классов B8—B9 проявляется еще резче, когда мы переходим к звездам класса A. В этом можно убедиться, обратившись к рис. 4.7, на котором приведены наблюдаемые распределения энергии в спектрах четырех звезд класса A2, по данным «Ориона-2»; все они находятся в области неба вокруг β Aur (см. табл. 4.1). Теоретические кривые, представленные на этих рисунках, соответствуют модели при $T=10000$ К. Как видим, расхождение наблюдений с теорией у звезд класса A2 значительно больше, чем в случае классов B8—B9. Стало быть, теоретические модели, построенные без учета поглощения в спектральных линиях, не годятся для звезд

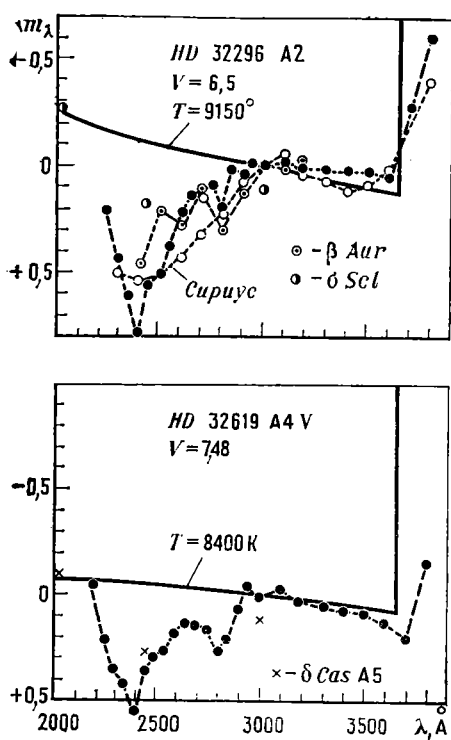


Рис. 4.8 Распределение энергии в спектре звезд HD 32296 (A2) и HD 32619 (A4 V), по данным «Ориона-2» (точки). Для сравнения приведены также результаты наблюдений ОАО-2 для звезд σ Scl (A2 V), δ Cas (A5 V), β Aur (A2 V) и Сириуса (A1 IV)

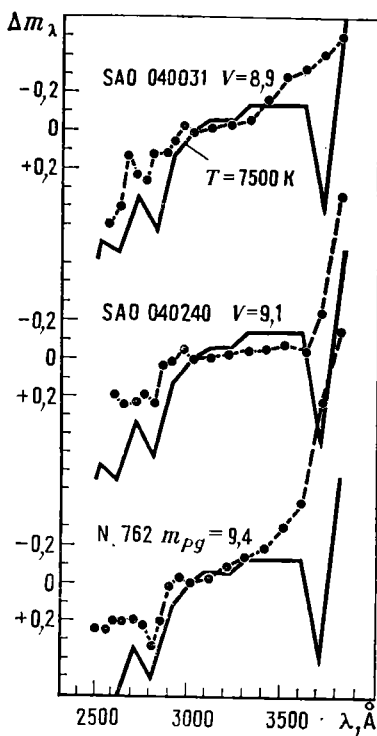


Рис. 4.9. Распределение энергии в спектре трех звезд неизвестного спектрального класса (предположительно A7), по данным «Ориона-2» (точки). Сплошная линия — теоретическая кривая «бланкетинг»-модели при $T=7500$ K

класса A. В этом можно убедиться еще раз, просмотрев рис. 4.8, где приведены «орионовские» распределения энергии в ультрафиолете двух звезд классов A2 и A4. Обе эти звезды достаточно яркие ($V \sim 7$) и, кроме того, для одной из них $E(B-V) = 0$ (HD 32619). Иначе говоря, у нас есть основание принять наблюдаемые распределения энергии в ультрафиолете этих

звезд за истинные, без внесения каких бы то ни было поправок с учетом влияния межзвездного поглощения. Если так, то о хорошем согласовании наблюдений с теорией без учета линий поглощения (такие модели называются «небланкетинг») можно говорить для области спектра 3000—3800 Å при соответствующих значениях эффективных температур. Что касается области короче 3000 Å, то здесь расхождение между наблюдениями и небланкетинг-моделью значительное — оно достигает максимального значения на $\lambda \sim 2400$ Å. Имея в виду, что «орионовские» результаты для указанных двух звезд классов A2 — A4 оказались в хорошем согласии с результатами ОАО-2 для четырех звезд почти тех же классов — β Aur, σ Scl, δ Cas и Сириуса (α CMi), — следует заключить, что мощный и протяженный провал (депрессия) с центром примерно на 2400 Å является характерной особенностью непрерывных спектров в ультрафиолете звезд класса А.

Подробно на макроструктуре непрерывных спектров в ультрафиолете мы остановимся в последующих разделах. Здесь же мы ограничимся замечанием, что всякие провалы или депрессии в непрерывных спектрах непокрасневших, т. е. близлежащих звезд обусловлены блендированием самого непрерывного излучения большим количеством линий поглощения, принадлежащих нейтральным и однажды ионизованным металлам, причем таких линий поглощения как раз много в фотосферных спектрах звезд класса А. Стало быть, учет влияния линий поглощения при построении теоретических моделей этого класса звезд необходим. Такие «бланкетинг»-модели для звезд класса А также были построены (Fouler), и они оказались в хорошем согласии с наблюдениями, в частности с ультрафиолетовым спектром Сириуса.

К сожалению, среди «орионовского» материала отсутствуют ультрафиолетовые спектральные снимки для звезд подклассов A5 — A9. Однако среди большого количества спектральных снимков для звезд, неклассифицированных в существующих каталогах, имеются и такие, которые по всей вероятности принадлежат звездам класса A7 — A8. На рис. 4.9 приведен пример трех звезд, подозреваемых в принадлежности к подклассу A7 — A8 по «орионовским» спектрам (точки) наряду с теоретической «бланкетинг»-моделью для них при $T=7500$ К (Kondo, Smidt).

Обращает на себя внимание сходство обеих кривых во всех трех случаях, в особенности в области депрессии непрерывного спектра [1].

4.4. Ультрафиолетовые спектры звезд неизвестных типов

Первый контакт с «Орионовским» наблюдательным материалом начался с идентификации той или иной спектрограммы с той или иной звездой с использованием при этом соответствующих каталогов звезд (HD, SAO, BD и т. д.), в которых наряду с координатами звезд приведены также некоторые параметры, характеризующие физические условия в их фотосферах, а также межзвездной среды на пути от нас до звезды: спектральный класс, U -, B - и V величины, эффективные температуры, показатели цвета $B-V$ и $U-B$, излишек цвета $E(B-V)$, расстояние и т. д.

Так вот, оказалось, что, например, в области Капеллы только для 20 % звезд, для которых были получены «орионовские» спектральные снимки, известны спектральные классы, еще меньший процент составляют звезды с известными показателями цвета.

Тогда, используя то обстоятельство, что существующие теоретические модели достаточно хорошо описывают, как в этом мы убедились в предыдущих разделах, наблюдаемые распределения энергии в спектрах горячих звезд, можно попытаться идентифицировать звезды неизвестных спектральных классов, т. е. осуществить спектральную классификацию исключительно путем сравнения найденного из наблюдений распределения энергии в ультрафиолете непрерывного спектра с теоретическими моделями. При этом в качестве «нулевого» приближения или «зацепки» к тому, что рассматриваемая неизвестная звезда принадлежит раннему классу, была использована классификация, осуществленная по длине «орионовских» спектрограмм (см. разд. 10.1) и, частично, по критериям классификации Абастуманской обсерватории. Приведем несколько примеров, иллюстрирующих процесс нахождения некоторых физических параметров звезды описанным путем — на основе изучения их «орионовских» непрерывных спектров в ультрафиолете.

На рис. 4.10 приведены наблюдаемые (кружки) и исправленные (точки) распределения энергии в области 3800—2450 Å. полученные в результате обработки двух спектрограмм (F20 и F21) для звезды под номером ГЛКА 1518. Найденные из прямых измерений величины Δm_λ в зависимости от λ указывают на принадлежность этой звезды к классу ранее A0. На это указывают также наблюдаемые величины показателей цвета: $B-V = +0,04$, $U-B = -0,40$. Относительная слабость звезды ($V = 9^m,5$) говорит о неизбежности искажения ее спектра вследст-

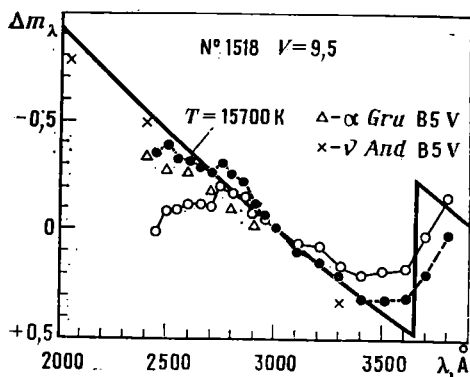


Рис. 4.10. Распределение энергии в спектре звезды ГЛКА 1518 неизвестного спектрального класса, по данным «Ориона-2»:

кружки — данные наблюдений, точки — данные, исправленные с учетом эффекта межзвездного поглощения, сплошная линия — теоретическая модель при $T=15700$ К. Нанесены также данные наблюдений для звезд α Gru и ν And — обе спектрального класса B5 V

вие межзвездного поглощения. Это предположение подтверждается структурой спектра в области $\lambda < 3000$ Å (дефицит излучения).

Применяя метод последовательного приближения (расчет эффекта межзвездного поглощения по «методу r » для различных расстояний), мы приходим к выводу, что наиболее вероятный класс этой звезды B5V и вероятное расстояние 600 пк. В этом случае получается хорошее согласие исправленных Δm_λ с теорией при $T=15700$ К. Принимая спектральный класс звезды B5V, найдем для нее излишек цвета $E(B-V)=0,22$, а затем, «методом $E(B-V)$ », внесем поправки с учетом эффекта межзвездного поглощения, который хорошо согласовался с поправками «методом r ». Последний результат говорит о том, что действительно спектральный класс этой звезды оценен правильно и соответствует B5V.

На рис. 4.11 приведены наблюдаемые и исправленные с учетом эффекта межзвездного поглощения относительные кривые распределения энергии в спектре еще четырех горячих звезд неизвестных классов (SAO 040221, 040164, ГЛКА 1480 и ГЛКА 825). Для измерений были использованы спектрограммы с двух кадров, F20 и F21. Наблюдаемые величины Δm_λ указывают на принадлежность этих звезд к классу ранее B8; на это указывают также их показатели цвета ($B-V < 0$, $U-B < -0,24$). Обращает на себя внимание общность структуры спектров всех четырех звезд в области короче 3000 Å (дефицит энергии излучения, растущий в сторону коротких длин волн). Такая структура в этой области спектра вообще-то характерна для удаленных звезд, подвергнувшихся эффекту межзвездного

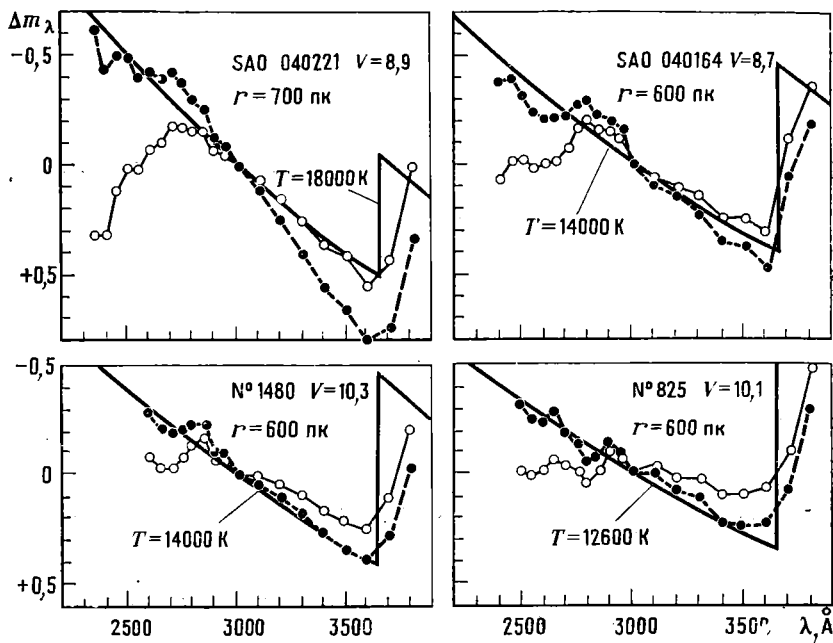


Рис. 4.11. Сравнение наблюдаемых (кружки) и исправленных с учетом эффекта межзвездного поглощения (точки) потоков излучения Δm_λ для четырех звезд неизвестного класса (вероятно, В) с теоретической моделью, соответствующей разным эффективным температурам

поглощения. Опираясь методом последовательного приближения, можно найти тот спектральный класс звезды и то расстояние, при которых согласие с наблюдениями будет наилучшее. Таким путем были найдены следующие оценки для спектрального класса и расстояния этих четырех звезд:

SAO 040221	B3	$r = 1000$ пк
SAO 040164	B7	$r = 600$ пк
ГЛКА 1480	B7	$r = 600$ пк
ГЛКА 825	B8	$r = 600$ пк

При визуальном осмотре спектральных снимков неба вокруг Капеллы было обнаружено около 30 «ультрафиолетовых» звезд, непрерывный спектр которых простирается довольно да-

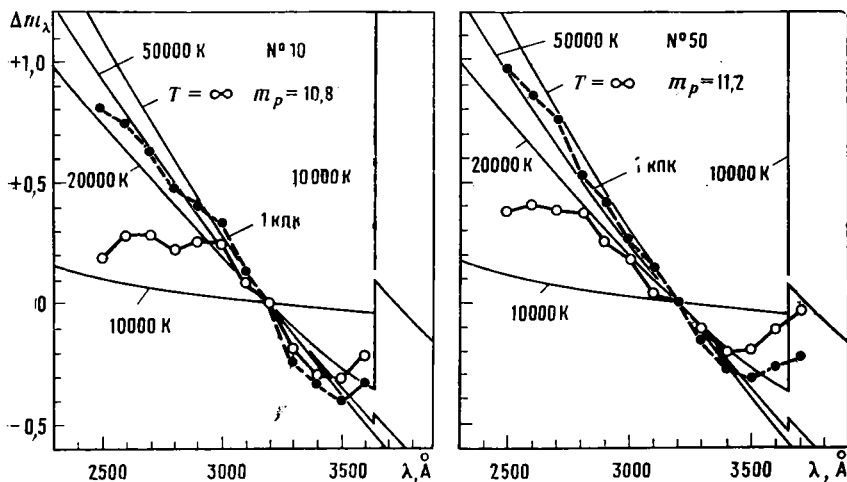


Рис. 4.12. Распределение энергии в спектре звезд № 10 и 50 в области длин волн 3800—2500 Å:

кружки — данные наблюдений, точки — данные исправленные с учетом эффекта межзвездного поглощения. Кривые — теоретическое распределение непрерывного спектра при температурах $T=10000$ и 20000 К. Кривая $T=\infty$ соответствует планковскому распределению при бесконечной температуре

леко в ультрафиолете (см. разд. 4.6). Ниже приводятся результаты измерений двух из этих звезд — ГЛКА 10 и ГЛКА 50.

На рис. 4.12 даны наблюдаемые распределения энергии в спектрах этих двух звезд. Даже без учета влияния межзвездного поглощения эти распределения соответствуют теоретической кривой для модели с эффективной температурой значительно выше 10000 К и ближе к 20000 К. Что обе эти звезды высокотемпературные, в этом не приходится сомневаться — на это указывают также их показатели цвета: $U-B$ равно, например, $-0,45$ и $-0,43$ для ГЛКА 10 и ГЛКА 50 соответственно, что характерно для звезд класса В2 ($T \approx 20000$ К). В то же время у них достаточно большие для этого спектрального класса значения $B-V = +0,1$ для обеих звезд, что в свою очередь указывает на сильное межзвездное поглощение. Вводя соответствующую поправку «методом r », мы пришли к заключению, что эффективная температура этой звезды должна быть порядка 50000 К при $r=1000$ пк — в этом случае теоретическая кривая совпадает с исправленным распределением энергии в спектрах этих звезд. Даже если принятая величина расстояния не верна,

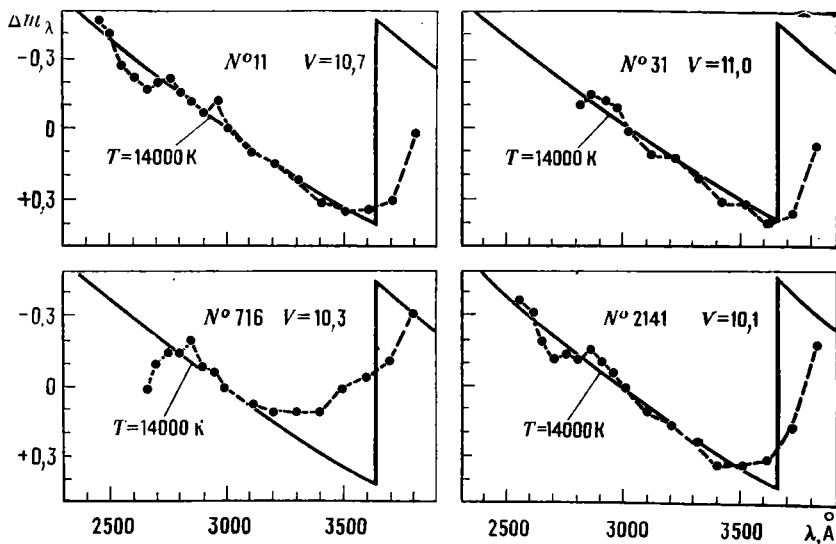


Рис. 4.13. Распределение энергии в спектре звезд ГЛКА 11, 31, 716 и 2141, по данным «Ориона-2». Кривые — теоретическое распределение при $T = 14000$ K

все равно можно настаивать на том, что рассматриваемые звезды очень горячие — для них должно быть $T > 20000$ K, а это температура звезд ранних классов В.

На рис. 4.13 приведены наблюдаемые кривые распределения энергии излучения еще для четырех «ультрафиолетовых» звезд из области неба вокруг Капеллы. Наблюдаемые распределения в ультрафиолетовых спектрах этих звезд соответствуют эффективной температуре 14000 K и более даже без учета межзвездного поглощения, которое должно быть ощутимым, имея в виду относительную слабость звезд $V < 10$.

Исходя из крайнего предположения, что эти звезды находятся недалеко от нас, и стало быть, не подвержены влиянию межзвездного поглощения, можно оценить их абсолютные светимости; они оказались порядка $M \geq 2,6$. В то же время, судя по «орионовским» ультрафиолетовым спектрам, для этих звезд $T > 14000$ K. Отсюда приходится сделать вывод: рассматриваемые звезды суть объекты низкой светимости.

Таким образом, независимо от удаленности «ультрафиолетовых» звезд можно утверждать, что в направлении Капеллы «Орион-2» была зафиксирована группировка горячих звезд

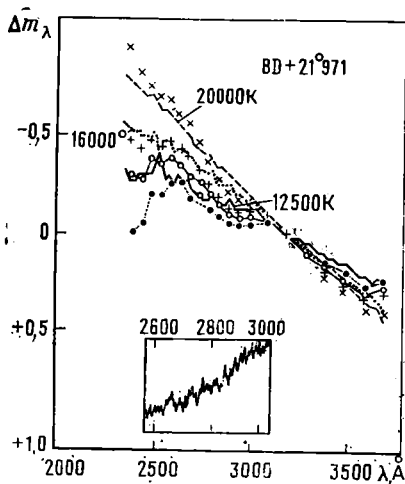


Рис. 4.14. Наблюдаемое (точки) и исправленное (кружки для $r=650$ пк, крестики для $r=1000$ пк, наклонные крестики для $r=2000$ пк) распределение энергии в ультрафиолетовом спектре звезды BD+21°971. Приведены также три теоретические модели для $T=12500$, 16000 и 20000 К и фрагмент микрофотометрической записи ее спектрограммы в районе длин волн 2800 Å

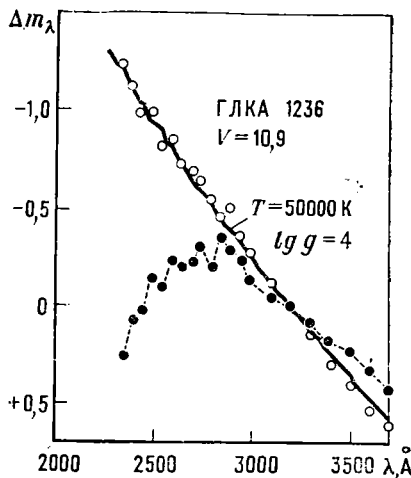


Рис. 4.15. Распределение энергии в спектре звезды ГЛКА 1236, по данным «Ориона-2»:

точки — данные наблюдений, кружки — данные, исправленные с учетом влияния межзвездного поглощения, сплошная линия — теоретическая модель при $T=50000$ К и $\lg g=4$

низкой светимости. Согласовать такие низкие абсолютные светимости одновременно с их высокими температурами среди известных нам категорий объектов не так просто. Исключение могут составить объекты Хьюмасона — Цвикки (Humason — Zwicky), бывшие ядра планетарных туманностей и горячие субкарлики. Но если опираться на существующую статистику, то, например, объектов Хьюмасона — Цвикки в рассматриваемой области должно быть не больше двух.

Таким образом, природа рассмотренных «ультрафиолетовых» звезд не совсем ясна. Здесь нужны дополнительные данные.

Среди звезд в Тельце оказалась одна, которую не удалось отождествить ни в каталоге SAO, ни в HD. Только в AGK₂ приведен номер этой звезды по BD-каталогу (BD+21°971), ее

координаты и фотографическая величина $m_{pg}=9,6$. Найденное из «орионовских» наблюдений распределение энергии в ультрафиолете этой звезды приведено на рис. 4.14. Уже наблюдаемое распределение указывает на принадлежность этой звезды классу не позднее A0. В то же время отсутствие депрессии на 2800 Å, характерной для звезд класса A0, недостаточная сила линии 2800 MgII в спектре этой звезды (см. запись в прямоугольнике на рис. 1.14) навели на мысль о возможной ее принадлежности более раннему спектральному классу, а стало быть, на ее большую удаленность от нас. Если допустить, что звезда эта принадлежит спектральному классу B8, то ее расстояние оценится в 650 пк, а распределение энергии в спектре будет соответствовать кружкам рис. 4.14. В случае типа B5 расстояние увеличится до 1000 пк и распределение энергии в ее спектре будет таким, как это показано крестиками на том же рисунке. Если же допустить, наконец, что звезда эта удалена от нас на расстояние 2000 пк и ее спектральный класс есть B3 — B2, распределение энергии в ее спектре будет соответствовать теоретической модели при $T=20000$ К (наклонные крестики). Согласно критериям Абастуманской классификации, эта звезда оказалась принадлежащей спектральному классу B2V.

Спектр звезды ГЛКА 1236 ($V=10^m,92$ не удалось установить точно. Согласно нашей классификации по Абастуманским критериям она либо O5, либо B0e. Дело в том, что в ее ультрафиолетовом спектре как будто заметны очень слабые линии поглощения, наводящие на мысль о том, что, возможно, вокруг этой звезды имеется тонкая оболочка, эмиссионные линии которой могли бы заливать линии поглощения. Это предположение становится вероятным благодаря тому, что в наземном спектре этой звезды, полученном на пластинке IIIa-F, видна линия H_α в эмиссии.

Наблюдаемое распределение энергии в ультрафиолетовом спектре этой звезды приведено на рис. 4.15. В предположении, что $M_v \approx 0$ она оказывается от нас на расстоянии 1400 пк. Исправленное с учетом поглощения на такое расстояние распределение энергии оказалось в хорошем согласии с теоретической кривой при $T=50000$ К.

Здесь мы привели лишь отдельные примеры сопоставления наблюдаемых спектров горячих звезд с теоретическими моделями. В действительности подобный анализ был проведен в отношении нескольких сотен горячих звезд, ультрафиолетовые спектральные снимки которых были получены с помощью «Ориона-2» [8, 18, 22].

4.5. Макроструктура спектров горячих звезд в ультрафиолете

Представляет определенный интерес отдельное рассмотрение на основе данных «Ориона-2» макроструктуры ультрафиолетовых спектров горячих звезд, в частности звезд класса В, рассеянных в разных областях неба. При этом мы имеем в виду те выводы, которые могут быть сделаны в результате сопоставления «орионовских» кривых распределения энергии в ультрафиолете этих звезд с новейшими, более основательно разработанными теоретическими моделями звездных фотосфер, в которых учтено влияние 1760 000 линий поглощения различных атомов и ионов (Kurucz).

Исходным материалом для нас являются приведенные на рис. 4.16—4.19 «орионовские» распределения энергии в ультрафиолете спектров для группы из 16 звезд класса В. Здесь по-прежнему потоки излучения F_λ представлены в относительных величинах Δm_λ , поток на $\lambda_0 = 3200 \text{ \AA}$ принят за единицу [$\Delta m_\lambda = -2,5 \lg F_\lambda / F_{\lambda_0}$]. Остановимся на каждом из этих рисунков в отдельности.

На рис. 4.16 представлено распределение энергии в спектре звезды HD 7252 спектрального класса B1V ($V = 7^m, 1$) из области вокруг γ Cas (см. табл. 4.1). Этот случай — пример очень большого межзвездного поглощения. После исправления с учетом эффекта межзвездного поглощения наблюдаемое распределение хорошо следует теоретической кривой.

Звезда HD 36166 ($V = 5^m, 78$), как и две последующие HD 36741 ($V = 6^m, 59$) и HD 36013 ($V = 6^m, 90$), наблюдалась также с помощью европейского спутника TD-1A в области 2000—2540 $\text{\AA}$; эти данные, наряду с теоретической моделью в каждом отдельном случае, сопоставляются с «орионовскими» распределениями в спектрах этих звезд.

Все эти три звезды, принадлежащие области ϵ Ori, являются членами молодой звездной ассоциации Орион OB1. В области 2000—3700 $\text{\AA}$ распределение энергии в спектре HD 36741 неплохо согласуется с моделью при $T = 25000 \text{ K}$. Правда, эта эффективная температура оказалась несколько завышенной для класса B2, однако такое поведение характерно и для других звезд в Орионе, особенно при переходе к более поздним подклассам В. Резкий же спад в распределении энергии звезды HD 36013 вблизи бальмеровского скачка (3600—3700 $\text{\AA}$), по-видимому, можно объяснить наличием оболочки вокруг этой звезды.

Очень интересен случай звезды 114 Tau = HD 35708 ($V =$

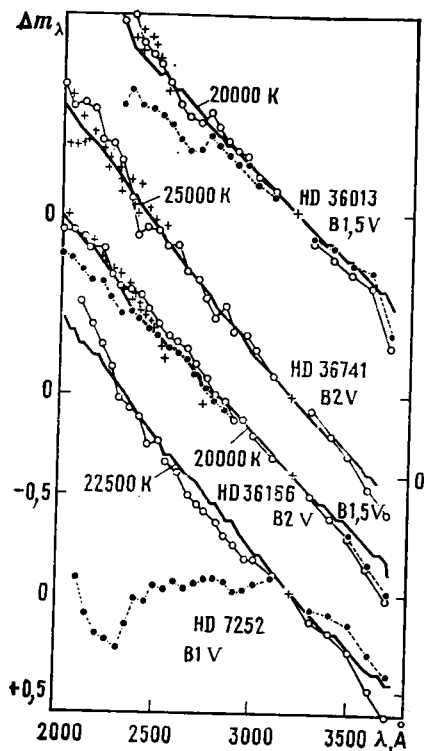


Рис. 4.16. Наблюдаемое (точки) и исправленное (кружки) распределение энергии в ультрафиолете звезд HD 7252, 36166, 36741, 36013, по данным «Ориона-2»:

сплошные линии — соответствующие теоретические модели, крестики — данные TD-1A

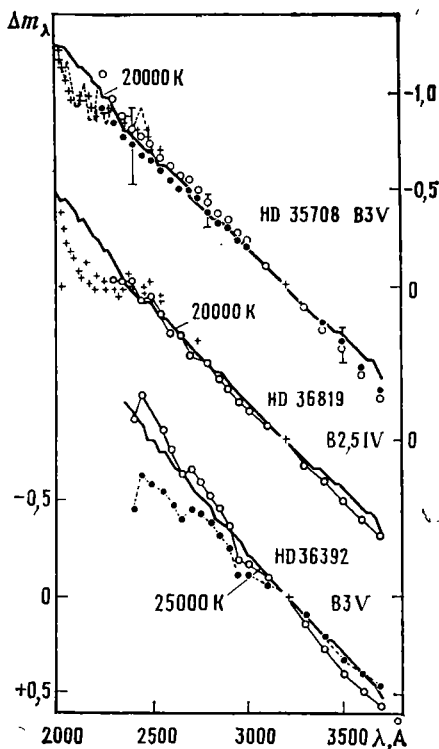


Рис. 4.17. Наблюдаемое (точки) и исправленное (кружки) распределение энергии в ультрафиолете звезд HD 35708, 36819 и 36392, по данным «Ориона-2». Указаны среднеквадратичные ошибки измерений на 2400, 2800 и 3500 Å в спектре HD 35708. Крестики соответствуют данным TD-1A, а пунктирная линия в случае HD 35708 — данным Скайлаба

$=4^m,86$). Для нее была измерена 21 «орионовская» спектрограмма. Полученное распределение приведено на рисунке с указанием среднеквадратичных ошибок вертикальными черточками на 2400, 2800 и 3500 Å. Исправленная кривая (кружки)

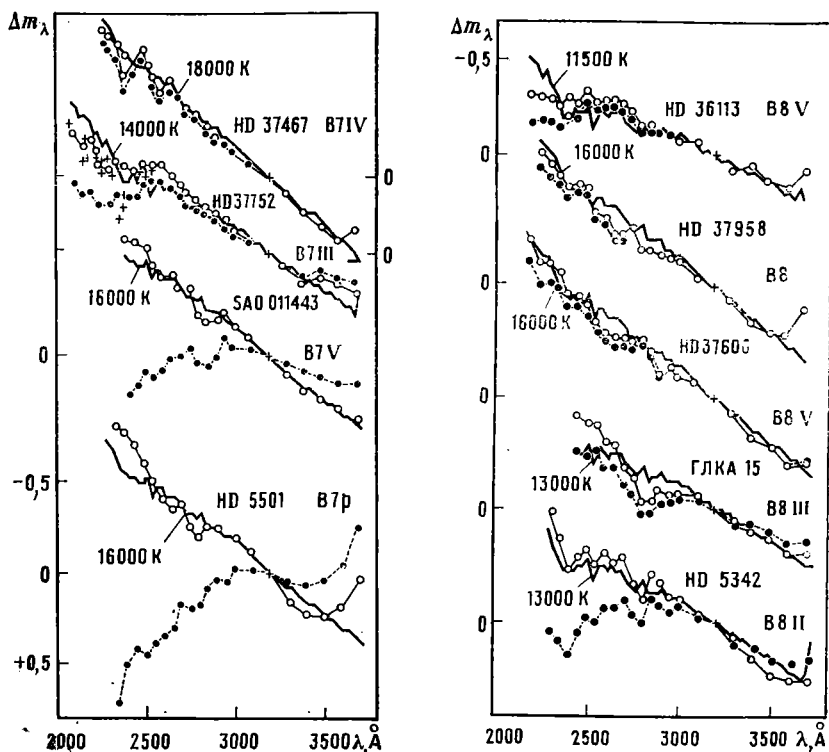


Рис. 4.18. Наблюдаемое (точки) и исправленное (кружки) распределение энергии в ультрафиолете звезд HD 37467, 37752, 5501 и SAO 011443, по данным «Ориона-2»:

сплошные линии — теоретические модели, крестики в случае звезды HD 37752 — данные TD-1A

Рис. 4.19. Наблюдаемое (точки) и исправленное (кружки) распределение энергии в ультрафиолетовых спектрах звезд класса B8 HD 36113, 37958, 37606, 5342 и ГЛКА 15, по данным «Ориона-2»

сравнивалась с данными наблюдений ОАО-2 для этой же звезды, а также с теоретической моделью при $T=20000$ К. Это сравнение было использовано в частности для определения средней редуccionной кривой, единой для всех спектральных снимков «Ориона-2» (см. рис. 2.23). Этот случай оказался интерес-

ным еще и потому, что для рассмотренной звезды имеются наблюдательные данные TD-1A (крестики), а также орбитальной лаборатории Скайлэб (пунктир). Все эти данные, наряду с моделью, приведены на рис. 4.17.

Звезда 121 Тау (HD 36819, $V=5^m,36$) наблюдалась и «Орионом-2» и TD-1A. На рис. 4.17 приведено найденное нами распределение энергии в спектре этой звезды в диапазоне длин волн 2300—3700 Å наряду с данными TD-1A. И поскольку точность TD-1A очень хорошая, то ощущаемое расхождение наблюдений с теорией в области 2000—2300 Å можно считать, по-видимому, реальным.

На рис. 4.17 представлено наблюдаемое распределение энергии и в спектре звезды HD 36392 ($V=7^m,54$) из области вокруг ϵ Ori.

Распределение энергии в спектре звезды HD 37467 класса B7 ($V=7^m,90$), входящей в состав звездной ассоциации Орион OB1, приведено на рис. 4.18.

Следующая звезда, HD 37752 ($V=6^m,50$) спектрального класса B7 III наблюдалась как «Орионом-2», так и TD-1A (см. рис. 4.18, кружки). Хочется обратить внимание на одну особенность спектра этой звезды, а именно, в районе 2400 Å по данным TD-1A видна сравнительно узкая, но довольно сильная депрессия в непрерывном спектре, в то время как по данным «Ориона-2» имеющаяся депрессия шире и менее глубока. В целом же наблюдаемое распределение по данным обоих экспериментов хорошо согласуется с теоретической моделью при $T=14\,000$ К и $\lg g=3$ (см. рис. 4.18), что соответствует спектральному классу B7 III, хотя для этой звезды указывается также класс B8p.

Здесь показаны также распределения энергии в спектрах двух звезд из области γ Cas: SAO 011443 ($V=9^m,63$) и HD 5501 ($V=8^m,74$). Обе эти звезды, как видим, являются сильно покрасневшими.

На рис. 4.19 представлены распределения энергии в спектрах пяти звезд спектрального класса B8: HD 36113 ($V=6^m,90$) из области вокруг Тельца, двух звезд HD 37958 ($V=6^m,67$) и HD 37606 ($V=6^m,90$) — вокруг ϵ Ori, ГЛКА 15 ($V=10^m,48$) — вокруг α Aug, согласно нашей классификации являющейся гигантом, и HD 5342 ($V=8^m,01$) — вокруг γ Cas.

Приведенные рисунки позволяют сделать следующий вывод: в целом общая структура наблюдаемых спектров горячих звезд класса В хорошо согласуется с теоретическими моделями звездных атмосфер, рассчитанными при соблюдении локального тер-

модинамического равновесия для эффективных температур и ускорения силы тяжести, соответствующих спектральному классу и классу светимостей рассмотренных звезд до $10^m,5$ [22].

4.6. Группировка «ультрафиолетовых» звезд в «Возничем». Звездная ассоциация нового типа?

При просмотре спектральных снимков «Ориона-2» была обнаружена недалеко от Капеллы группа сначала из 16, а немногим позднее из более чем двадцати так называемых «ультрафиолетовых» звезд от $9^m,5$ до $11^m,3$, рассеянных на участке неба площадью менее одного квадратного градуса. Под «ультрафиолетовыми» здесь подразумеваются звезды, обладающие довольно сильным непрерывным спектром в области длин волн по крайней мере до 2500 Å. Координаты среднего положения этой группировки: $\alpha = 05^h 10^m$; $\delta = +44^\circ 30'$ (1950 г.). Номера этих звезд и их фотовизуальные величины следующие (по каталогу ГЛКА):

ГЛКА	V	Спектральный класс	ГЛКА	V	Спектральный класс
50	$11^m,22$		61	$10^m,78$	
51	10,60		62	10,04	Am
52	10,09		63	9,57	B9 V
53	9,42	B4 IV	64	9,48	Am
54	9,94	B8 V	65	10,39	B9,5 V
55	10,06	Am	1511	10,50	
56	9,73	B8,5 V	1518	9,51	
57	10,44	B5 V	1533 (?)	12,84	
58	11,15		1665	10,72	
59	10,53		1670	11,29	
60	11,10		1700	9,05	

Спектральные классы этих звезд в основном неизвестны. Неизвестны также их расстояния. Однако общий вид их спектров свидетельствует о том, что они похожи друг на друга. Имеются веские аргументы в пользу того, что эффективные температуры этих звезд выше 10000 К и даже выше 20000 К, и, стало быть, все они суть звезды ранних спектральных классов. Это предположение подтверждается приведенным на рис. 4.12 графиком наблюдаемого распределения энергии в коротковолновом спектре одного из членов этой группировки — звезды ГЛКА 50 ($V = 11^m,16$). Как видим, наблюдаемое распределение соот-

ветствует эффективной температуре намного выше 10000 К и находится ближе к теоретической кривой при 20000 К. В действительности же эта температура должна быть еще выше, так как здесь не был учтен эффект межзвездного поглощения.

Таким образом, звезды эти высокотемпературные. Вместе с тем они, по всей вероятности, не представляют собой типичные горячие гиганты с абсолютной светимостью -3^m или -4^m , так как в этом случае расстояния до них будут измеряться 5–10 кпк, но это маловероятно, если иметь в виду, что указанная группировка звезд находится в направлении антицентра Галактики ($l \sim 173^\circ$, $b \sim +7^\circ$). Создается впечатление, что абсолютная светимость этих звезд больше нуля, т. е. положительна.

По существу загадка здесь не одна, а две. Первая заключается в том, что эти звезды высокотемпературные и одновременно низкой светимости. Вторая состоит в том, что сама группировка — не то скопление, не то ассоциация.

Нам не известны горячие звезды с такой низкой светимостью. Указанные звезды не имеют также отношения к объектам Хьюмаса — Цвикки — высокогалактическим горячим звездам ранних классов. Поэтому природа рассматриваемой группировки представляется неясной. Если это звездная ассоциация нового типа, а именно ассоциация из горячих звезд низкой светимости (ассоциация субкарликов?), то это предположение требует серьезного обоснования.

Перечисленных фактов, по-видимому, достаточно для того, чтобы рассмотренная группировка звезд привлекла к себе внимание. Ясно, что вопрос этот нуждается в специальном рассмотрении, в частности с привлечением средств наземной астрономии.

Вскоре после публикации нами первого сообщения в 1974 г. в журнале *The Observatory* об этой группировке горячих звезд в Возничем американские астрофизики (Heiser, Uckotter, Uckotter) из обсерватории Дейер (Daye) предприняли специальные высокоточные электрофотометрические измерения 16 звезд из этой группы (от ГЛКА 50 по ГЛКА 65), в частности в широко применяемой в астрофизике колориметрической системе *UBV*. В результате они нашли показатели цвета этих звезд, которые и были ими использованы для построения разного рода корреляционных диаграмм. Одна из них, график зависимости $U-B$ от $B-V$, показана на рис. 4.20. Как мы видим, почти все звезды оказались выше главной последовательности, т. е. имеют значительный избыток излучения в ультрафиолетовой области (в данном случае в U -лучах). Авторы не пытаются оценить по

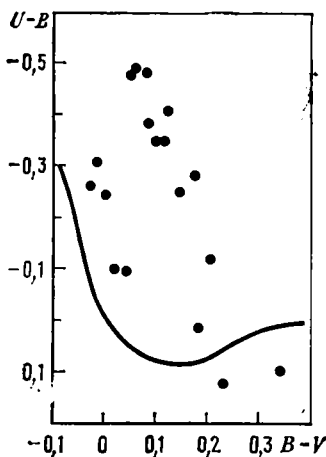


Рис. 4.20. Графическая зависимость показателя цвета $U-B$ от $B-V$ (в звездных величинах) для «ультрафиолетовых» звезд группировки в Возничем (точки). Почти все звезды оказались выше главной последовательности (сплошная кривая), что свидетельствует о наличии дополнительного излучения в ультрафиолетовом диапазоне

этим данным спектральные классы измеренных звезд. Ясно одно: после внесения поправки на влияние межзвездного поглощения эти звезды окажутся принадлежащими к еще более ранним классам.

Чуть позднее Абт (Abt) из обсерватории Kitt Peak определяет спектральные классы для девяти звезд этой группы; они указаны в вышеприведенной

таблице. Все эти звезды, за исключением трех, оказались принадлежащими классу В. Тем самым подтвердилось сделанное с самого начала предположение о том, что члены этой группировки суть горячие звезды. Три члена этой группы (ГЛКА 55, 62 и 64) оказались аномальными звездами типа Ам. Далее Абт, анализируя зависимость визуальных величин, исправленных с учетом влияния межзвездного поглощения, от спектрального класса, приходит к выводу о существовании не одной, а трех группировок, а именно: 1) далекой группы, находящейся на расстоянии 1100 пк и с покраснением в размере $0,^m23$, состоящей из эволюционировавших звезд; 2) промежуточной группы, находящейся на расстоянии 630 пк и с покраснением $0,^m06$; 3) группы из трех фоновых звезд типа Ам, находящейся на расстоянии 250—500 пк.

Сделанные выводы, конечно, интересны, но их нельзя считать окончательными. Не совсем ясно, например, в какой мере разработанная для нормальных звезд процедура нахождения показателей цвета приемлема в отношении звезд рассматриваемой группировки, по всей вероятности не являющихся нормальными звездами. На настоящем этапе наших знаний правильнее будет считать проблему группировки в Возничем открытой [32, 46, 25].

4.7. Горячие звезды южного неба

До выхода в космос на «Союзе-13» космонавты П. И. Климук и В. В. Лебедев никогда не были южнее экватора и ни разу не

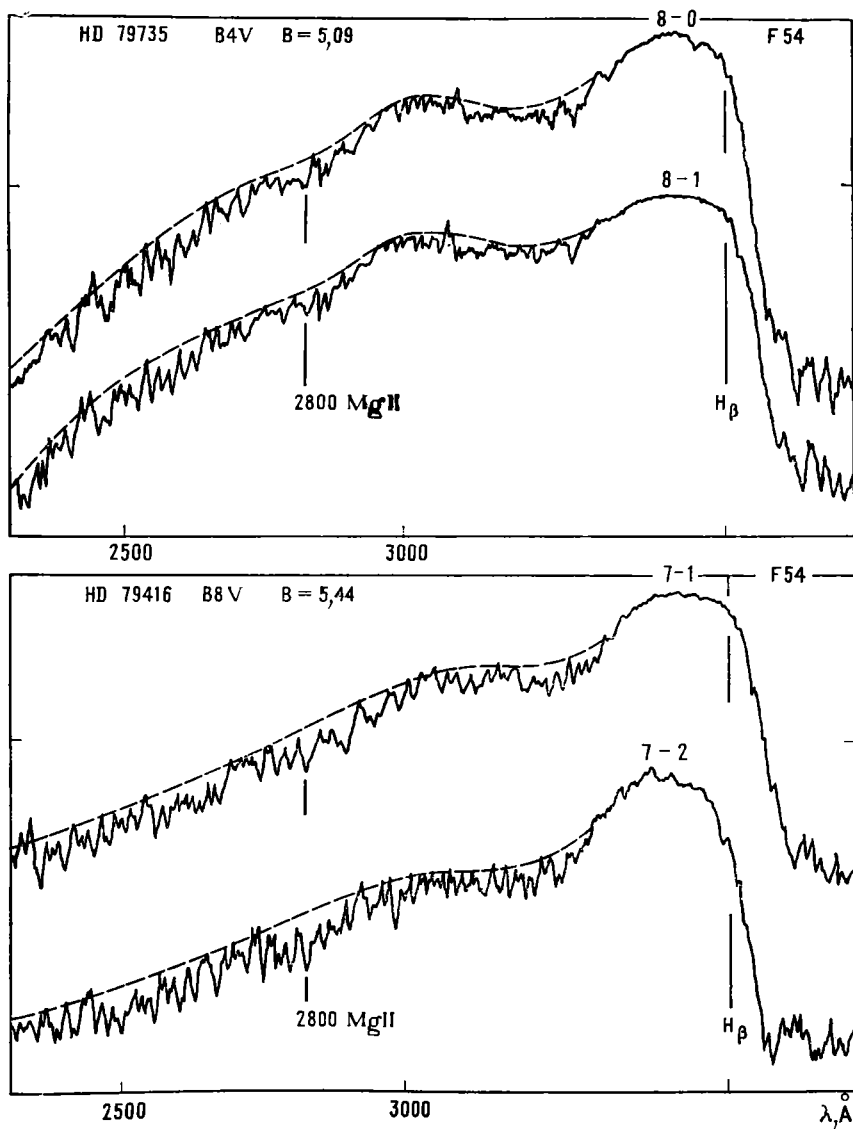


Рис. 4.21. Образцы микрофотометрических записей ультрафиолетовых спектрограмм звезд HD 79735 и HD 79416 (по два спектральных снимка для каждой), полученных с помощью «Орiona-2»

Таблица 4.2

Изученные горячие звезды в созвездии «Парус»

Звезда	V	Спектр	r	n	Звезда	V	Спектр	r	n
HD 76838	7 ^m 31	B3 V	430	3	79416	5,56	B8 V	200	4
76898	7,39	B5 V	500	7	79694	5,84	B6 IV	190	2
77320	6,08	B2,5 Ve	290	4	79735	5,24	B4 V	180	7
77475	5,54	B5 V	190	15	79900	6,24	A0	140	5
78616	6,78	B1	700	4	80205	6,73	A0	140	1
79186	5,00	B3 Ia	1400	7	SAO 221041	7 ^m 2	B8	280	3

видели южное звездное небо — разве что в Планетарии в Москве. Это, однако, не помешало включить в их программу наблюдений получение спектральных снимков звезд на отдельных участках южного неба. Так было отснято и обработано более шестидесяти ультрафиолетовых спектрограмм для одной группы из 12 горячих звезд класса В в созвездии Паруса, вокруг λ Vel, находящегося южнее — 40°.

Здесь следует сделать следующее замечание. Во время программной работы «Ориона-2» на некоторых витках орбиты имели место случайные расстройствa следящей системы по одной из трех осей стабилизации, к счастью, чаще всего по оси, перпендикулярной дисперсии. Обычно режим «расстройствa» сохранялся в течение данного полувитка орбиты и исчезал на следующем полувитке. Само расстройство заключалось в скачкообразном и ритмичном изменении положения данной оси стабилизации и кратковременной, но вполне устойчивой остановке всей системы в этом положении в течение 10—15 с. В результате для одной и той же звезды мы имели на кадре большое количество узких, шириной около 0,1 мм, спектрограмм, расположенных строго параллельно друг другу и на одинаковых расстояниях друг от друга. Эффективная экспозиция в таких случаях определялась, как правило, по известной полной продолжительности фотографирования данного кадра и полному количеству спектрограмм, зафиксированных для одной (яркой) звезды на этом кадре. В числе областей неба, экспонированных в таких условиях, оказалась и область вокруг λ Vel; для нее было получено четыре кадра (F52, F53, F54, F56) с изображениями многих сотен спектральных снимков. На рис. 4.21 приведены

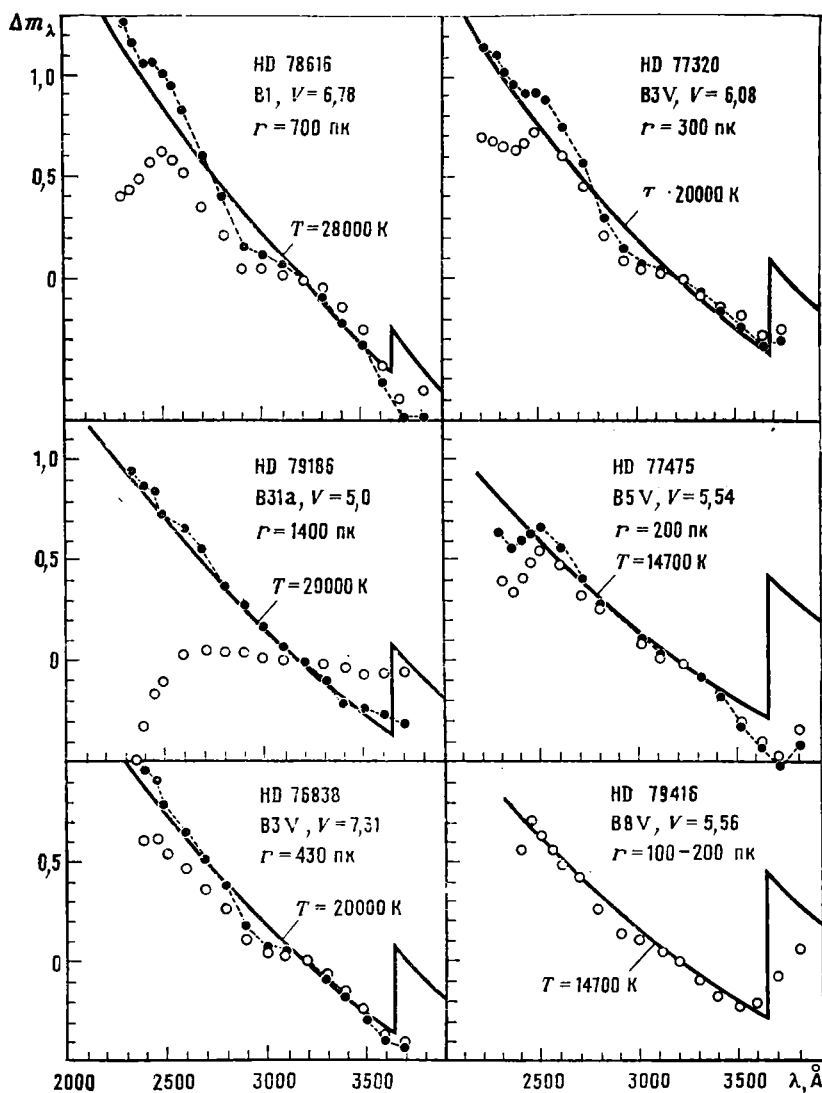


Рис. 4.22. Наблюдаемые (кружки) и исправленные (точки) с учетом влияния межзвездного селективного поглощения распределения энергии в спектрах шести звезд класса В в Парусах:

сплошные кривые — теоретические распределения для указанных на кривых эффективных температур T и $\lg g = 4$

образцы микрофотометрических записей этих спектров для двух из изученных звезд, по две записи на каждую звезду.

Список полученных 12 звезд классов В1—А0 приведен в табл. 4.2 с указанием, в частности, их расстояний r и количества обработанных спектрограмм n . Измерения их непрерывных спектров с коротковолновой стороны были доведены до 2400 Å, иногда до 2200 Å. Результатом спектрофотометрических измерений явилось нахождение наблюдаемого распределения энергии, т. е. величины относительной интенсивности, выраженной в звездных величинах Δm_λ , на данной волне. При этом интенсивность непрерывного спектра на 3200 Å была принята за единицу. Числовое значение Δm_λ для данной звезды представлено как среднеарифметическое от n измеренных спектрограмм. Среднеквадратичные ошибки для одного определения оказались равными 0,^m10—0,^m15 или 10—15 % на разных участках длин волн.

Наблюдаемые величины Δm_λ затем были исправлены с учетом влияния межзвездного селективного поглощения «методом r », т. е. с помощью соотношения $\Delta m_\lambda^\circ = \Delta m_\lambda - (a_\lambda - a_{3200})r$, где a_λ — коэффициент межзвездного поглощения в звездных величинах на данной длине волны и на 1 кпк. Из-за отсутствия данных для интересующей нас области неба (λ Vel) пришлось ограничиться использованием результатов наблюдений ОАО-2 над звездой α Cam (Bless, Savage). Кстати, найденная отсюда зависимость a_λ от λ хорошо представляется законом вида $a_\lambda \sim \lambda^{-1}$ в интервале длин волн 2200—3700 Å.

По найденным описанным способом значениям Δm_λ и Δm_λ° были построены графики распределения энергии в непрерывных спектрах исследуемых звезд — как непосредственно наблюдаемого (Δm_λ), так и исправленного (Δm_λ°); эти графики для шести звезд (табл. 4.2) показаны на рис. 4.22. На них нанесены также теоретические кривые, рассчитанные для заданной эффективной температуры и значения $\lg g = 4$ (Mihalas).

Представленные на рис. 4.22 результаты и их сопоставление с теорией позволяют сделать следующие выводы.

Прежде всего найденные непосредственно из наблюдений распределения энергии в непрерывных спектрах исследуемых звезд (кружки) существенно отличаются от теоретически ожидаемых распределений. При этом расхождение между наблюдениями и теорией тем значительнее, чем больше расстояние звезды от нас, и оно исчезает почти полностью, когда звезда расположена недалеко от нас. Примером первого случая может служить звезда HD 76616 ($r = 700$ пк) и в особенности звезда

HD 79186 ($r=1400$ пк), примером второго — звезды HD 79416, HD 79694 или HD 80205, расстояние которых порядка 100—200 пк.

Однако картина резко меняется, когда принимается во внимание влияние межзвездного селективного поглощения, с учетом которого найденные из наблюдений распределения энергии в непрерывных спектрах рассмотренных звезд уже находятся в согласии с теорией, по крайней мере от 3500 Å до 2400—2200 Å. Особенно примечательна в этом отношении уже упоминавшаяся звезда HD 79186, для которой все точки ложатся на теоретическую кривую почти без отклонений. Также обстоит дело и в случаях звезд HD 79735, 79694, 80205 и т. д.

Хорошее согласие наблюдений с теорией позволяет устранить некоторые разногласия, существующие в оценках спектрального класса или расстояний для той или иной звезды. Например, по определениям одних авторов, звезда HD 79186 принадлежит спектральному классу B5 Ia при расстоянии 1600 пк, а по определениям других авторов, она должна быть типа B3 Ia, а расстояние должно составить 1400 пк. Наши же измерения непрерывного спектра в ультрафиолете лучше согласуются со вторым определением. Также обстоит дело и со звездой HD 76898; по одним оценкам, ее спектр должен быть B5, по другим — B3, а по данным «Ориона-2» хорошее согласие наблюдений с теорией получается, если принять ее спектр B3.

Еще один пример. В каталогах есть указание о принадлежности звезды HD 79900 к спектральному классу A0. Между тем, найденное нами распределение энергии в ультрафиолете этой звезды указывает скорее всего на ее принадлежность к классу B8 с эффективной температурой 12600 К. По-видимому, подлежит уточнению также расстояние звезды HD 76898; вероятно, оно должно быть не более 300 пк (взамен 500 пк), и при этом согласие наблюдений с теорией будет полное.

Таким образом, для *нормальных* звезд, какими являются приведенные в табл. 4.2 объекты, наблюдаемое распределение энергии в их спектрах с учетом возможных уточнений спектральных классов или расстояний находится в согласии с теорией. Важно отметить, что согласие наблюдений с теорией имеет место, во всяком случае в пределах чувствительности наших измерений, как у звезд главной последовательности (класс светимости V), так и в случае сверхгигантов (класс светимости I, HD 79186).

К аналогичным выводам приводят также результаты обработки и измерения 190 «орионовских» спектрограмм для другой

группы из 24 горячих звезд (В3—А0), являющихся членами открытого звездного скопления α Персей.

4.8. Странная звезда

Уже во время первых просмотров спектральных снимков «Ориона-2» о своем существовании «заявила» одна сравнительно слабая звезда, не зафиксированная в каталогах. В нашем списке она обозначена как звезда ГЛКА-1. Позднее был определен ее блеск: он оказался равным $12^m,6$ в синих лучах. Находится эта звезда недалеко от Капеллы, по соседству со звездами SAO 040303 и SAO 040307 ($\alpha \approx 05^h 20^m$, $\delta \approx +47^\circ$).

На рис. 4.23 приведена репродукция изображения спектра этой звезды, полученного с 18-минутной экспозицией. На этом рисунке видны изображения спектров еще двух соседних звезд, имеющих почти такой же блеск в фотографических лучах, что и ГЛКА-1, но заведомо поздних классов. Несмотря на слабость этой звезды, коротковолновая граница ее спектра простирается до 2500 Å, что уже свидетельствует о высокой температуре излучения. Действительно, судя по рис. 4.24, уже наблюдаемое распределение энергии, не исправленное с учетом влияния межзвездного поглощения, соответствует температуре около 20000 К. Учет же поглощения, даже в малейшей степени, приводит к сильному повышению ее эффективной температуры — до 50000 К, а может быть, и выше.

Таким образом, хотя по распределению непрерывного спектра в области 3000—2500 Å мы не можем установить точную величину эффективной температуры звезды № 1, тем не менее можно с уверенностью сказать, что она больше 20000 К. Это значит, что звезда № 1 должна быть по крайней мере класса раннего В, если не О. Но если это обычная звезда, то при такой высокой температуре ее абсолютная светимость должна быть

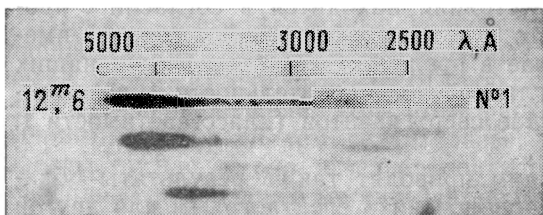
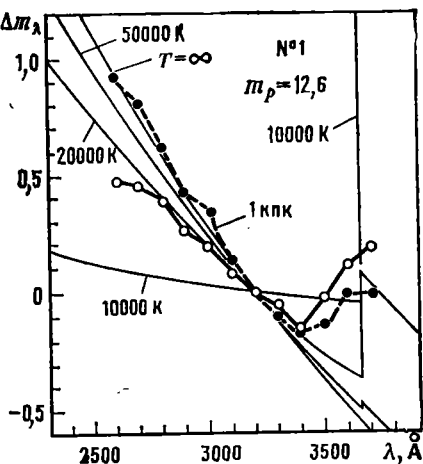


Рис. 4.23. Спектрограммы трех звезд почти одинакового блеска в визуальных лучах. Две нижние из них принадлежат поздним классам, верхняя — «странная» звезда ГЛКА-1, у нее сильное ультрафиолетовое излучение простирается в области длин волн до 2500 Å

Рис. 4.24. Распределение энергии в Δm_λ ультрафиолете в спектре звезды ГЛКА-1 в области длин волн 3800—2600 Å:

кружки — данные наблюдений, точки — данные исправленные с учетом межзвездного поглощения. Кривые — теоретическое модельное распределение непрерывного спектра. Кривая $T = \infty$ соответствует планковскому распределению при бесконечной температуре



— 3^m или — 4^m . Тогда ее расстояние получается поистине огромным — больше 10 000 пк. Между тем, эта звезда находится в направлении антицентра Галактики ($l \sim 175^\circ$, $b \sim +7^\circ$). Стало быть, чтобы она оказалась в пределах Галактики, ее расстояние не должно превышать несколько тысяч парсеков, т. е. нужно допустить, что для нее $M > 0$ (при $r = 1000$ пк получается $M = +2,6$). Иначе говоря, по абсолютной светимости звезда № 1 должна быть по крайней мере в 100 раз слабее обычной звезды той же температуры. Но это еще не все.

Как-то странно выглядит сама структура коротковолновой спектрограммы этой звезды; на ее микрофотометрической записи как будто нельзя обнаружить сильных линий поглощения. Вместе с тем она кажется испещренной эмиссионными линиями, среди которых более или менее четко выделяется линия 2800 MgII, но есть основание усомниться в их реальности.

Таким образом, расшифровка странной ультрафиолетовой спектрограммы этой звезды, разгадка ее природы пока не представляется возможной. Остается строить лишь предположения, гипотезы, опираясь лишь на два параметра: температура звезды очень высока и абсолютная светимость ее положительна. Например, можно допустить, что это белый карлик. Но белый карлик с температурой свыше 50 000 К? Чтобы убедиться в правильности оценки, нужно иметь хотя бы спектрограмму этой звезды в наземных условиях.

Автор этих строк обратился с письмом к известному американскому астрофизику, крупнейшему исследователю звездных спектров Хербигу (Herbig) с просьбой изыскать возможность получения щелевой спектрограммы этой звезды с высоким разрешением на телескопе с 3-метровым зеркалом Ликской обсерватории. Вскоре поступил следующий ответ:

«Я получил две щелевые спектрограммы Вашей звезды № 1 в области длин волн 5800—6800 Å с дисперсией 33 Å мм⁻¹. Первая из этих спектрограмм была сфотографирована 13 марта 1976 г., вторая — 22 февраля 1978 г., после получения Вашего письма. На обеих спектрограммах видна широкая, сильная линия поглощения H_α, хотя эта линия могла быть и 6560 H_α; не имея данных о радиальной скорости звезды или о присутствии линии 5411 H_β, нельзя быть уверенным в этом. Вероятно, присутствует также слабая линия 5875 HeI. Межзвездные линии NaI довольно сильные, присутствуют также межзвездные полосы 5780, 5797, 6203, 6283, 6613, так что эта звезда испытывала значительное межзвездное поглощение и не может быть белым карликом».

Итак, звезда № 1 не белый карлик! Предположение, казавшееся более или менее вероятным, не подтвердилось. Но тогда что она — эта звезда? Ответа пока нет. Даже Хербиг воздерживается от окончательного высказывания по поводу ее спектрального класса (по-видимому, нужно получить щелевую спектрограмму также для области короче 5800 Å). Во всяком случае метод исключения (не белый карлик!) не приблизил нас к разгадке.

Ясно одно: если звезда испытывала, как утверждает Хербиг, значительное межзвездное поглощение и, несмотря на это, ее наблюдаемый спектр в ультрафиолетовой области так силен, то реальное распределение энергии в этом спектре должно соответствовать еще и высокому значению эффективной температуры — порядка 100000 К и даже выше.

Но звезда ли это? И вообще, достаточно ли у нас оснований считать этот объект галактическим? На картах Паломарской обсерватории этот объект выглядит вроде звездобразным. Стало быть, внегалактический звездобразный? Круг поисков не сужается — он расширяется. Если дать волю фантазии, то предположение, что этот объект может оказаться квазаром, не должно казаться таким уж фантастическим. Только этот квазар должен обладать необычными свойствами: он должен находиться недалеко от нас, его абсолютная светимость должна быть порядка -20^m , на $4-5^m$ слабее светимости обычных квазаров. Короче говоря, в данном случае речь может идти о карликовом квазаре. Очевидно, если карликовые квазары существуют, то их нельзя будет обнаружить на больших — космологических —

расстояниях и, стало быть, их следует искать вблизи нас. Задача, надо сказать, довольно заманчивая, даже если она не имеет отношения к нашему объекту № 1...

События вокруг объекта № 1 принимают драматический характер, а развязка еще не предвидится. Но, как и у всякой драмы, она, эта развязка, все-таки должна наступить... [4].

4.9. Абсолютная спектрофотометрия в ультрафиолете

Для решения большого круга вопросов астрофизики — построение шкалы эффективных температур, определение параметров звезд, исследование физических свойств межзвездной среды и т. п. — необходимо знание монохроматических освещенностей (абсолютных распределений энергии излучения), создаваемых исследуемыми астрономическими источниками излучения за пределами земной атмосферы.

Для абсолютизации кривых относительного распределения энергии излучения в спектрах звезд, полученных с помощью «Ориона-2», в принципе достаточно знать их абсолютные потоки на одной длине волны. На «Орионовских» спектральных снимках имеются звезды с известными абсолютными потоками как на отдельных длинах волн, так и вдоль спектра, и для них мы можем абсолютизировать полученные нами ранее относительные кривые распределения энергии в ультрафиолете. Но для большей части звезд, впервые зарегистрированных с помощью «Ориона-2», вопрос абсолютизации относительных измерений остается открытым. Эта проблема — абсолютизация «орионовских» наблюдательных данных — решается нами описанным ниже способом.

В наблюдательной астрономии задача определения абсолютного распределения энергии обычно сводится к сравнению спектра исследуемого объекта со спектрофотометрическим стандартом, или иначе, источником света с известным абсолютным распределением.

На сегодняшний день на небе уже имеется множество спектрофотометрических стандартов, в частности измерены ультрафиолетовые спектры почти всех звезд не слабее 4^m визуальной величины в абсолютных единицах. Пользуясь тем, что на каждом «орионовском» спектральном снимке имеется спектрограмма по крайней мере одной звезды не слабее 3^m (хотя бы сама звезда гидирования поля А) с известными значениями монохроматических потоков в ультрафиолете, можно использовать ее в качестве спектрофотометрического стандарта для аб-

солютизации измерений с соответствующего спектрального снимка.

Для этого путем совмещения кривых распределения энергии излучения в спектре звезды A — относительной для «Ориона-2» и абсолютной для иного эксперимента (например, ОАО-2), мы выводим коэффициенты абсолютизации $K_1, K_2, \dots K$ для каждого «орионовского» спектрального снимка в отдельности, независимо от того, сколько раз фотографировалась та или иная область неба.

Так, например, область неба вокруг Капеллы (α Aur) фотографировалась «Орионом-2» три раза с разными экспозициями (см. табл. 4.1), в результате чего и получены кадры F19, F20 и F21; для них найдены соответственно следующие значения коэффициента абсолютизации:

$$K(F19) = -10,92, \quad K(F20) = -11,87, \quad K(F21) = -12,77.$$

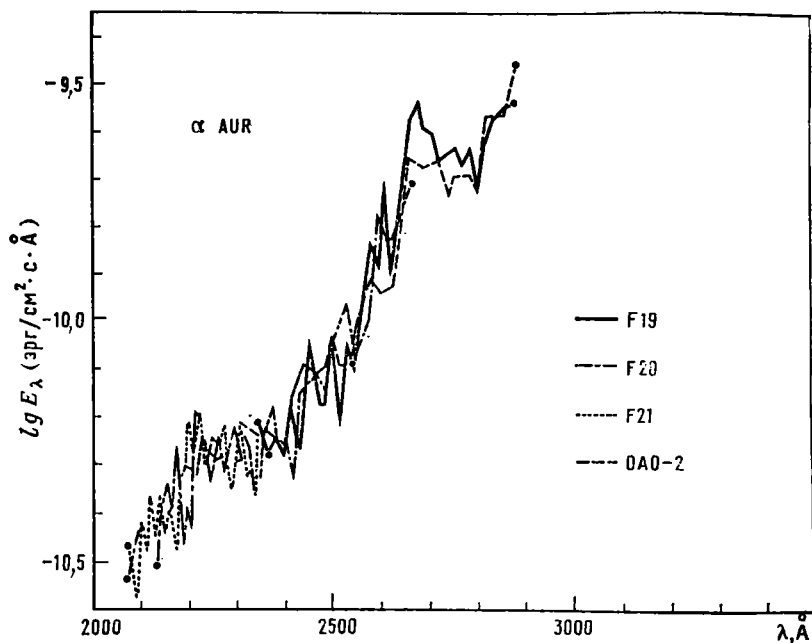


Рис. 4.25. Кривые распределения монохроматических потоков в ультрафиолетовом спектре Капеллы (α Aur) в абсолютных энергетических единицах, по данным «Ориона-2» (кадры F 19, F 20 и F 21) и ОАО-2:

по ординате отложены величины $\lg E_{\lambda}$ эрг·см^{–2}·с·Å^{–1}, по абсциссе — длины волн, Å

На рис. 4.25 приведены абсолютные кривые распределения энергии в спектре Капеллы, по данным «Ориона-2» и ОАО-2 (Code). В случае «Ориона-2» приведены кривые, снятые с каждого из трех спектральных снимков в отдельности.

Для остальных звезд этой же области неба (α Aur) абсолютное распределение энергии E_λ в их спектре определяется с помощью абсолютной спектральной чувствительности телескопа «Орион-2», которая представляет собой произведение относительной спектральной чувствительности с одним из трех коэффициентов абсолютизации, в зависимости от того, на каком спектральном снимке находится измеряемая спектрограмма:

$$E_\lambda = I_\lambda \cdot 10^{-k_{19}} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{\AA}^{-1}, \text{ кадр } F19$$

$$E_\lambda = I_\lambda \cdot 10^{-k_{20}} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{\AA}^{-1}, \text{ кадр } F20$$

$$E_\lambda = I_\lambda \cdot 10^{-k_{21}} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{\AA}^{-1}, \text{ кадр } F21$$

Здесь I_λ — интенсивность излучения на длине волны λ , без введения коэффициента чувствительности δ_λ системы «Орион-2».

Описанным здесь способом были найдены абсолютные потоки в ультрафиолетовых спектрах всех звезд, спектрограммы которых были получены с помощью «Ориона-2» [10].

4.10. Каталог «Ориона-2»

Уже сложилась традиция — по завершению очередного крупного внеатмосферного астрономического эксперимента — обширный и однородный наблюдательный материал, к какому можно отнести и спектральные снимки, полученные с помощью космической обсерватории «Орион-2», представлять в виде каталога ультрафиолетовых спектров звезд.

На сегодняшний день существует несколько каталогов ультрафиолетового излучения звезд. Наиболее ценные из них: Атлас ультрафиолетовых спектров звезд, по данным ОАО-2 (Code и др.), спектрофотометрический каталог ярких звезд в ультрафиолете (Jamaг и др.), дополнение к этому каталогу (Masau-Hercot и др.), каталог звездных ультрафиолетовых потоков (Thompson и др.).

Описанным в предыдущем разделе способом абсолютизации «орионовского» наблюдательного материала мы определили монохроматические потоки в ультрафиолетовом спектре около 1000 звезд в абсолютных энергетических единицах ($\text{эрг} \cdot \text{см}^{-2} \times \text{с}^{-1} \cdot \text{\AA}^{-1}$). Спектрограммы этих 1000 звезд измерены со всех спектральных снимков 16 областей неба, сфотографированных

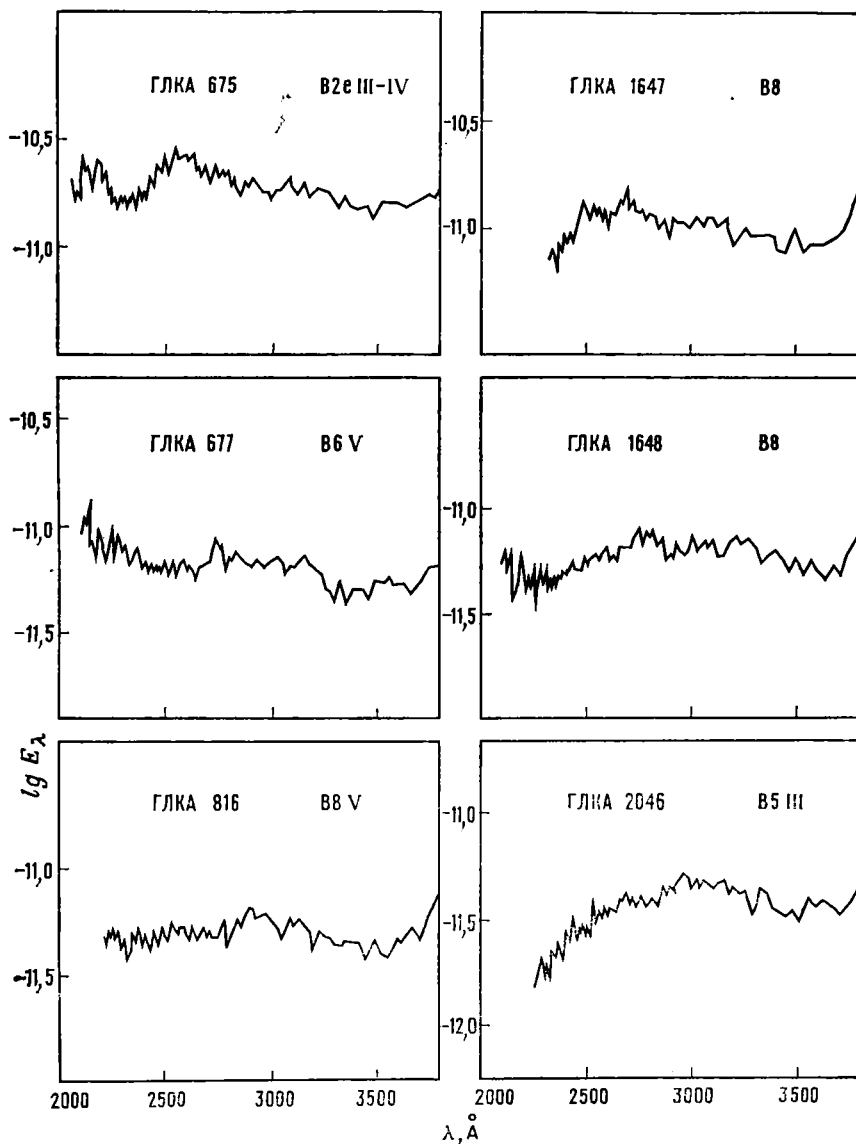


Рис. 4.26. Фрагмент из каталога абсолютных ультрафиолетовых потоков звезд по данным «Ориона-2»

Таблица 4.3

Распределение энергии в ультрафиолетовом спектре некоторых звезд
в абсолютных энергетических единицах

Длина волны, А	ГЛКА 675 HD 33988	ГЛКА 677 HD 33853	ГЛКА 816 HD 33601	ГЛКА 1647 HD 33542	ГЛКА 1648 HD 33459	ГЛКА 2046 HD 33446
3774	1,8 —11	6,8 —12	6,9 —12	1,5 —11	7,8 —12	4,2 —12
3694	1,7 —11	5,6 —12	4,7 —12	9,6 —12	4,9 —12	3,4 —12
3620	1,6 —11	5,5 —12	4,6 —12	8,7 —12	4,8 —12	3,9 —12
3548	1,7 —11	5,8 —12	3,9 —12	8,5 —12	5,8 —12	4,0 —12
3478	1,4 —11	5,6 —12	4,6 —12	1,0 —11	5,9 —12	3,5 —12
3410	1,6 —11	5,1 —12	4,6 —12	8,1 —12	6,2 —12	3,5 —12
3345	1,7 —11	4,5 —12	4,6 —12	9,6 —12	6,0 —12	4,3 —12
3285	1,7 —11	4,6 —12	4,5 —12	9,6 —12	6,8 —12	3,3 —12
3228	1,9 —11	6,3 —12	5,0 —12	9,3 —12	7,1 —12	4,2 —12
3173	1,8 —11	6,9 —12	5,0 —12	1,1 —11	7,1 —12	4,3 —12
3122	1,8 —11	6,9 —12	5,9 —12	1,0 —11	5,9 —12	4,7 —12
3080	2,1 —11	6,6 —12	5,8 —12	1,1 —11	6,8 —12	4,7 —12
3040	1,9 —11	7,1 —12	4,9 —12	1,1 —11	6,9 —12	4,6 —12
3000	1,8 —11	7,1 —12	5,8 —12	1,1 —11	7,2 —12	4,5 —12
2963	1,9 —11	6,8 —12	6,2 —12	1,0 —11	6,2 —12	5,3 —12
2928	2,0 —11	7,1 —12	5,9 —12	1,1 —11	6,9 —12	4,7 —12
2894	2,0 —11	6,8 —12	6,6 —12	9,6 —12	6,2 —12	4,6 —12
2862	1,8 —11	7,2 —12	5,4 —12	1,1 —11	7,1 —12	4,5 —12
2830	2,2 —11	7,8 —12	5,4 —12	1,1 —11	7,4 —12	3,7 —12
2800	2,3 —11	7,1 —12	4,4 —12	1,2 —11	7,6 —12	3,7 —12
2770	2,3 —11	8,1 —12	5,3 —12	1,2 —11	6,8 —12	4,0 —12
2740	2,5 —11	8,9 —12	4,8 —12	1,2 —11	7,4 —12	3,9 —12
2713	2,3 —11	7,1 —12	5,0 —12	1,3 —11	6,6 —12	4,1 —12
2685	2,2 —11	6,8 —12	5,3 —12	1,3 —11	6,6 —12	4,3 —12
2658	2,3 —11	6,6 —12	4,8 —12	1,3 —11	6,6 —12	3,9 —12
2632	2,8 —11	6,3 —12	5,4 —12	1,1 —11	5,0 —12	3,6 —12
2806	2,7 —11	6,6 —12	5,0 —12	1,0 —11	6,6 —12	3,6 —12
2580	2,6 —11	6,9 —12	5,4 —12	1,1 —11	6,2 —12	3,8 —12
2557	2,9 —11	6,9 —12	6,2 —12	1,2 —11	5,9 —12	3,6 —12
2533	2,4 —11	6,8 —12	5,5 —12	1,2 —11	5,7 —12	4,0 —12
2510	2,8 —11	6,8 —12	4,8 —12	1,2 —11	5,4 —12	3,0 —12
2487	2,3 —11	6,3 —12	4,9 —12	1,4 —11	5,4 —12	3,0 —12
2465	2,3 —11	6,3 —12	4,6 —12	1,0 —11	5,2 —12	2,8 —12
2443	2,3 —11	6,5 —12	4,2 —12	8,7 —12	5,6 —12	3,4 —12
2422	1,7 —11	6,5 —12	4,3 —12	8,7 —12	5,1 —12	2,5 —12
2402	1,7 —11	6,5 —12	4,5 —12	1,0 —11	4,9 —12	2,5 —12
2382	1,5 —11	7,2 —12	5,3 —12	8,9 —12	4,8 —12	2,0 —12
2362	1,8 —11	7,6 —12	4,5 —12	7,2 —12	4,5 —12	2,2 —12
2343	1,7 —11	6,8 —12	4,1 —12	7,8 —12	4,3 —12	2,3 —12
2325	1,7 —11	7,2 —12	4,1 —12		4,1 —12	1,6 —12
2307	1,8 —11	8,3 —12	4,3 —12		4,5 —12	1,7 —12
2289	1,5 —11	9,1 —12	5,3 —12		4,7 —12	2,1 —12
2271	1,8 —11	7,6 —12	5,5 —12		4,3 —12	1,7 —12

Продолжение табл. 4.3

Длина волны, А	ГЛКА 675 HD 33988	ГЛКА 677 HD 33853	ГЛКА 816 HD 33601	ГЛКА 1647 HD 33542	ГЛКА 1648 HD 33459	ГЛКА 2046 HD 32446
2254	1,7 —11	1,0 —11	5,1 —12		5,4 —12	
2238	2,2 —11	6,9 —12	4,5 —12		4,9 —12	
2222	2,0 —11	7,8 —12			4,5 —12	
2206	2,5 —11	7,9 —12			5,3 —12	
2190	2,2 —11	1,0 —11			4,2 —12	
2174	1,8 —11	6,8 —12			4,0 —12	
2158	2,5 —11	8,3 —12			3,8 —12	
2150	2,3 —11	8,9 —12			6,3 —12	
2144	2,3 —11	1,4 —11			5,5 —12	
2137	2,2 —11	1,1 —11			5,5 —12	
2130	2,8 —11	1,0 —11			4,9 —12	
2123	1,7 —11	1,1 —11			5,1 —12	
2116	1,9 —11	9,8 —12			6,6 —12	
2109	1,7 —11				5,5 —12	
2102	1,6 —11					
2095	1,5 —11					
2088	2,1 —11					

Примечание. 1,8 —11 и т. д. по всей таблице нужно читать так: $1,8 \cdot 10^{-11} \text{ эрг} \times \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{А}^{-1}$.

с помощью «Ориона-2». Результаты спектрофотометрических измерений представлены как в табличной форме — по шесть звезд на каждом листе таблицы, — так и в графической — по шесть графиков кривых распределения энергии в спектре звезд, численные величины абсолютных потоков которых приведены на предшествующей странице каталога в таблице, т. е. на четной странице каталога даны численные значения потока E_λ (для шести звезд), а на последующей — нечетной — графики кривых распределения энергии излучения этих звезд.

На рис. 4.26 приведен фрагмент из каталога абсолютных ультрафиолетовых потоков в спектрах звезд, по данным «Ориона-2». Сочетание цифр в табл. 4.3, например, 3, 5—12 следует читать так: $E_\lambda = 3,5 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{А}^{-1}$. На графиках по ординате отложены величины $\lg E_\lambda$, по абсциссе — длины волн, А. Длинноволновая граница измерений начинается для всех звезд с 3800 А, коротковолновая же граница оказалась неодинаковой для различных звезд в зависимости от спектрального класса и яркости звезды [11, 25].

ИЗЛУЧЕНИЕ ХОЛОДНЫХ ЗВЕЗД

5.1. Спектральные особенности звезд промежуточных классов (F — G — K) в ультрафиолете

Среди объектов, спектральные снимки которых были получены «Орионом-2», оказались также сравнительно слабые звезды промежуточных классов (F—G—K), непрерывные спектры которых в ультрафиолете почти не были изучены. Широкополосная фотометрия, выполненная с помощью американской орбитальной обсерватории ОАО-2, относилась к ярким объектам и

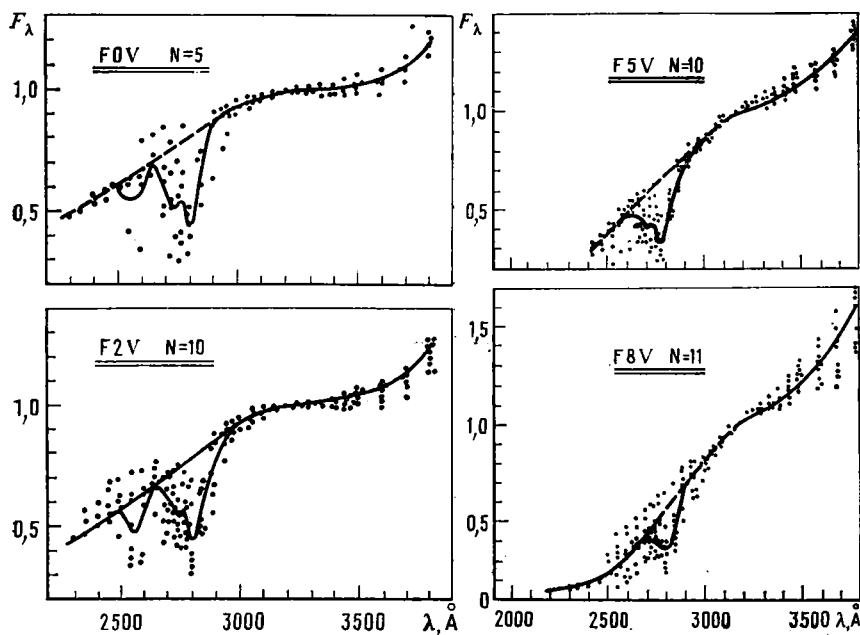


Рис. 5.1. Наблюдаемые распределения энергии в ультрафиолете для звезд классов F0V и F2V, по данным «Ориона-2» (точки): сплошные линии — усредненные кривые распределения энергии в диапазоне 2300—3800 Å для тех же спектральных подклассов (N число измеренных звезд данного подкласса)

Рис. 5.2. Наблюдаемые распределения энергии в ультрафиолете для звезд спектральных подклассов F5 и F8

(условные обозначения те же, что и на рис. 2.1)

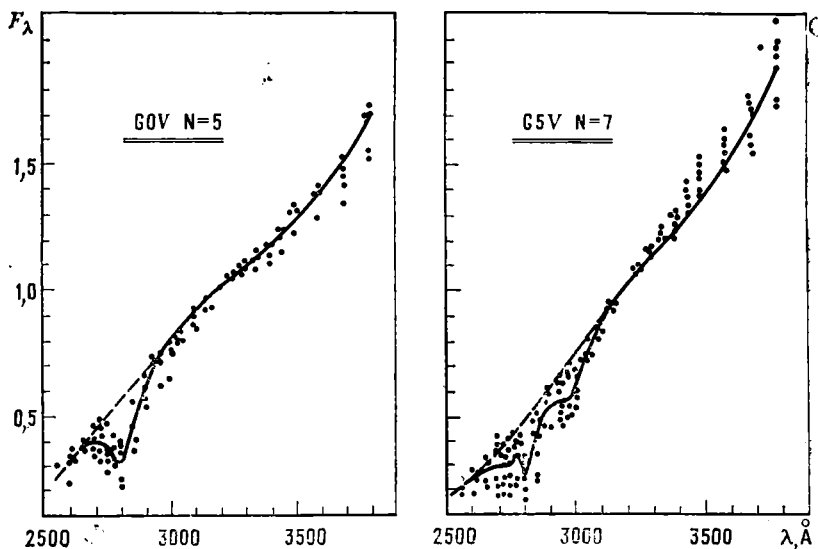


Рис. 5.3. Наблюдаемые распределения энергии в ультрафиолете для звезд спектральных подклассов G0, G5

не обеспечивала достаточного разрешения для нахождения распределения энергии в непрерывных спектрах. Ниже приводятся результаты, полученные на основе обработки материалов «Ориона-2» для одной подборки из 98 звезд классов F—G—K. Эти звезды разбросаны в областях неба вокруг α Aug, β Aug и γ Cas. Для каждой из исследуемых звезд было получено и измерено по 2—3 спектрограммы. Результаты измерений были представлены в относительных единицах, а интенсивность непрерывного спектра на длине волны 3200 Å была принята за единицу. Основная цель проведенных измерений — нахождение кривых распределения энергии в ультрафиолете, в диапазоне 3800—2300 Å, усредненных для отдельных спектральных подклассов.

Начнем со звезд спектрального класса F. Результаты измерений для подклассов F0V (пять звезд) и F2V (десять звезд) представлены на рис. 5.1 (точки). На этих и последующих графиках сплошной линией проводятся *средние кривые распределения энергии* F_{λ} .

Судя по полученным результатам, разброс точек измерений относительно невелик, за исключением области шириной около $\pm 150 \text{ \AA}$

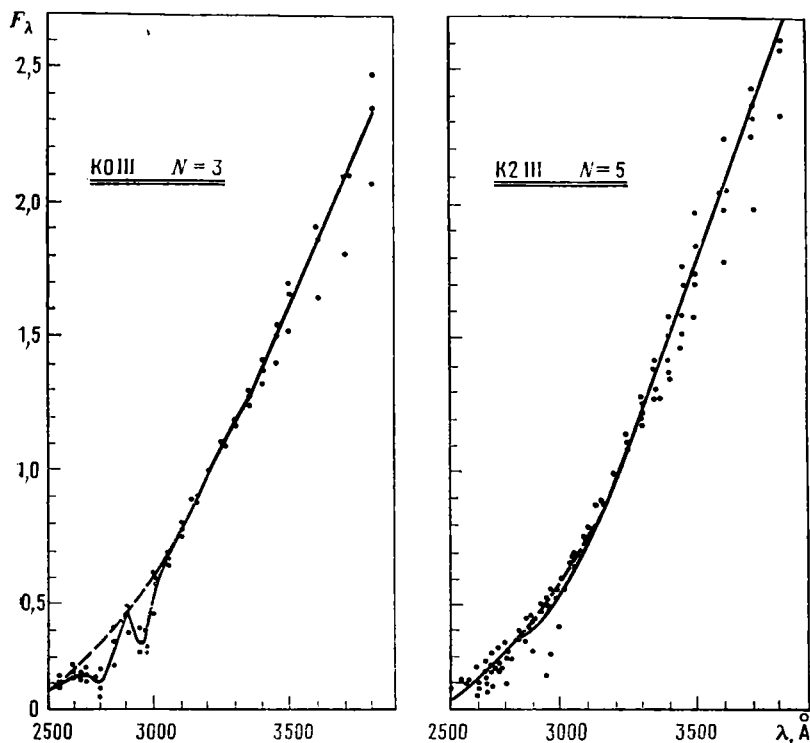


Рис. 5.4. Наблюдаемые распределения в ультрафиолете для звезд спектральных подклассов K0 и K2

вокруг 2800 Å; здесь и на последующих рисунках этот разброс в основном вызван линией поглощения 2800 MgII, частично 2755 FeII.

Аналогичным образом были найдены усредненные кривые распределения энергии в спектрах звезд F5V, F8V, G0V, G5V, G8V, K0III и K2III: соответствующие графики с указанием количества измеренных звезд в каждом подклассе приведены на рис. 5.2—5.4.

Для удобства практического использования полученных результатов найденные нами усредненные значения относительных потоков для рассмотренных спектральных подклассов представлены в численном виде в табл. 5.1 [12].

Таблица 5.1

Относительное распределение энергии $\bar{F}$ (усредненные величины) в спектрах звезд классов F, G, K, по данным «Ориона-2» (поток на $\lambda=3200 \text{ \AA}$ принят за единицу)

$\lambda \text{ (}\text{\AA}\text{)}$	F0 V	F2V	F5V	F8V	G0V	G5V	G8III	K0III	K2III
2300	0,48	0,44	—	0,16	—	—	—	—	—
2350	0,51	0,46	—	0,17	—	—	—	—	—
2400	0,54	0,51	—	0,18	—	—	—	—	—
2450	0,57	0,55	0,30	0,20	—	—	—	—	—
2500	0,61	0,57	0,34	0,23	—	0,18	—	—	—
2550	0,54	0,45	0,37	0,28	0,27	0,22	0,20	—	—
2600	0,57	0,56	0,39	0,29	0,32	0,27	0,24	—	—
2650	0,70	0,68	0,47	0,37	0,36	0,28	0,24	0,21	0,19
2700	0,61	0,62	0,46	0,40	0,39	0,30	0,29	0,25	0,23
2750	0,51	0,56	0,42	0,38	0,35	0,31	0,31	0,24	0,28
2800	0,44	0,44	0,33	0,34	0,31	0,26	0,32	0,20	0,33
2850	0,65	0,58	0,52	0,44	0,43	0,38	0,41	0,35	0,39
2900	0,83	0,77	0,68	0,66	0,59	0,53	0,50	0,46	0,43
2950	0,89	0,88	0,78	0,71	0,68	0,55	0,59	0,36	0,45
3000	0,94	0,91	0,83	0,79	0,75	0,62	0,64	0,55	0,54
3050	0,96	0,94	0,88	0,85	0,82	0,73	0,72	0,67	0,65
3100	0,98	0,96	0,93	0,91	0,88	0,84	0,82	0,78	0,76
3150	0,99	0,98	0,97	0,96	0,94	0,92	0,92	0,89	0,87
3200	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3250	1,00	1,01	1,03	1,04	1,04	1,05	1,06	1,09	1,09
3300	1,00	1,01	1,05	1,06	1,08	1,11	1,12	1,17	1,22
3350	1,01	1,02	1,06	1,09	1,11	1,16	1,18	1,26	1,34
3400	1,01	1,02	1,08	1,12	1,16	1,22	1,24	1,37	1,46
3450	1,01	1,04	1,11	1,16	1,21	1,29	1,31	1,50	1,61
3500	1,02	1,05	1,14	1,20	1,26	1,36	1,38	1,61	1,76
3600	1,05	1,07	1,21	1,30	1,37	1,49	1,52	1,84	2,03
3700	1,10	1,14	1,29	1,42	1,48	1,64	1,68	2,07	2,31
3800	1,20	1,25	1,39	1,60	1,67	1,84	1,90	2,33	2,63

5.2. Макроструктура спектров звезд промежуточных классов в ультрафиолете

Среди обширного наблюдательного материала «Ориона-2» оказалось немало интересного и для звезд промежуточных спектральных классов (F—G), об особенностях макроструктуры непрерывных спектров которых в ультрафиолете известно очень немного. Этот материал представляет интерес также для теории звездных фотосфер, в частности нам представилась возможность выяснить в какой мере наблюдаемые распределения энергии в

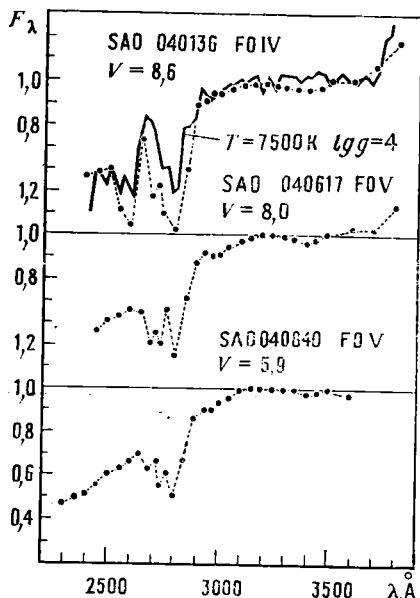


Рис. 5.5. Наблюдаемое распределение энергии в ультрафиолете трех звезд класса F0 (точки), по данным «Ориона-2»:

сплошная линия — теоретическая модель при $T=7500$ К и $\lg g=4$

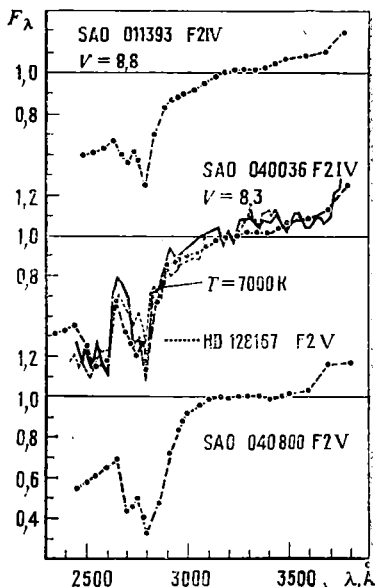


Рис. 5.6. Наблюдаемое распределение энергии в ультрафиолетовом спектре трех звезд типа F2 (точки), по данным «Ориона-2»:

сплошная линия — теоретическая модель при $T=7000$ К и $\lg g=4$. Точечная линия — наблюдения ОАО-2 для одной звезды класса F2 V (HD 128 167)

спектрах звезд промежуточных классов в ультрафиолете соответствует теоретически вычисленным спектрам при заданной эффективной температуре звезды T и ускорении силы тяжести на ее поверхности g . При этом мы опирались на теоретические модели, рассчитанные для звезд классов F0—G5 и для классов G8—K2 (Kurucz, Carbon, Gingerich).

Начнем с рис. 5.5, где приведены найденные по данным «Ориона-2» распределения энергии в спектрах трех звезд класса F0: SAO 040136, 040617 и 040840; все три — звезды главной последовательности (класс светимости V). Как мы видим, это распределение в области 2300—3800 Å имеет довольно причудливую форму, с сильно выраженной широкой депрессией на длине волны 2800 Å. Там же сплошной линией нанесена теоретичес-

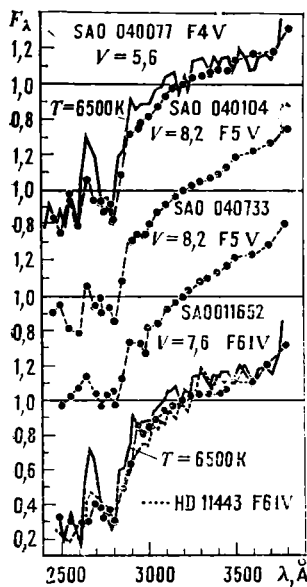


Рис. 5.7. Распределение энергии в ультрафиолете четырех звезд типа F4—F6 (точки). Для сравнения нанесены также данные ОАО-2 для одной звезды типа F6 IV (точечная линия):

сплошная линия — теоретическая модель

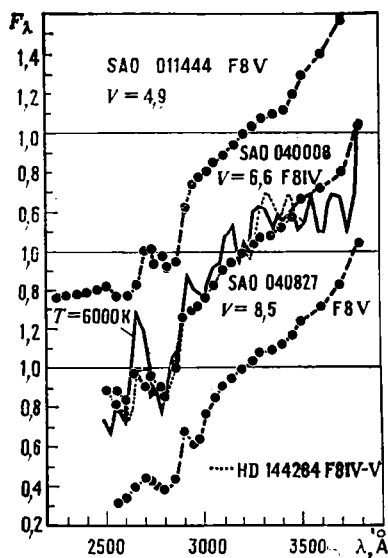


Рис. 5.8. Сопоставление средних кривых распределения энергии в ультрафиолете звезд класса F8 V (точки) «Ориона-2» с теоретической моделью (сплошные линии):

точечная линия — наблюдения ОАО-2 для звезды HD 144284 того же спектрального класса (F8 V)

кая кривая, соответствующая модели $T=7500$ K и $\lg g=4$; согласие теории с наблюдениями в целом неплохое, хотя в случае SAO 040136 наблюдаемая депрессия в области 2800 Å несколько глубже расчетной.

Еще один пример показан на рис. 5.6 — три звезды класса F2. Здесь сравнение проводится не только с теоретической моделью при $T=7000$ K и $\lg g=4$, но и с результатами наблюдений ОАО-2 для другой звезды того же спектрального класса F2V — HD 128167.

Перейдем к звездам класса F5. На рис. 5.7 показаны «орионовские» спектры для четырех звезд этого класса. Общий ха-

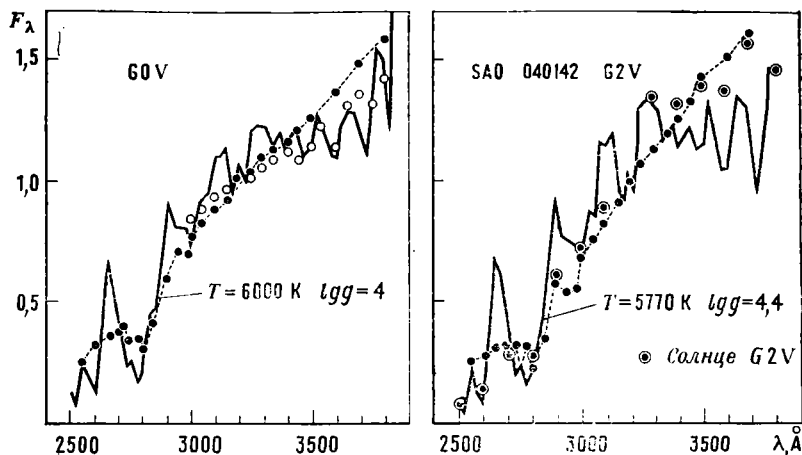


Рис. 5.9. Сопоставление средних «орионовских» кривых распределения энергии в ультрафиолете звезд классов G0 V (точки) с теоретической моделью (сплошная линия слева).

Кружками нанесена средняя кривая распределения энергии для звезд классов G0 V. Справа: кривая распределения энергии в ультрафиолете звезды SAO 040142 класса G2 V (точки, «Орион-2»). Нанесены также теоретическая модель при $T=5770 \text{ K}$ и $\lg g=4.4$ и данные наблюдения для Солнца

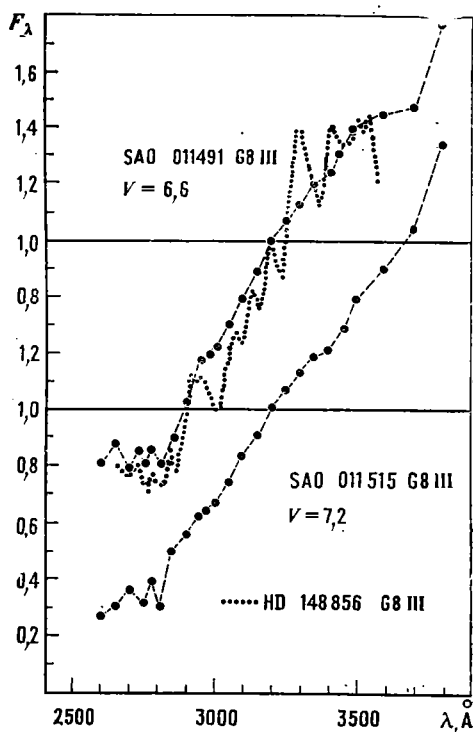


Рис. 5.10. Распределение энергии в ультрафиолете спектров двух звезд класса G8 III по данным «Ориона-2» (точки). Нанесены также результаты ОАО-2 для одной звезды класса G8 III (HD 148856)

рактически наблюдаемых распределений энергии оказался в согласии с данными ОАО-2 для звезды HD 11443 (F6IV), а также с моделью при $T=6500$ К и $\lg g=4$. Однако в некоторых областях теоретическая модель проходит заметно выше, а на длине волны $2700 \text{ \AA}$ — значительно выше наблюдаемых точек как «Орион-2», так и ОАО-2. Такое расхождение, хотя и в меньшей степени, характерно и для звезд класса F2 (см. рис. 5.6).

Аналогичная картина наблюдается и в отношении звезд класса F8; на рис. 5.8 приведены распределения энергии в спектрах трех звезд класса F8 по данным «Ориона-2» наряду с данными ОАО-2 для другой звезды того же класса F8. Здесь также налицо расхождение между наблюдениями и моделью, в особенности на длине волны $2700 \text{ \AA}$.

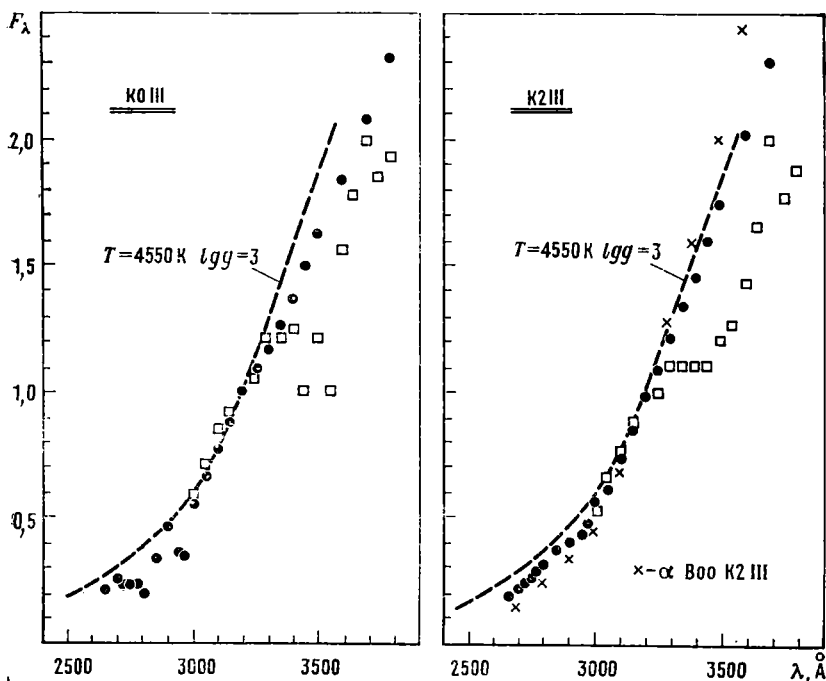


Рис. 5.11. Средние кривые распределения энергии в спектрах звезд классов K0 III и K2 III, по данным «Ориона-2» (точки):

сплошные линии — теоретическая модель при $T=4550$ К и $\lg g=3$; квадраты — средняя кривая распределения энергии для звезд K0 III и K2 III; крестики — данные ракетных наблюдений (Азери) для яркой звезды α Boo класса K2 III

Перейдем теперь к звездам классов G и K. Несколько примеров звезд разных подклассов G, структура спектров которых в ультрафиолете была выявлена «Орионом-2», приведено на рис. 5.9 и 5.10. Там же нанесены теоретические кривые для соответствующих моделей, а также сопоставления с данными ОАО-2 для других, но принадлежащих тем же подклассам звезд. В целом согласие как с теорией, так и с другими наблюдениями хорошее. Однако и в этом случае, т. е. в случае звезд класса G, заметно систематическое расхождение между теорией и наблюдениями на длине волны 2700 Å — теоретическая кривая проходит всегда выше наблюдательных точек. Вряд ли это расхождение можно объяснить недостаточно высоким спектральным разрешением «Ориона-2» и ОАО-2. Похоже на то, что здесь действует какой-то источник поглощения, неучтенный в теории, источник, присущий именно звездам промежуточных классов. Во всяком случае подобное явление — теоретический излишек потока на 2700 Å — не наблюдается у горячих звезд, спектрограммы которых были получены «Орионом-2» и ОАО-2.

На рис. 5.11 и 5.12 приведены некоторые результаты, относящиеся к звездам класса K. И здесь дело обстоит «благополучно» — «орионовские» спектры оказались в согласии, без особых отклонений или аномалий, как с соответствующими теоретическими моделями, так и с наблюдениями ОАО-2 для других звезд тех же подклассов. Из-за очень быстрого спада уровня непрерывного спектра в ультрафиолете звезд класса K проследить за структурой спектра в области депрессии 2800 Å не удалось.

Говоря об особенностях макроструктуры спектров звезд классов F, G, K в ультрафиолете, следует остановиться на поведении отдельных депрессий в их непрерывных спектрах. Наиболее характерные депрессионные полосы находятся на 2950, 2800 и 2500 Å. Депрессия на 2950 Å обусловлена в основном двумя сильными полосами поглощения на 2937 и 2967 Å, принадлежащими нейтральным и ионизованным металлам (железу, титану, магнию). Депрессия на 2800 Å — наиболее часто упоминавшаяся и хорошо известная — обусловлена в основном резонансным дублетом ионизованного магния, резонансной линией нейтрального магния 2852 MgI, довольно сильной линией 2755 FeII, а также линиями нейтральных и ионизованных никеля, титана, хрома и т. д. Наконец, депрессия на 2550 Å обусловлена другой группой линий, принадлежащих нейтральным и ионизованным металлам (железу, никелю, хрому, титану и пр.).

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что мощ-

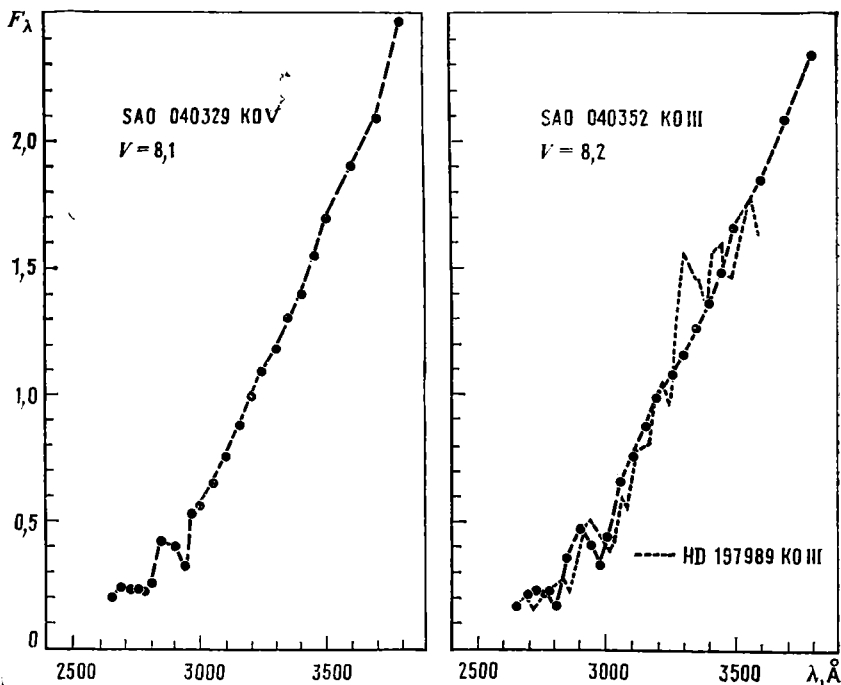


Рис. 5.12. Наблюдаемые распределения энергии в ультрафиолете двух звезд класса K0 (точки), по данным «Ориона-2»:

точечная линия — результаты ОАО-2 для одной звезды класса K0 III — HD 197 989

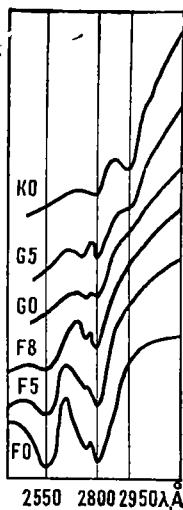


Рис. 5.13. Фрагменты микрофотометрических записей спектров звезд разных спектральных классов в интервале длин волн 2500—3200 Å (усредненные кривые), иллюстрирующие изменение депрессии на длинах волн 2950, 2800 и 2550 Å в зависимости от спектрального класса звезды

ности перечисленных депрессий — на 2950, 2800 и 2550 Å не одинаковы и меняются при переходе от одного спектрального класса к другому. На рис. 5.13 представлены фрагменты усредненных микрофотометрических записей спектров звезд разных спектральных классов в интервале длин волн 2500—3200 Å. Бросается в глаза тот факт, что депрессии, например на 2800 и 2550 Å, намного сильнее у звезд класса F8, чем у звезд более поздних спектральных классов. Депрессия на 2950 Å, характерная для класса K0, едва заметна у звезд типа G5 и совсем отсутствует у звезд G0 и более ранних.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что макроструктура непрерывных спектров звезд в ультрафиолете далеко не постоянна и меняется не только при переходе от одного спектрального класса к другому, но и внутри данного спектрального подкласса [12].

5.3. Комбинированные спектрофотометрические наблюдения — внеатмосферные и наземные

Существует много астрофизических проблем, решение которых требует выноса телескопа и спектрографа за пределы земной атмосферы, — в этом мы убеждаемся постоянно. Немало проблем, разрешаемых по-прежнему лишь наблюдениями в наземных условиях. Возникает вопрос: а существуют ли астрофизические задачи или проблемы, решение которых не представляется возможным иначе как комбинацией обоих типов наблюдений — внеатмосферных и наземных в отношении одной и той же звезды. Оказывается, существуют. Здесь мы ограничимся рассмотрением одного такого примера; как ни странно, он относится к изучению двойных звезд.

Представим себе ситуацию, когда звездная пара, не разрешимая всеми доступными средствами наблюдений, состоит из двух звезд одного и того же спектрального класса (скажем, F2), но одна из них является обычным карликом (класс светимости V), а вторая — гигантом или сверхгигантом (класс светимости II или I). Ясно, что на спектральном снимке этой пары, полученном с помощью объективной призмы, узкие линии поглощения, принадлежащие гиганту или сверхгиганту, теряются внутри широких профилей линий поглощения, принадлежащих карлику. В результате светимость этой пары будет невольно оценена как V, если в качестве критерия для классификации взять значения наблюдаемой ширины линий поглощения.

По сути дела по ширине линий, мы можем в лучшем случае

констатировать лишь факт принадлежности по крайней мере одного из компонентов пары к классу светимости V.

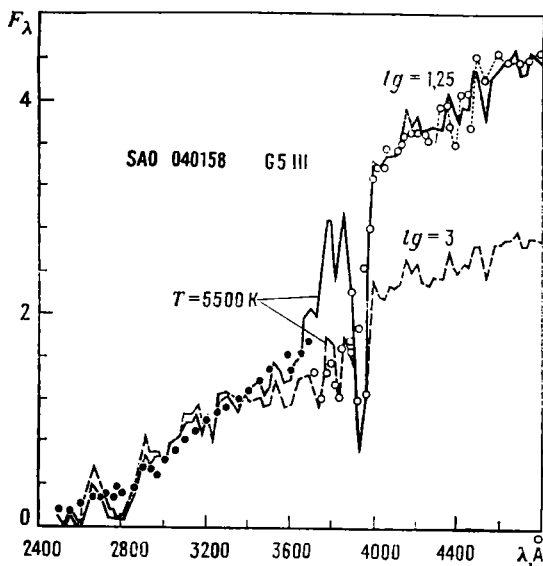
Но если мы будем располагать также данными о наблюдаемом распределении энергии в *непрерывном спектре* указанной пары как в оптическом диапазоне, так и в ультрафиолете, то положение, оказывается, совсем иное. В этом случае перепад или, просто говоря, контраст между общими уровнями непрерывного спектра в оптическом диапазоне (длиннее 3600 Å) и в ультрафиолете (короче 3600 Å) зависит, причем в довольно ощутимой степени, от величины ускорения силы тяжести на поверхности звезды g , т. е. от светимости звезды. При этом минимальный перепад или наименьший контраст мы будем иметь у звезд класса светимости V (g наибольшее). С уменьшением числового значения g класс светимости сдвигается с V до I. Поэтому, фиксируя числовое значение g по величине указанного перепада от одной части спектра к другой на кривой распределения непрерывного спектра, мы тем самым находим класс светимости второго компонента пары; он будет отличаться от класса V тем больше, чем больше будет указанный перепад.

Следовательно, комбинированные наблюдения — наземные и внеатмосферные — позволяют в принципе, найти как спектральные классы, так и в особенности классы светимости компонентов звездных пар, практически неразрешимых в обычных условиях наблюдений с применением объективных призм.

В качестве примера остановимся на истории по расшифровке звездной пары SAO 040158. Эта двойная система согласно каталогу AGK₂ классифицируется как G5 с классом светимости III. Коротковолновая спектрограмма этой пары была получена с помощью «Ориона-2»; найденное в результате обработки этой спектрограммы распределение энергии в диапазоне 2400—3600 Å нанесено точками на рис. 5.14. Для этой звездной пары была получена также длинноволновая спектрограмма в диапазоне 3600—4800 Å с помощью 70-сантиметрового менискового телескопа Абастуманской обсерватории в комбинации с объективной призмой; результаты измерения этой спектрограммы также нанесены кружками на рис. 5.14.

При сопоставлении полученных результатов наблюдений с теорией оказалось, что весь этот диапазон — от 2400 до 4800 Å — нельзя охватить одной теоретической кривой, рассчитанной для заданной эффективной температуры T_{eff} и заданного значения ускорения силы тяжести на поверхности звезды g . В нашем случае по крайней мере один из компонентов пары является звездой светимости III, для которой $\lg g = 3$. Теоретическая кривая

Рис. 5.14. Распределение энергии в непрерывном спектре звездной пары SAO 040158 в ультрафиолете на длинах волн короче 3600 Å (точки «Орион-2») и в оптическом диапазоне, на длинах волн более 3600 Å (кружки, Абастуманская обсерватория). Нанесены также теоретические кривые для двух случаев: $T_{\text{eff}}=5500$ К и $\lg g=3$; $T_{\text{eff}}=5500$ К и $\lg g=1,25$. Согласно с наблюдениями имеет место только во втором случае, что соответствует классу светимости I для второго компонента этой пары



при $T_{\text{eff}}=5500$ К (звезда класса G5) действительно хорошо согласуется с наблюдениями, но лишь в ультрафиолете — в области 2400—3600 Å. В области же длинных волн эта теоретическая кривая оказалась намного ниже наблюдаемых точек (см. рис. 5.14). Но когда на эту кривую мы накладываем теоретическую кривую, соответствующую параметрам фотосферы звезды при $T_{\text{eff}}=5500$ К и $\lg g=1,25$, согласие получается обоюдно удовлетворительным — как в ультрафиолете, так и в оптическом диапазоне. Но значение $\lg g=1,25$ соответствует сверхгигантам, т. е. звездам с классом светимости I. Стало быть, если класс светимости одного из компонентов этой пары III, то класс светимости второго компонента должен быть I. Разница заключается в том, что в первом случае класс светимости был установлен классическим способом — по ширине линий поглощения, во втором же — по характеру непрерывного спектра.

Описанным способом были установлены классы светимости еще у нескольких пар. Ниже приводится перечень этих объектов с указанием класса светимости обоих компонентов.

Звезда пары	Спектральные классы компонентов
SAO040251	F2IV+C0III
040008	F8IV+F8I
040370	F8V+F8I
040158	G5III+G5I

До недавнего времени метод комбинированных наблюдений — наземных и внеатмосферных — успешно применялся при открытии *белых карликов* в двойных системах, основным компонентом которых является нормальная звезда позднего класса. Здесь же, как видим, речь идет о выявлении этим методом обычной высокотемпературной звезды сравнительно низкой светимости в звездной паре, основным компонентом которой является гигант или сверхгигант позднего типа [13].

5.4. Сильные линии поглощения в спектрах холодных звезд

Спектральные снимки «Ориона-2» не были предназначены для выделения и отождествления спектральных линий — спектральное разрешение нашей объективной призмы было недостаточно высокое для этой цели. Несмотря на это, в спектрах многих звезд промежуточных и поздних классов удалось выделить, причем с достаточной уверенностью, полтора десятка линий, вернее, полос поглощения. В качестве примера на рис. 5.15 приведены микрофотометрические записи трех «орионовских» спектров одной звезды класса F5, SAO 040077 с указанием наиболее четко выделенных линий поглощения. Длины волн центров этих линий-полос приведены в табл. 5.2 с указанием вероятных отождествлений. Сами линии-полосы принадлежат главным образом нейтральным и ионизованным металлам — железу, хрому и т. д.

Наиболее сильным в спектрах звезд рассмотренных классов, F—G—K, является ультрафиолетовый дублет ионизованного магния 2800 MgII; как линия поглощения этот дублет достигает наибольшей силы у звезд спектрального типа F и выступает в виде эмиссии начиная с K2. Сильны и достаточно хорошо выде-

Таблица 5.2

Наиболее сильные ультрафиолетовые линии (полосы) поглощения в спектрах звезд классов F—G

Длина волны, Å	Вероятное отождествление	Длина волны, Å	Вероятное отождествление	Длина волны, Å	Вероятное отождествление
3080	Fe I, Ti II	2800	Mg II	2512	Si I, Cr II
2967	Fe I	2755	Fe II	2470	Fe II
2937	Fe I, Ti II,	2610	Fe II, Ni II	2405	Fe II, Ni II
	Mg II	2570	Fe II, Ti II,	2385	Fe II, Mo II
2882	Si I		Ni II		
2852	Mg I	2540	Fe II, Cr II		

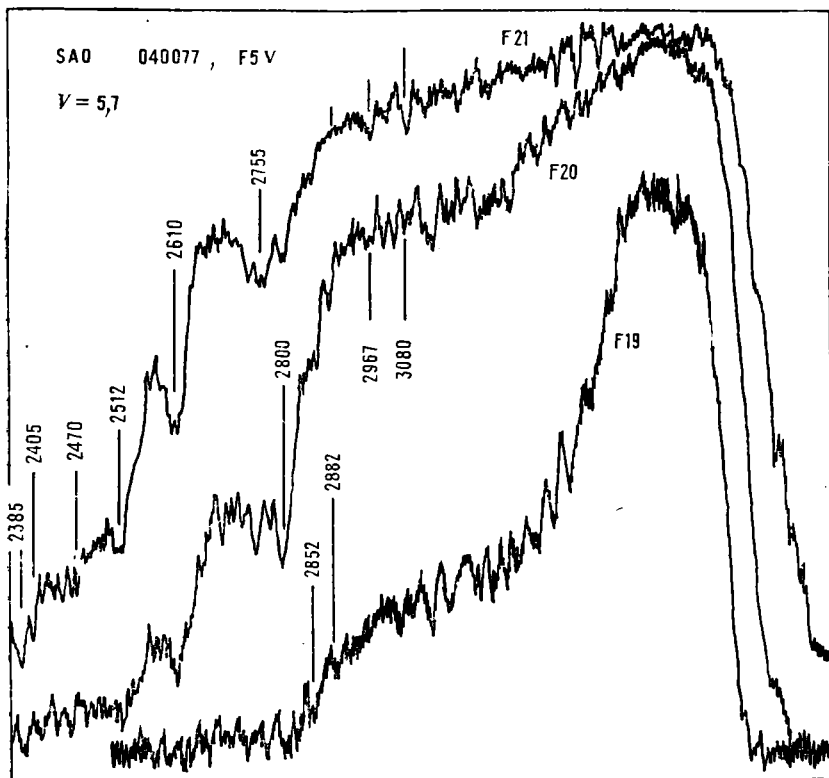


Рис. 5.15. Микрофотометрические записи трех коротковолновых спектрограмм звезды SAO 040077 класса F5, полученных «Орионом-2» при экспозициях 18 мин (кадр F-21), 1,5 мин (F-20) и 15 с (F-19). Указаны наиболее сильные линии поглощения

ляются также линии поглощения ионизованного железа 2755 FeII и резонансная линия нейтрального магния 2852 MgI. Что касается линий 2967 FeI и 2937 FeI, то они слабо выражены у звезд спектрального класса F и достаточно сильно у звезд типа K. Линия-полоса 3080 Å, которую мы отождествили с мультиплетом № 5 ионизованного титана, относительно слаба у звезд F0—F2, потом, достигая максимума у классов F5—F8, ослабевает у классов G—K.

ДУБЛЕТ 2800 Mg II В ЗВЕЗДНЫХ СПЕКТРАХ

6.1. Первые результаты

Еще на заре космических полетов известный американский специалист по звездным спектрам Мерилл (Merill) предсказал громадное значение интереснейших ультрафиолетовых линий 2796 MgII и 2803 MgII — дублета (пара линий) однажды ионизованного магния — при решении многих проблем астрофизики. Даже одно установление прямыми наблюдениями характера поведения этого дублета — обозначают его условно 2800 MgII — в спектрах звезд разных типов очень ценно для физики звездных атмосфер.

Поучительна история дублета 2800 MgII в звездных спектрах. До середины шестидесятых годов Солнце было единственной звездой (класса G2), в спектре которой были зарегистрированы очень сильные линии поглощения дублета MgII. В 1970 г. появилось сообщение американских астрофизиков о регистрации этого дублета с помощью высотной ракеты в спектре Канопуса — звезды класса F0. Через год (в 1971 г.) спектрограф с дифракционной решеткой космической обсерватории «Орион-1» на борту орбитальной станции «Салют-1» фотографирует дублет MgII умеренной силы в спектре Веги — звезды класса A0 (рис. 6.1). Едва заметная линия 2800 MgII в спектре горячей пекулярной звезды γ Cas (BO) регистрируется с помощью орбитальной обсерватории ОАО-2. Спустя два года, в 1973 г., голландские астрофизики публикуют свои результаты по наблюдению дублета MgII в спектрах 31 яркой звезды с помощью ор-

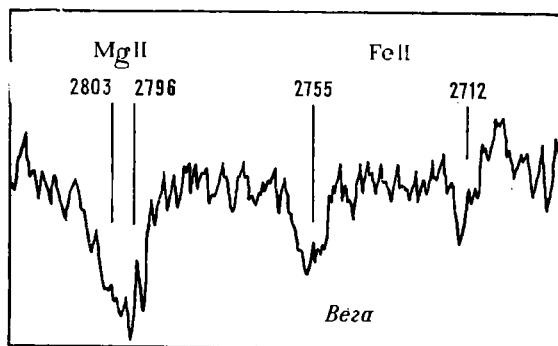


Рис. 6.1. Дублет 2800 MgII в спектре Веги (A0 V). Запись сделана со спектрограммы этой звезды, полученной в 1971 г. с помощью орбитальной обсерватории «Орион-1», (на «Салюте-1») в диапазоне длин волн 2000—3500 Å

битальной обсерватории TD-1A (эксперимент S-59). Во всех перечисленных случаях, однако, наблюдения ограничиваются только яркими звездами — ярче 4^m. Еще через два года, в 1975 г., появляются в печати первые результаты «Ориона-2» по измерению дублета 2800 MgII в спектрах 51 относительно слабой звезды.

В первой статье, посвященной упомянутым звездам, приводятся результаты наблюдений по дублету 2800 MgII в поглощении в спектрах сравнительно слабых звезд — до 10^m, охватывающих к тому же спектральные классы B2 — K5. При этом у относительно ранних классов (до K0) дублет 2800 MgII наблюдается в виде одной общей полосы поглощения, без разделения на компоненты, дальше — в виде слабой эмиссионной линии. В нескольких случаях дублет MgII был обнаружен как будто в комбинированном виде — широкая полоса поглощения с едва заметной эмиссией в центре.

6.2. Наблюдения «Ориона-2»

Материал наблюдений с помощью космической обсерватории «Орион-2» получен в декабре 1973 г. Спектральные снимки были сфотографированы с помощью менисковой камеры и объективной призмы. Спектральное разрешение на 2800 Å оказалось не хуже 25 Å, при дисперсии 420 Å·мм⁻¹ и в сочетании с достигнутой в реальных условиях полета «Ориона-2» точностью стабилизации. При таком разрешении, конечно, нельзя надеяться на очень высокую точность измерений дублета MgII. Однако в силу высокой однородности и массовости полученного материала его обработка дала возможность сделать некоторые выводы, касающиеся поведения 2800 MgII в атмосферах звезд самых разных типов.

Ниже приводятся результаты обработки около 120 спектрограмм для 51 звезды. Основная часть этих звезд находится в Возничем, в окрестностях Капеллы, остальные — в Парусах (λ Vel) и Корме (ξ Pup). Спектрограммы были получены на фотопленке Кодак 103-O-UV с экспозициями 10 с (кадр F 52), 15 с (F 19, 53, 54, 55), 1,5 мин (F20) и 18 мин (F21). Их микрофотометрические записи получены на МФ-4 и ИФО-451. Были трудности с отождествлением самой линии 2800 MgII, когда она была очень слабая; это имело место и для звезд ранних и очень поздних классов.

Однако у звезд промежуточных классов дублет MgII на сним-

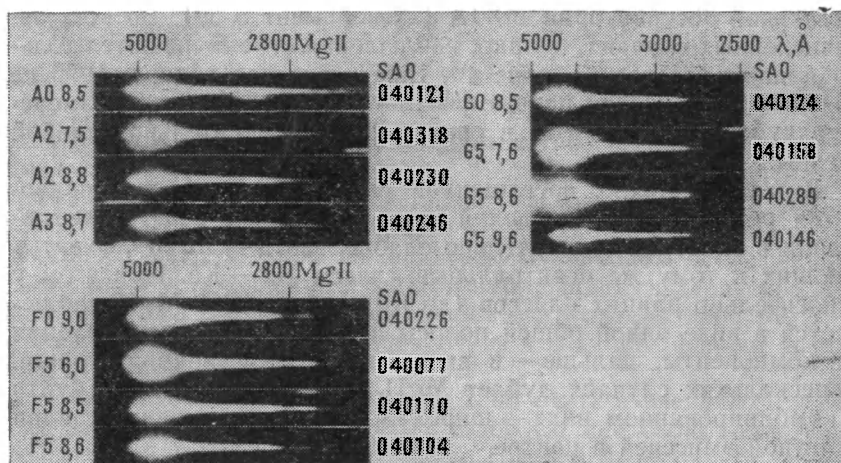


Рис. 6.2. Звездные ультрафиолетовые спектры, на которых виден дублет 2800 MgII в поглощении. Спектрограммы получены с помощью «Ориона-2» на фотопленке Кодак 103-0-UV

ках спектров определялся даже на глаз. В качестве иллюстраций на рис. 6.2 приведены образцы таких спектрограмм.

6.3. Результаты измерений 2800 Mg II

Списки исследованных в настоящей статье звезд приведены в табл. 6.1 и 6.2 в обозначениях Каталога Смитсоновской астрофизической обсерватории (SAO) и Генри Дрепер (HD) с указанием их V или m_p величин и спектральных классов. В столбцах $W(2800)$ представлены найденные нами эквивалентные ширины дублета MgII во всех тех случаях, когда он присутствует в виде линии или полосы поглощения. Данные табл. 6.1 и в особенности табл. 6.2 дают некоторое представление о точности наших измерений; они в большинстве случаев лучше 30 %. Ошибки вызваны чаще всего традиционной причиной — трудностью проведения уровня непрерывного спектра, а также установления пределов, до которых простираются крылья линий с обеих сторон от ядра звезды — имеется в виду эффект блокировки металлическими линиями, который сказывается особо сильно у звезд классов A и F. Заметно также, что величины $W(2800)$, найденные по кадру F21, оказались несколько заниженными, что, по-видимому, является результатом эффекта

Таблица 6.1

Эквивалентная ширина W (2800) резонансного дублета ионизованного магния 2800 Mg II в спектрах звезд, по данным «Ориона-2» (область Капеллы) ¶

Звезда SAO	m_p	Спектральный класс	(2800), Å			Примечания
			F 20	F 21	Средняя	
040183	6,9	B2	—	—	2	По F 19
093	9,1	(B5)	2,5	—	2,5	
244	8,9	B9	4,8	—	4,8	$W = 5,6$ по F 19
167	7,5	B9	6,4	5,0	5,6	
121	8,5	A0	3,8	—	3,8	
194	9,0	A0	4,6	—	4,6	
223	8,2	A0	5,0	—	5,0	
070	9,1	A0	6,0	—	6,0	
310	9,1	A0	—	6,0	6,0	
230	8,8	A2	5,0	—	6,0	
318	8,2	A2	10	—	10	
323	8,8	A2	11	—	11	
105	9,0	A3	9	—	9	
246	8,7	A3	10	—	10	
166	9,8	(A8)	—	22	22	
256	8,5	F0	32	20	26	
226	9,0	F0	31	24	27	
136	9,1	F0	—	29	29	
251	7,4	F ₂	23	—	23	$W = 58$ по F 19
040191	8,3	(F0)	32	25	29	
170	8,5	F5	31	34	32	
104	8,6	F5	46	42	44	
077	6,0	F5	42	—	50	
008	7,2	F8	—	36	36	
124	8,5	G0	46	53	50	
289	8,6	G5	46	43	45	
158	7,6	G5	29	30	30	
146	9,4	G5	23	27	25	
142	9,6	G5	19	25	22	
159	9,6	K0	—	23	23	
374	9,2	K0	—	12	12	
242	7,6	K0	12	8	10	
341	8,7	K2	—	Эмиссия	—	
296	9,2	K5	Эмиссия	»	—	Также 3083 Ti II в эмиссии
040203	8,6	K5	»	»	—	То же
						Эмиссия в 2800 и 3073 сомнительна

«размазывания», неизбежного при длительных экспозициях из-за постоянных «соскоков» следящей системы.

Таблица 6.2

Эквивалентная ширина W (2800) резонансного дублета 2800 Mg II в спектрах горячих звезд, по данным «Ориона-2» (области Паруса и Кормы)

Звезда, HD	V	Спектр	W (2800), Å	n^*
λ Vel (F53, F54, F55)				
78616	6 ^m ,78	B1	3,2±0,8	4
77320	6,08	B2 V ne	2,7±0,4	4
76838	7,31	B3 V	4	1
79186	5,00	B3 Ia	3,5±0,7	3
79735	5,24	B4 V	2,1±0,4	8
77475	5,54	B5 V	4,5±0,7	3
76898	7,39	B5 V	5,4	1
79694	5,84	B6 IV	4,7±1,3	2
79416	5,56	B8 V	5,6±1,6	2
SAO 221041	7,2	B8	3,8±0	2
79900	6,24	A0	7,0±1,5	4
80205	6,73	A0	4,0	1
ζ Pup (F52)				
64503	4,50	B3 V	1,5	1
69253	6,62	B4 V	2,8	1
67888	6,40	B5 IIIe	1,3	1
66624	5,50	B9	2,5	1

* n — число измеренных спектрограмм.

По своему общему характеру область спектра на 2800 Å оказалась довольно разнообразной у звезд разных классов. Это легко заметить на приведенных на рис. 6.3 фрагментах микрофотометрических записей. Что касается найденных нами значений эквивалентной ширины W (2800), то они оказались в согласии с величинами, полученными другими авторами для звезд сходных типов. Например, для Канопуса, сверхгиганта класса F0 W (2800) = 22 Å (Кондо и др.), для звезд класса B от 1 Å до 4,5 Å (Ламерс и др.), а для звезд класса A — от 3,5 до 11 Å и т. д. Максимальное значение W (2800) в наших таблицах равно 50 Å (даже 60 Å по F19) и соответствует звезде класса F5. Раньше W (2800) = 66 Å было найдено Качаловым и Яковлевой для Солнца, звезды класса G2.

Довольно велик разброс в величинах W (2800) среди звезд одного и того же спектрального подкласса. Конечно, в какой-то степени этот разброс вызван ошибками измерения. Но нередки

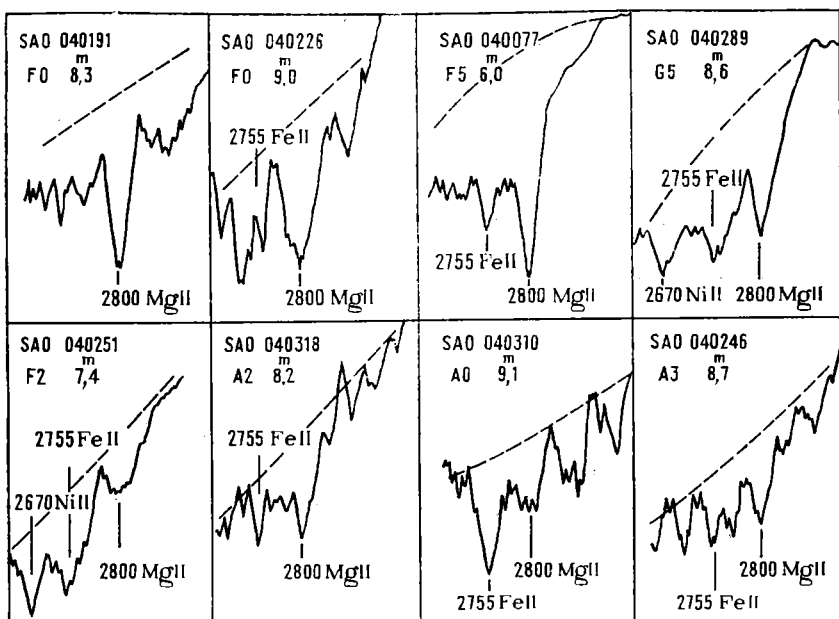


Рис. 6.3. Примеры денситометрических записей областей спектров около 2800 MgII для звезд разных спектральных классов. Спектральные снимки получены с помощью «Ориона-2»

как раз те случаи, когда внутреннее расхождение в величинах $W(2800)$ превышает вероятную ошибку измерения. Такая же картина наблюдается и в тех случаях, когда измерения проводятся с значительно высокой точностью ($TD=1$, $S=59$). Поэтому следует думать, что разброс в величинах $W(2800)$ в основном реален и обусловлен специфическими особенностями атмосфер звезд одного и того же подкласса. Если это утверждение подтвердится в дальнейшем, то, возможно, ультрафиолетовый дублет MgII станет наиболее чувствительным индикатором для изучения физических условий в атмосферах звезд.

6.4. Влияние межзвездного ионизованного магния

Исследованные нами звезды относительно слабые, и поэтому найденные для них из прямых наблюдений величины $W(2800)$ нуждаются в исправлении с учетом влияния межзвездного маг-

ния, вызывающего дополнительное поглощение. В связи с этим необходимо знать расстояние звезды r , а также исходить из определенной модели для межзвездных облаков. Ввиду не очень высокой точности наших определений W_{obs} ограничимся оценочными результатами для W_{int} . Соответственно расстояние звезд находим по их абсолютной светимости, без поправки на межзвездное покраснение, а в качестве межзвездного облака принимаем модель, согласно которой эквивалентная ширина дублета 2800 MgII на одно облако диаметром в 100 пк равна 0,14 Å. Тогда величина межзвездного компонента эквивалентной ширины 2800 MgII, соответствующая расстоянию r , будет $W = 0,14 \frac{r}{100} \text{ Å}$.

Как показывают расчеты, для звезд класса A2 и более поздних из нашего списка, для которых $r \sim 300$ пк, W_{int} меньше 0,4 Å, относительная величина самой межзвездной составляющей, $W_{\text{int}}/W_{\text{obs}}$, меньше 10 %, а следовательно, вводить соответствующую поправку в наблюдаемую величину W_{obs} нет смысла.

Иначе обстоит дело в случае звезд ранних классов (A0 и ранее). Как следует из приведенных в табл. 6.3 результатов, относительная доля W_{int} порядка 10 % у звезд A0 и больше 50 % у звезд ранних подклассов B.

Таким образом, у слабых звезд класса B, находящихся на расстояниях порядка 1000 пк и больше ($V \sim 8 \dots 10$), наблюдаемые эквивалентные ширины дублета MgII практически обусловлены в основном межзвездным ионизованным магнием.

Из-за невысокой точности найденных нами величин $W(\text{MgII})$ их сравнение с теорией не может быть проведено достаточно уверенно. Тем не менее такое сопоставление было сделано и оно привело к следующему заключению: найденные из наблюдений и исправленные с учетом влияния межзвездного магния эквивалентные ширины 2800 MgII в большинстве случаев оказались больше теоретически предсказанных величин. Вместе с этим имеются и случаи совпадения с теорией. При сопоставлении теоретических результатов с результатами наблюдений в случае звезд классов B0 — A0 реальная ситуация такова:

Спектральный подкласс	$W(2800 \text{ Mg II}), \text{ Å}$	
	Теория (Mihalas)	Наблюдения «Ориона-2»
B1—B2	0,4—0,6	0,6—2,3
B3—B5	0,7—1,1	1,5—4,5
B8—A0	2,5—5,1	4—7

Таблица 6.3

Эквивалентная ширина межзвездной составляющей дублета 2800 Mg II и отношение $W_{\text{int}}/W_{\text{obs}}$ для группы горячих звезд по данным «Ориона-2»

Звезда	Спектральный класс	Расстояние, пк	λ , Å	$W_{\text{int}}/W_{\text{obs}}$	Звезда	Спектральный класс	Расстояние, пк	λ , Å	$W_{\text{int}}/W_{\text{obs}}$
SAO 040183	B2	1000	1,4	0,7	194	A0	460	0,65	0,1
093	B(5)	1400	2,0	0,8	223	A0	330	0,45	0,1
244	B9	550	0,8	0,2	070	A0	500	0,7	0,1
167	B9	300	0,4	0,1	310	A0	500	0,7	0,1
121	A0	370	0,5	0,1	230	A0	330	0,45	0,1

Заметим, что подобное расхождение теории с наблюдениями было обнаружено и в случае более точных наблюдений голландских астрофизиков (Lamers и др.) и оно, по всей вероятности, реально.

Кстати, если принять для эквивалентной ширины межзвездной линии 2800 MgII значение в два раза больше, т. е. 0,28 Å на одно облако, тогда указанное расхождение теории с наблюдениями исчезает почти полностью. По-видимому, выбор модели для межзвездного магния существенен.

6.5. Депрессия непрерывного спектра у звезд F—G

Судя по результатам наших измерений, дублет 2800 MgII достигает наибольшей силы у звезд спектральных классов F5—G0; для них $W(2800)$ порядка 50 Å. У этих звезд дублет 2800 MgII до того мощный и пространственный, что по существу приводит к образованию сильной и широкой депрессии непрерывного спектра около 2800 Å. Эта депрессия начинается примерно на 2900 Å и простирается до 2700—2650 Å, т. е. охватывает полосу шириной более 200 Å симметрично с обеих сторон линии. Если к тому же иметь в виду, что у этих звезд область 2800 MgII находится на нисходящей части непрерывного спектра, то указанная депрессия иногда может привести к скачкообразному падению или резкому обрыву непрерывного спектра на 2800 Å. Кстати, это обстоятельство — обрыв спектра на 2800 Å и практическое его исчезновение с коротковолновой стороны — может служить достаточным критерием для отождествления со звездой класса F.

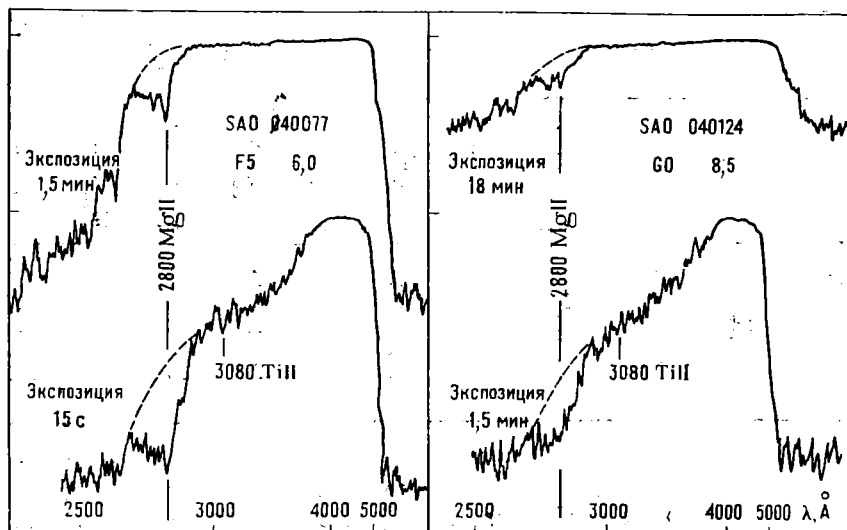


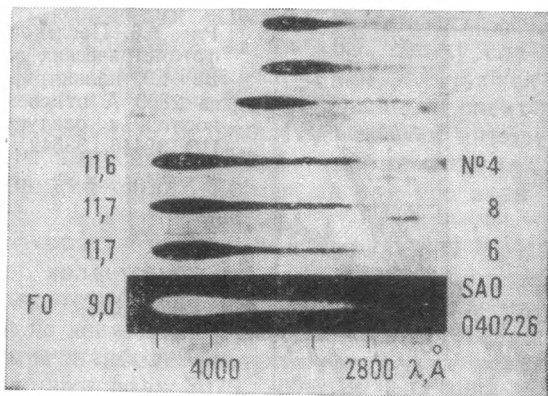
Рис. 6.4. Микрофотометрические записи спектров звезд SAO 040077 класса F5 и SAO 040124 класса G0. Широкая и мощная депрессия непрерывного спектра на 2800 Å видна даже на спектрограммах, полученных с меньшими экспозициями. Спектрограммы получены с помощью «Ориона-2»

В качестве иллюстрации на рис. 6.4 приведены два примера — по две микрофотометрические записи двух спектрограмм, полученных с разными экспозициями для звезд SAO 040077 класса F5 (экспозиции 15 с и 1,5 мин) и SAO 040124 класса G0 (экспозиции 1,5 мин и 18 мин). На этих записях отчетливо видны «шрамы», оставленные дублетом 2800 MgII при больших экспозициях, и резкий обрыв — при малых. На этих примерах можно убедиться также в трудностях определения уровня непрерывного спектра в пределах депрессии и в измерениях интенсивности самой линии 2800 MgII.

Наконец, на рис. 6.5 приведены спектрограммы трех звезд (№ 4, 8 и 6) почти двенадцатой величины и ранее неизвестных классов в качестве иллюстрации способа их отождествления со звездой класса F только по характеру непрерывного спектра на 2800 Å и короче (эти спектрограммы взяты из кадра F21, экспозиция 18 мин). Для сравнения там же внизу приведена спектрограмма известной звезды класса F0, SAO 040226, взятая из кадра F20 (экспозиция 1,5 мин).

Рис. 6.5. Пример отождествления звезд неизвестных типов ГЛКА № 4, 8 и 6 со спектральным классом F по эффекту резкого обрыва непрерывного спектра на 2800 Å (экспозиция 18 мин).

Три спектрограммы сверху принадлежат слабым звездам поля. Снизу для сравнения показана спектрограмма звезды SAO 040226 класса F0 (экспозиция 1,5 мин). Все спектрограммы получены «Орион-2».



Отмеченное явление — существование широкой депрессии вблизи 2800 Å у звезд классов F—G — предъявляет определенное требование к некоторым параметрам измеряющей аппаратуры (спектрографу или спектрометру), а именно, рабочий диапазон должен быть не менее 200 Å на 2800 Å. Этим и следует объяснить, в частности, сильно заниженные величины эквивалентной ширины 2800 MgII, найденные для звезд класса F0 и более поздних в успешно проведенном эксперименте голландских астрофизиков S-59, где рабочий диапазон спектрометра был выбран, к сожалению, недостаточно широким — всего 90 Å.

Говоря о депрессии на 2800 Å, следует еще раз отметить сильно выраженную зависимость ее мощности от спектрального класса звезды — она, эта депрессия, усиливается с переходом от звезд классов B до F—G; в этом не трудно убедиться, обратившись к рис. 6.6, где приведена последовательность фрагментов записей спектров в области 2800 Å для случайно взятых звезд разных классов. Эта особенность — зависимость мощности депрессии на 2800 Å от спектрального класса звезды может быть использована, в частности, для целей спектральной классификации звезд, на чем подробно остановимся в гл. 10.

6.6. Дублет 2800 Mg II в эмиссии

Наблюдения «Ориона-2» не подтверждают присутствия дублета 2800 MgII в виде линии поглощения у звезд класса K2 и более поздних. Скорее всего наоборот: имеются признаки присутствия дублета в виде эмиссии. Этот вывод находится в согласии, в частности, с наблюдениями OAO-2 (Doherty).

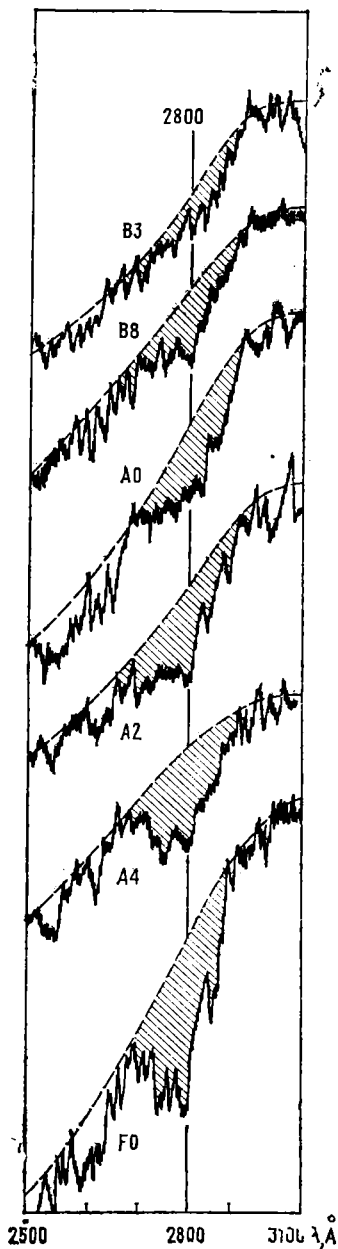


Рис. 6.6. Последовательность фрагментов микрофотометрических записей спектров звезд классов B3—F0, иллюстрирующая зависимость депрессии на 2800 Å от спектрального класса. Записи относятся к следующим звездам (сверху вниз): HD 32446, 33542, 34380, 33332, 32619 и 34331

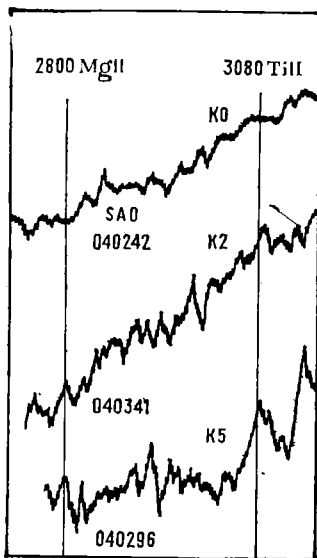


Рис. 6.7. Микрофотометрические записи спектров двух звезд классов K2 и K5, на которых дублет 2800 MgII и мультиплет 3080 TiII выступают в эмиссии одновременно. В спектре звезды класса K0 (сверху) эмиссия отсутствует как в линии 2800 MgII, так и в линии 3080 TiII («Орион-2»)

Две спектрограммы из коллекции «Ориона-2», относящиеся к звездам классов K2 и K5, показаны на рис. 6.7. Ввиду слабости самих линий 2800 MgII (они иногда мало чем отличаются от «шумов» фотоэмульсии) и запутанности непрерывного спектра в этой области трудно говорить о точном измерении интенсивностей дублета MgII в эмиссии; весьма приблизительная оценка дает величину порядка одного ангстрема для его эквивалентной ширины.

Новым и любопытным свойством звезд, у которых 2800 MgII выступает в виде эмиссии, является то, что в их спектрах линия 3080 Å вроде также присутствует в эмиссии. Эту линию мы отождествляем с группой из девяти линий ионизованного титана (мультиплет № 5), четыре наиболее сильные линии из которых — резонансные, с длинами волн 3073, 3075, 3078 и 3088 Å. Это свойство — одновременное присутствие 2800 MgII и 3080 TiII в эмиссии — по крайней мере в упомянутых выше случаях (SAO 040341 класса K2 и SAO 040296 класса K5) выражено достаточно четко. Вместе с тем имеются случаи (SAO 040203 класса K5), когда присутствие дублета MgII в эмиссии действительно вызывает сомнение и одновременно нет признаков присутствия 3080 TiII в эмиссии.

Следует отметить, что когда 2800 MgII наблюдается как линия поглощения, то 3080 TiII также присутствует в виде поглощения. Это утверждение вроде бы достаточно явно иллюстрируется микрофотометрической записью спектра SAO 040077, звезды класса F5 (см. рис. 6.4).

Таким образом, создается впечатление, что в звездных спектрах линии 2800 MgII и 3080 TiII выступают в унисон: обе одновременно либо в эмиссии, либо в поглощении. Некоторая неуверенность в подобной ситуации заключается в том, что титан по сравнению с магнием на два порядка менее обилен в звездных атмосферах. Может быть условия (и разные области) возбуждения этих линий в звездных атмосферах разные?

6.7. Дублет Mg II одновременно в эмиссии и поглощении

Материалы наблюдений, полученные «Орионом-2», хотя нельзя утверждать это с полной определенностью, как будто позволяют выделить случаи присутствия дублета 2800 MgII в комбинированном виде, т. е. в виде широкой линии поглощения со слабой эмиссией в центре. Эти случаи отмечены в табл. 6.1 (последние четыре звезды), а на рис. 6.8 показана структура их спектров в области этого дублета. Характерно, что такая

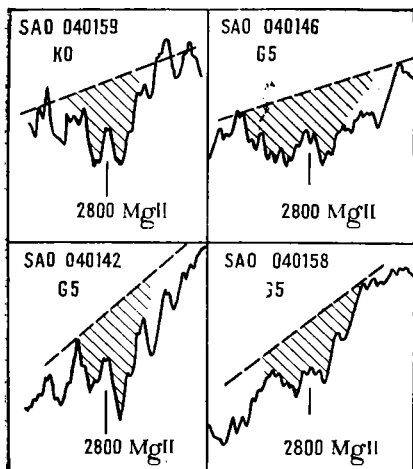


Рис. 6.8. Примеры комбинированных профилей дублета 2800 MgII — широкая линия поглощения со слабой эмиссионной линией в центре («Орион-2»)

комбинированная структура образует своего рода переходный тип G5—K0, ранее которого 2800 Mg II присутствует в виде чистого поглощения, а позднее — в виде чистой эмиссии.

Комбинированные профили 2800 Mg II, если их реальное существование подтвердится в дальнейшем, могут представить определенный интерес, поскольку в этом случае появляется возможность непосредственного со-

поставления между собой некоторых физических параметров верхних слоев фотосферы, где линия 2800 Mg II рождается в виде поглощения, и хромосферы, где она формируется в виде эмиссии. Однако сначала надо убедиться в достоверности существования комбинированных профилей.

.8. Сверхмощные хромосферы, открытые «Орионом-2»

Есть основание утверждать, что первая сверхмощная звездная хромосфера была открыта «Орионом-2» задолго до того, как еще несколько подобных объектов было открыто позднее с помощью орбитальных обсерваторий *Cornet* и *IUE*.

Самой сильной эмиссионной структурой в спектрах звезд промежуточных и поздних классов является дублет 2800 MgII в эмиссии, возбуждаемый только в хромосферах. Поэтому дублет 2800 MgII можно использовать в качестве надежного детектора для открытия хромосферы у той или иной звезды. Вместе с тем в настоящее время стало очевидным, что в балансе излучательной способности звездных хромосфер на эмиссию в линиях 2800 MgII приходится больше половины. Поэтому говорить о наличии «магниевого» хромосферы у той или иной звезды равносильно рассмотрению хромосферы, вообще в целом взятой.

Менисковый телескоп «Ориона-2» в комбинации с объективной призмой не был предназначен для регистрации спектраль-

ных линий, в особенности эмиссионных. Несмотря на это, по крайней мере в спектрах трех звезд выявились довольно сильные эмиссионные линии 2800 MgII. Эти звезды следующие:

SAO	040769	G5 V	$V=6,4$
SAO	040296	K2	$V=8,3$
GC	7554	M3III	$V=4,6$

Микрофотометрические записи «орионовских» ультрафиолетовых спектров указанных звезд воспроизведены на рис. 6.9—6.11 (записи сняты на ИФО-451). Коротковолновая граница длин волн на этих записях простирается почти до 2500 Å. Здесь отчетливо выделяется дублет 2800 MgII в эмиссии. Звезда SAO 040296 класса K5, самая слабая ($V=8,3$) из приведенных выше звезд, и возможно из-за этого и линия 2800 MgII в ее спектре в эмиссии выделяется не очень явно. На спектрах же остальных двух звезд, значительно более ярких — SAO 040769 и GC 7554, этот эмиссионный дублет выделяется довольно уверенно. Мы можем определить, вернее, оценить излучательную способность «магниево» хромосферы этих звезд. Наиболее удобной формой оценки может служить «относительная мощность» магниево хромосферы, представляющая собой отношение полной энергии E_{ch} , излучаемой в линии 2800 MgII, к полной (болометрической) излучательной способности звезды E_* . Имеем:

$$\frac{E_{ch}}{E_*} = \frac{W(\text{Mg II}) B_\lambda(T_*)}{\sigma T_*^4},$$

где $W(\text{MgII})$ есть эквивалентная ширина эмиссионной линии 2800 MgII; $B_\lambda(T_*)$ — функция Планка при эффективной температуре звезды T_* и на длине волны $\lambda=2800$ Å; σ — постоянная Стефана — Больцмана.

Эквивалентные ширины $W(\text{MgII})$ для двух из упомянутых выше трех звезд SAO 040769 и GC 7554 были найдены непосредственно из микрофотометрических записей их спектров. Что касается звезды SAO 040269, то эквивалентную ширину линии 2800 MgII не удалось найти из-за крайне низкого уровня непрерывного спектра на записи в ультрафиолете; для этой звезды оценка отношения E_{ch}/E_* была сделана косвенными методами.

Описанным способом были найдены следующие значения E_{ch}/E_* для наших трех звезд.

Звезда	Спектр	T_*, K	$W(\text{MgII}), \text{\AA}$	E_{ch}/E_*
040769	G 5 V	5500	14	$50 \cdot 10^{-5}$
7554	M 3 III	3000	22	$3,5 \cdot 10^{-5}$
040269	K 5	—	—	$10 \cdot 10^{-5}$

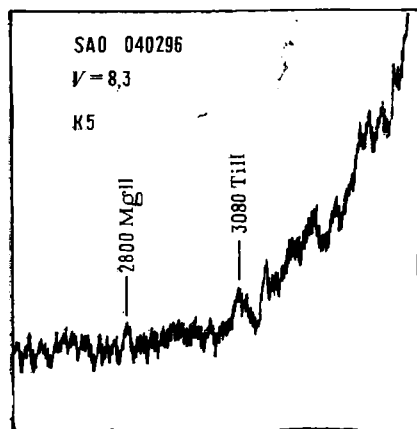


Рис. 6.9. Хромосферная эмиссионная линия 2800 MgII в спектре относительно слабой звезды класса K5, SAO 040296. Видна также линия 3080 TiII в эмиссии («Орион-2»)

В период осуществления эксперимента «Орион-2» (1973 г.) хромосферы были открыты всего у нескольких звезд (Doherty). В настоящее время магниевые хромосферы открыты и измерены отношения E_{ch}/E_* у 120 звезд спектральных классов позднее F0. Для Солнца, например, это отношение равно $2 \cdot 10^{-5}$. У подавляющего числа звезд отношение

E_{ch}/E_* имеет в среднем такой же порядок. И только у нескольких звезд отношение E_{ch}/E_* больше $10 \cdot 10^{-5}$; в таких случаях можно говорить о «сверхмощных» хромосферах. Эти звезды следующие (Basri, Linsky):

Звезда	Спектральный класс	E_{ch}/E_*
UX Ari	G5 V+K0 IV	44
HR 1099	G5 V+K0 V	53
λ And	G8 III	18
β Dra	G2 II	10

Следует отметить, что по крайней мере две из этих четырех звезд являются двойными системами типа RS CVn.

Таким образом, за несколько дней работы «Ориона-2» на орбите были открыты две сверхмощные хромосферы, а почти за десять лет функционирования на орбите космических обсерваторий типа Soregnicus или IUE были открыты всего четыре сверхмощные хромосферы. Объясняется такое расхождение очень просто: «Орион-2» охватывает на одном кадре одновременно несколько сотен или даже тысяч звезд, в то время как в остальных экспериментах звезды «захватываются» и регистрируются по одной.

Создается впечатление, что в «орионовских» спектрах вышеупомянутых трех звезд присутствует еще одна эмиссионная линия с длиной волны $\sim 3080 \text{ \AA}$, которую мы отождествили с мультиплетом № 5 ионизованного титана. Эта линия видна достаточ-

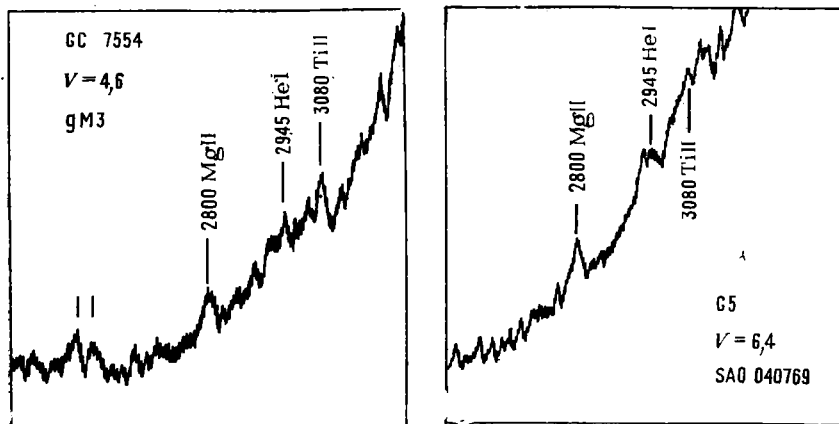


Рис. 6.10. Микрофотометрическая запись «орионовского» спектра одной звезды-гиганта позднего класса, M3 III, GC 7554. Видна мощная хромосферная линия 2800 MgII. Видна также линия 3080 TiII, линия 2945 HeI сомнительна. Две отмеченные линии слева (~2560 Å) кажутся сомнительными

Рис. 6.11. Микрофотометрическая запись ультрафиолетовой спектрограммы звезды SAO 040769 класса G5, полученной с помощью «Ориона-2». Видна мощная хромосферная эмиссионная линия 2800 MgII. Реальность линий 3080 TiII и 2945 HeI сомнительна

но хорошо в спектрах звезд K5 и M3 и менее четко в спектре звезды G5. Однако реальность этой эмиссионной структуры сомнительна и вопрос нуждается в дополнительном рассмотрении.

Что касается линии 2852 MgI, то она как будто совсем отсутствует в эмиссии в спектрах упомянутых выше трех звезд, хотя в отдельных случаях можно подметить признаки очень слабой эмиссии (например, у GC 7554). Но линия 2852 MgI отсутствует также и в виде поглощения. А, может быть, последняя несомненно фотосферного происхождения, была залита эмиссией в той же линии хромосферного происхождения? И этот вопрос нуждается в отдельном рассмотрении.

Полученные результаты носят предварительный характер и поэтому делать из них далеко идущие выводы нельзя. Но одно ясно: как сам факт существования хромосферы у звезд поздних классов, так и их излучательная способность (энергетическая мощность) не зависят от спектрального класса или эффективной температуры звезды [34, 35, 30, 47, 27].

ЗВЕЗДЫ С ОСОБЕННОСТЯМИ

7.1. Горячие звезды с эмиссионными линиями класса Ве в ультрафиолете

Среди материала наблюдений «Ориона-2» оказались спектральные снимки более 20 горячих звезд с эмиссионными линиями класса Ве, характерная особенность которых — наличие вокруг них газовых оболочек, чаще всего с изменяющейся по времени способностью лучеиспускания. Ниже изложены основные результаты обработки «орионовских» спектральных снимков для некоторых из этих звезд.

Начнем со звезды SAO 040183 класса B2e III—V ($V=6,9$), находящейся в непосредственном соседстве с Капеллой; для нее были получены три спектральных снимка с экспозициями 15 с (кадр F19), 1,5 мин (F20) и 18 мин (F21) — все они оказались хорошего качества, вполне пригодными для измерений (на рис. 7.1 приведены фотоснимки этих спектрограмм). Благодаря этому коротковолновая граница измерений для этой звезды была доведена до 2000 Å и даже короче — до 1950 Å (на кадре F21). На рис. 7.1 приведено найденное в результате обработки этих трех спектрограмм наблюдаемое распределение энергии в непрерывном спектре звезды SAO 040183 (точки). Сильно подавленный вид этой кривой в ультрафиолете и, в особенности наличие глубокой депрессии в области около 2200 Å является явным указанием на то, что звезда испытала сильное межзвездное поглощение.

Была сделана попытка нахождения кривой межзвездной экстинкции — зависимости поглощения от длины волны — путем сопоставления приведенной на рис. 7.1 наблюдаемой кривой (точки) распределения энергии в спектре этой звезды с теоретической моделью. Правда, теоретической модели в ультрафиолете для звезд класса В с эмиссионными линиями не существует. Поэтому пришлось ограничиться сравнением с моделью обычной звезды этого класса при $T=20000$ К и $\lg g=4$ (Mihas); она показана сплошной линией сверху на рис. 7.1. В результате была получена картина, приведенная на рис. 7.2 (точки). Для сравнения там же нанесена обычная кривая межзвездной экстинкции, найденная для направления горячей звезды ξ Per, по данным ОАО-2 (Bless, Savage). Согласие между этими двумя кривыми в общем-то неплохое, за исключением области пика на $\lambda \sim 2200$ Å; максимум экстинкции в случае SAO 040183

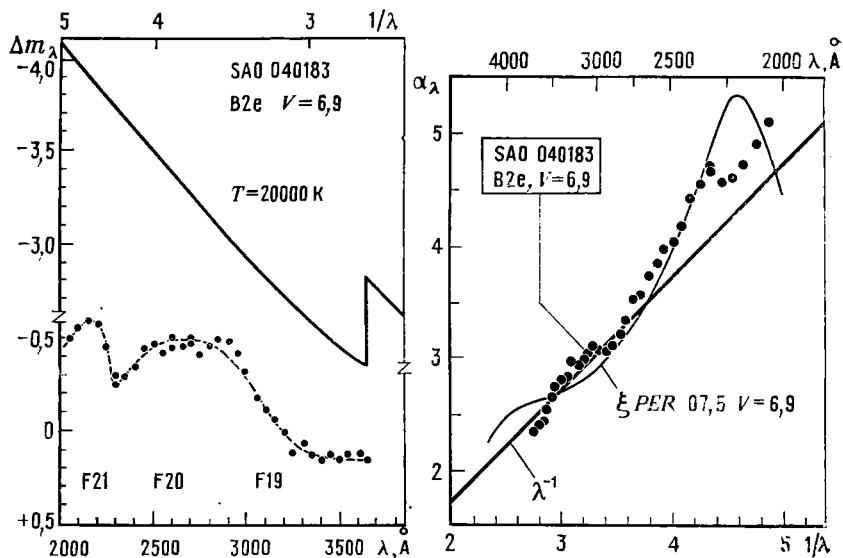


Рис. 7.1. Наблюдаемое распределение энергии в спектре эмиссионной звезды SAO 040183 класса B2e III—V, по данным «Ориона-2» (снизу точки с пунктирной линией). Сплошной линией показано теоретическое распределение энергии в спектре звезды, соответствующей небланкетинг модели при $T = 20000$ K и $\lg g = 4$.

Рис. 7.2. Кривая поглощения (точки), найденная из сравнения наблюдаемого спектра эмиссионной звезды SAO 040183 с теоретической моделью звездной атмосферы. Сплошной линией нанесена обычная кривая межзвездной экстинкции, найденная по данным ОАО-2 для ξ Per. По ординате нанесена величина межзвездного поглощения a_λ в звездных величинах

находится не на 2200 Å, как обычно, а несколько левее, примерно на 2300 Å. Кроме того, сам пик в случае SAO 040183 подавлен — он находится несколько ниже пика на кривой экстинкции ξ Per. Хотя из-за малочисленности данных и не очень высокой точности измерений нельзя быть уверенными в достоверности этих выводов, влиянием излучения эмиссионной оболочки нельзя игнорировать; ведь сравнение наблюдений было проведено с теоретической кривой для нормальной, лишенной газовой оболочки звезды.

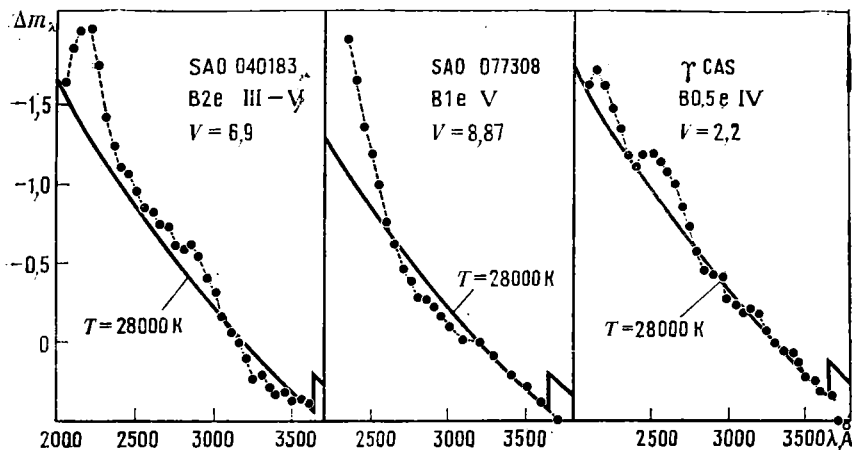


Рис. 7.3. Распределение энергии в непрерывных спектрах трех эмиссионных звезд, по данным «Ориона-2» (точки — данные, исправленные с учетом межзвездного поглощения). Видны выступы на длинах волн ~ 2200 и 2600 Å. Сплошные линии — теоретические небланкетинг-модели (Mihalas)

В связи с последним замечанием возникает довольно заманчивая задача по нахождению величины дополнительного излучения (эмиссии) газовой оболочки в той или иной области длин волн путем сопоставления наблюдаемых спектров эмиссионных звезд класса В с теоретическими моделями обычных звезд тех же классов.

Три примера приведены на рис. 7.3, один из них относится к той же звезде SAO 040183, остальные два — к звездам SAO 077308 и γ Cas. Наличие дополнительного излучения, по-видимому, очевидно по крайней мере на $\lambda \sim 2200$ Å во всех трех случаях. А в двух из них, SAO 040183 и γ Cas, дополнительная эмиссия заметна и в областях $\lambda \sim 2800$ Å и ~ 2600 Å соответственно.

Если дополнительная эмиссия в отдельных, локальных, областях спектра у этих звезд реальна, то ее происхождение следует отнести скорее всего к эффекту слияния (блендирования) эмиссионных линий — обратному эффекту блокировки в случае линий поглощения.

Еще три аналогичных примера, приведенных на рис. 7.4, относятся к эмиссионным звездам 123 ζ Tau-HD 37202, HD 37967 и HD 40978. На этот раз сопоставление наблюдаемых спектров проведено с теоретическими бланкетинг-моделями, где

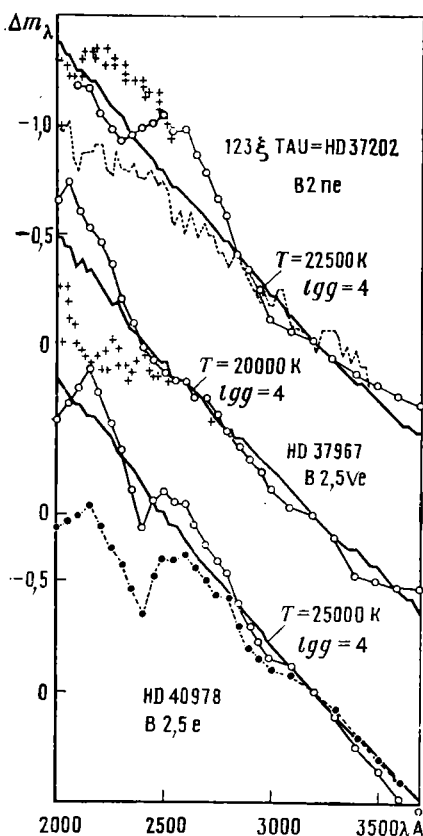
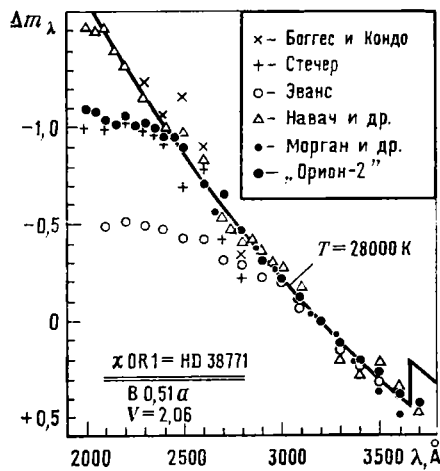


Рис. 7.4. Распределение энергии в непрерывных спектрах эмиссионных звезд ξ Tau, HD 37967 и 40978, по данным «Ориона-2» (кружки).

Крестики соответствуют наблюдениям TD-1A для других звезд. Сплошные линии — теоретические модели для бланкетинг-моделей (Kurucz).

Рис. 7.5. Распределение энергии в ультрафиолете звезды κ Ori спектрального класса B0,5 Ia, по данным «Ориона-2» (крестики) и других наблюдений.

Сплошная линия — теоретическая модель $T=28\,000\text{ K}$



было учтено также влияние линий поглощения (Kurucz). И в этом случае наблюдаются локальные отклонения (эмиссия) на отдельных участках спектра; во всяком случае на $\lambda \sim 2200\text{ Å}$ во всех трех случаях. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что дополнительная эмиссия выделяется довольно четко, даже когда межзвездное поглощение довольно значительное (например, HD 40978 на рис. 7.4).

Таким образом, дополнительную эмиссию можно обнаружить как сопоставлением наблюдений с небланкетинг-моделью, так и с более точной — бланкетинг-моделью. Отсюда можно заклю-

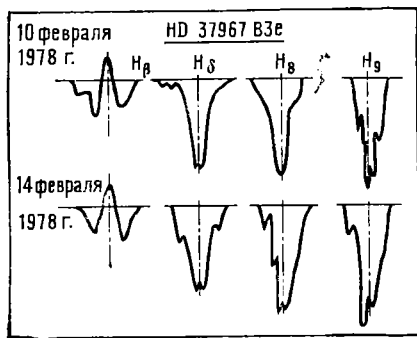
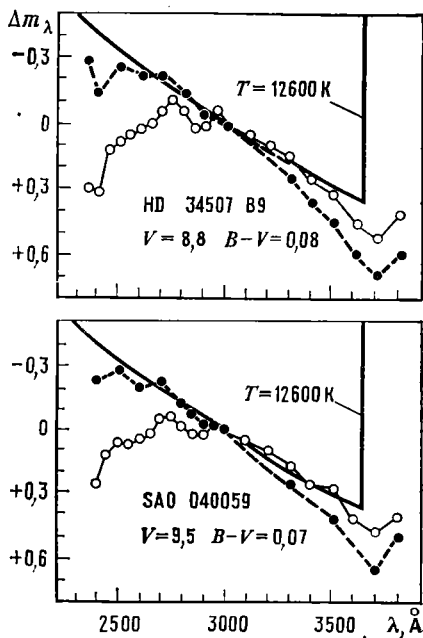


Рис. 7.6. Сглаженные профили водородных линий $H\beta$, $H\delta$, $H\epsilon$ и $H\gamma$ в двух спектрах звезды HD 37967, снятых 10 и 14 февраля 1978 г. (Шемахинская обсерватория)

Рис. 7.7. Распределение энергии в ультрафиолете двух эмиссионных звезд HD 34507 и SAO 040059 по данным «Ориона-2» (точки — данные, исправленные с учетом межзвездного поглощения). Сплошные линии — теоретические модели



чить, что для эмиссии, т. е. эффекта слияния эмиссионных линий у той или иной звезды класса В, выбор теоретической модели фотосферы звезды не имеет решающего значения.

На рис. 7.5 приведено найденное по данным «Ориона-2» распределение энергии в ультрафиолете другой эмиссионной звезды класса В0,5е Ia — сверхгиганта «Орион». Здесь обращает на себя внимание почти полное совпадение «орионовских» измерений с измерениями Стечера (Stecher), а также Моргана (Morgan) и др. (в последнем случае коротковолновая граница наблюдений находится на 2650 Å). Вместе с тем обнаруживаются значительные расхождения с наблюдениями Эванса (Evans) — в сторону меньших потоков излучения в ультрафиолете, Навач (Navach) и др. — в сторону больших потоков, причем в последнем случае настораживает почти полное совпадение результатов наблюдений с теоретической кривой для небланкетинг-модели в области длин волн 2400—2000 Å.

Если указанные расхождения между отдельными наблюдениями, проведенными в разное время, реальны и не вызваны ошибками измерений, то придется тогда отнести их к изменчи-

ности с течением времени излучательной мощности газовой оболочки. Дополнительные спектроскопические наблюдения, проведенные в наземных условиях в Шемахинской обсерватории, подтверждают наличие переменности оболочечной эмиссии HD 37967 не только в течение нескольких дней (рис. 7.6), но даже за 40—50 минут.

Наряду с рассмотренными случаями имеются и эмиссионные звезды, спектрограммы которых исправлены с учетом влияния межзвездного поглощения; распределения энергии в ультрафиолете этих звезд хорошо согласуются с теоретическими моделями, но вместе с тем не показывают локальных выступов или дополнительной эмиссии аналогично тому, что было отмечено выше. В качестве примера на рис. 7.7 приведены результаты измерений «орионовских» спектрограмм двух эмиссионных звезд класса B9e — HD 34507 и SAO 040059; как мы видим, истинное распределение энергии в ультрафиолете хорошо ложится на теоретические кривые без локальных «выступов» по крайней мере в области длин волн до 2300—2400 Å. Очевидно в этих случаях мы имеем дело с эмиссионными звездами, обладающими газовыми оболочками умеренных мощностей [36, 20].

7.2. «Магниевые» звезды

В процессе обработки материала наблюдений «Ориона-2» было обнаружено несколько звезд класса A с аномально сильной линией поглощения 2800 MgII. На рис. 7.8 и 7.9 представлены микрофотометрические записи ультрафиолетовых спектрограмм, полученные с помощью «Ориона-2», для двух таких звезд — HD 32296 и HD 40210.

Звезда HD 32296 класса A2 (во всяком случае не позднее класса A4) по структуре непрерывного спектра не отличается от обычных звезд этого класса. Однако на двух спектрограммах, полученных с экспозициями 1,5 и 18 мин, полоса поглощения на 2800 Å, возникающая в результате слияния друг с другом по крайней мере четырех линий MgII, выглядит необычайно мощной для звезд этого класса. Величина эквивалентной ширины указанной полосы, найденная по обоим спектрограммам, оказалась почти одинаковой в обоих случаях и равной 30 Å (!). Это по крайней мере в 2,5—3 раза больше, чем мы имеем у обычных звезд класса A2, для которых эквивалентная ширина 2800 MgII в среднем порядке 8—10 Å. Даже если принять спектральный класс звезды A4, все равно, указанная аномальность не снимается, так как для нормальных звезд этого класса

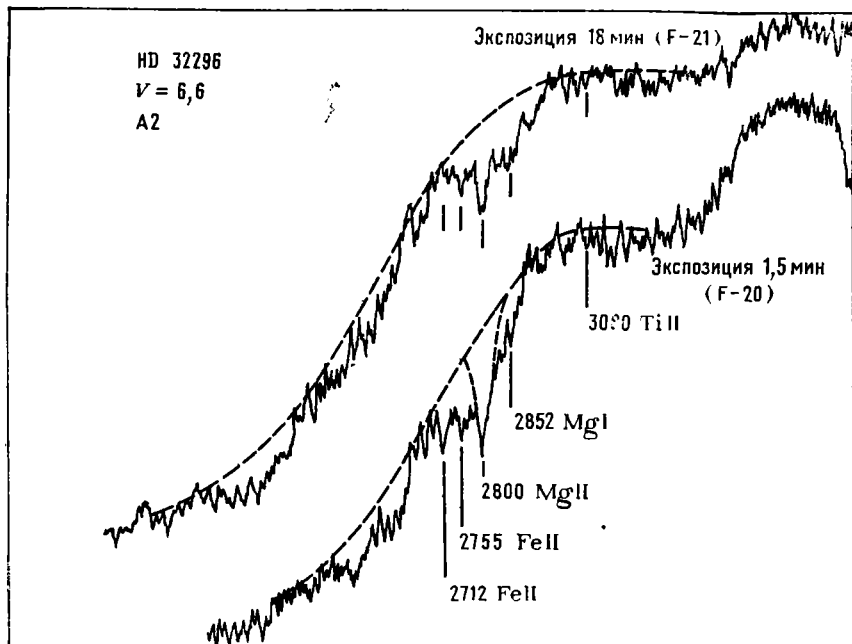


Рис. 7.8. Микрофотометрические записи двух спектрограмм «магневой» звезды HD 32296 класса A2, полученных «Орионом-2» с экспозициями 1,5 и 18 мин. Видна аномально сильная линия поглощения ионизованного магния на 2800 Å и нейтрального магния на 2852 Å

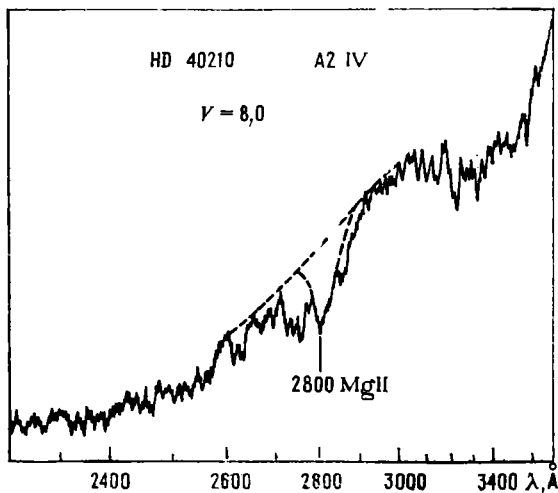


Рис. 7.9. Еще один пример «магневой» звезды класса A2, HD 40210 с аномально сильной линией поглощения 2800 MgII («Орион-2»)

$W(2800 \text{ MgII}) \approx 15 \text{ \AA}$. Величина $W(\text{MgII}) = 30 \text{ \AA}$ обычно характерна для звезд класса F2 и более поздних. Вместе с тем вряд ли есть основание для сомнений в правильности классификации рассмотренной звезды.

Также необычно большой оказалась эквивалентная ширина дублета — $32 \text{ \AA}$ в спектре другой звезды того же класса A2 — HD 40210 (рис. 7.9). Как в случае предыдущей звезды, так и этой наблюдаемое распределение энергии в спектре неплохо согласуется с теоретической моделью при $T_{\text{eff}} = 9000 \text{ K}$ и $\lg g = 4$.

Кстати, обе рассмотренные звезды находятся недалеко, на расстоянии порядка 150 пк, и соответствующие поправки на влияние межзвездного поглощения невелики.

Аномально сильные линии поглощения 2800 MgII были обнаружены «Орионом-2» еще у трех звезд класса A, правда, с несколько меньшими значениями $W(2800 \text{ MgII})$. Таким образом, наш список так называемых «магневых» звезд выглядит следующим образом:

Звезда	V	Спектральный класс	$W(2800 \text{ Mg II})$
HD 32296	6,6	A2—A4 IV	$30 \text{ \AA}$
HD 33332	8,1	A2 V	20
HD 40210	8,0	A2 IV	32
HD 40957	7,2	A2 V—IV	24
ГЛКА 220	10,5	A0 V	26

Обращает на себя внимание любопытный факт: все пять звезд с аномально мощным дублетом MgII оказались звездами класса A, притом карликами — с классом светимости V.

Пять звезд класса A с аномально сильной линией магния — это, конечно, не мало, и пройти мимо такого примечательного факта уже нельзя. Но вместе с тем их и не так уж много, чтобы сделать далеко идущие выводы. Что касается причин указанной аномальности, то наиболее приемлемое допущение — аномально высокое содержание магния в фотосферах указанных звезд — приводит к тому, что, по-видимому, ионов Mg^+ у них по крайней мере в десять раз больше, чем у обычных звезд класса A2. Так ли это? Трудно сказать, не располагая дополнительными данными. Формально причиной возникновения аномально сильной линии MgII может быть наличие мощного облака вокруг этих звезд. Выбор из приведенных альтернатив, очевидно, можно будет сделать только после сопоставления данных о линиях K и H CaII с линиями магния. При этом, если

действительно имеет место аномальное содержание магния, линии кальция должны быть нормальными. В случае же, если причина аномальности связана с околозвездным облаком, они должны быть такими же сильными, как и линии магния.

Связать указанную аномальность с поглощением межзвездного магния невозможно: в этом случае, во-первых, звезды должны быть расположены очень далеко от нас — на расстоянии 6000 пк и, стало быть, превратиться в сверхгиганты с абсолютной светимостью порядка $—6^m$, и, во-вторых, ультрафиолетовые концы их спектров должны быть сильно подавлены, что тоже не наблюдается.

Как известно, быстрое вращение звезды приводит к усилению линий поглощения. Но в этом случае мы должны были бы наблюдать усиление не только магниевых линий.

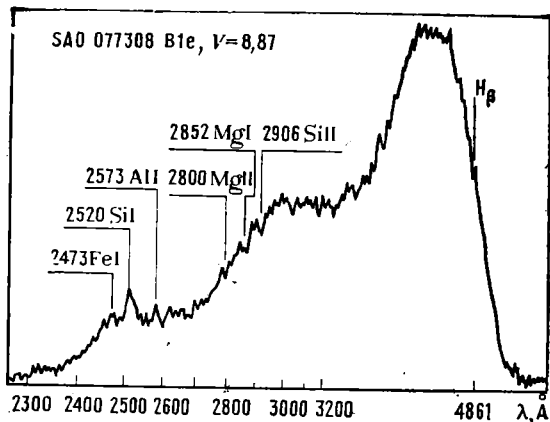
Указать другие причины, связанные со специфическими условиями переноса лучистой энергии в линиях магния, мы не можем. Как бы то ни было, причину указанной аномальности следует связать с самой звездой: либо с ее химическим составом, либо же с процессами, протекающими в верхних слоях ее фотосферы [6, 17, 20].

7.3. Звездная оболочка с аномальным содержанием кремния

Среди «экзотик» «Ориона-2» особо выделяется одна эмиссионная звезда класса Be, SAO 077308, своим любопытным свойством: в спектре этой относительно слабой — почти девятой величины — звезды обнаружена необычайно мощная эмиссионная линия на 2520 Å. Интересно отметить, что линия эта отчетливо видна невооруженным глазом уже на снимке.

О необычайной силе данной линии в спектре упомянутой звезды — к тому же эта линия самая сильная по крайней мере в интервале длин волн от 4000 Å до 2300 Å — можно судить по микрофотометрической записи ее спектра, приведенной на рис. 7.10. После многочисленных попыток наиболее вероятным представляется отождествление этой эмиссионной структуры с резонансным секстетом нейтрального кремния с приведенной или условной длиной волны 2520 SiI. Компоненты этого секстета с почти одинаковыми силами (по данным лабораторных измерений) следующие: 2507, 2514, 2516, 2519 и 2524 Å; вторая из этих линий является резонансной, остальные — квазирезонансные в том смысле, что их нижние уровни находятся очень близко к основному, в пределах 0,01—0,03 эВ. Это отождествление не может считаться окончательным и нуждается в допол-

Рис. 7.10. Денситометрическая запись «орионовской» спектрограммы «кремниевой» звезды SAO 077308. Видна сильная эмиссионная линия 2520 SiI



нительном подтверждении. Однако независимо от возможных изменений в дальнейшем само присутствие этой эмиссионной структуры в спектре SAO 077308 не вызывает сомнения и именно это обстоятельство нужно считать основным. Иначе говоря, независимо от истинной природы химического элемента, которому принадлежит эта линия (или группа линий) проблема аномального содержания этого гипотетического элемента в газовой оболочке рассматриваемой звезды не может быть снята.

Наиболее надежным средством для того, чтобы убедиться в реальности аномальной силы линии 2520 Å в спектре рассмотренной звезды, может служить, конечно, сравнение с коротковолновыми спектрограммами других эмиссионных звезд, принадлежащих, однако, тем же спектральным классам. С помощью «Ориона-2» в одних и тех же условиях были получены спектрограммы еще для нескольких эмиссионных звезд класса B1 — B3. Это — хорошо известная эмиссионная звезда ζ Тау класса B2e, а также звезды HD 37967 класса B3e и HD 38191 класса B1e — все они находятся в созвездии Тельца. Это дало нам возможность сопоставить друг с другом структуру спектров этих четырех звезд в области около 2520 Å, что и было сделано (рис. 7.11). Как мы видим, линия 2520 Å у звезды SAO 077308 выделяется значительно резче, чем у остальных трех звезд — у них линия 2520 Å выступает, хотя и в эмиссии, но такой же силы, что и соседние эмиссионные линии, принадлежащие, по всей вероятности, нейтральному железу и алюминию.

Так как спектральные снимки этих звезд получены на разных кадрах, очень трудно определить, насколько велико содер-

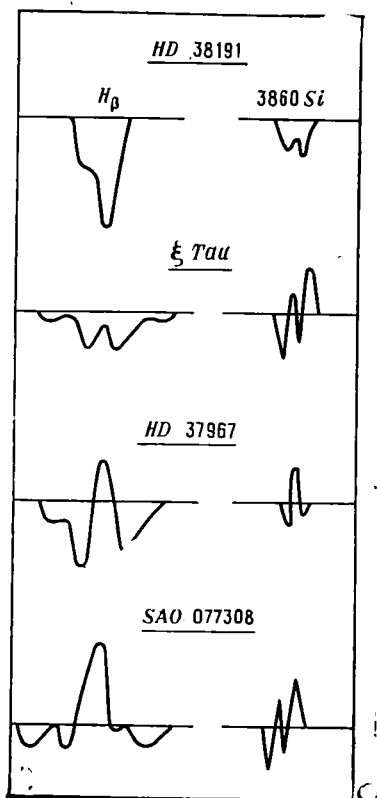
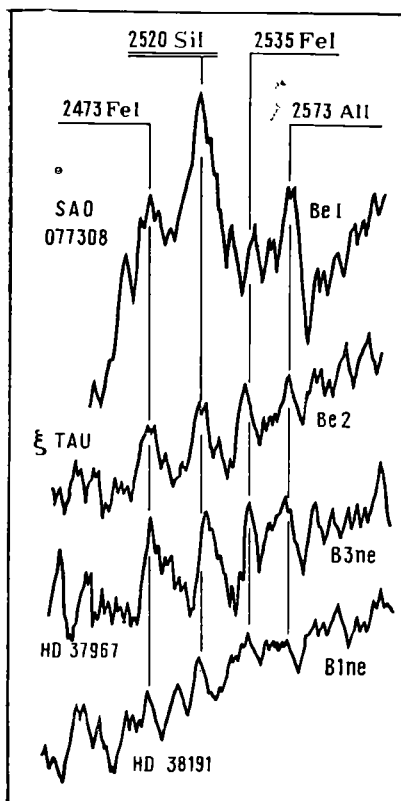


Рис. 7.11. Сопоставление денситометрических записей четырех «орионовских» спектров, принадлежащих эмиссионным звездам SAO 077308, ξ Tau, HD 37967 и HD 38191 около 2520 Å

Рис. 7.12. Профили линий 3860 Si II и 4681 H β в спектрах эмиссионных звезд HD 38191, ξ Tau, HD 37967 и SAO 077308. Записи сделаны со спектрограмм, полученных на 2-м телескопе Шемахинской обсерватории

жание кремния в оболочке звезды SAO 077308 по отношению к трем остальным и, в частности, по отношению к ξ Tau. По весьма приблизительной оценке относительное содержание кремния в оболочке SAO 077308 должно быть по крайней мере в 3—4 раза, а может быть и на целый порядок больше, чем в оболочке ξ Tau.

В связи с этим интересным — и странным — фактом возникает вопрос: в какой мере аномальное содержание кремния свойственно не только газовой оболочке, но и самой фотосфере рассматриваемой звезды?

Для ответа на этот вопрос, по-видимому, необходимо получение спектрограммы этой звезды в наземных условиях и проведение анализа линии *поглощения* кремния.

Еще Струве (Struve) рекомендовал с целью выявления всякого рода аномальностей использовать две группы линий SiII — дублет 4130 Å и триплет 3860 Å. На рис. 7.12 представлены профили линий 3860 Å SiII и H β в спектрах всех четырех звезд, наземные спектрограммы которых были получены на двухметровом телескопе Шемахинской обсерватории. Как видим, эмиссионный компонент линии 3860 Å, небольшой в случае спектра звезды HD 38191, становится доминирующим в спектре нашей «кремниевой» звезды SAO 077308. То же самое можно сказать и об эмиссии у H β : едва заметная у HD 38191, она достигает своего максимума у SAO 077308. Большая эмиссия в H β свидетельствует о мощности оболочки у рассмотренной звезды. Если принять во внимание, что оболочка ζ Тау считается одной из наиболее мощных среди Ве-звезд, то оболочка SAO 077308 оказывается мощнее.

Таким образом, качественно полученная картина свидетельствует, по-видимому, о наличии газовой оболочки с аномальным содержанием кремния вокруг звезды SAO 077308. Однако для количественных оценок необходимо располагать наземными спектрограммами, полученными с еще большей дисперсией [43].

ГАЗОВЫЕ ТУМАННОСТИ В УЛЬТРАФИОЛЕТЕ

8.1. Первая ультрафиолетовая спектрограмма планетарной туманности

Коротковолновые спектрограммы планетарных туманностей привлекали внимание астрофизиков уже давно. Еще с 60-х годов делались первые попытки конструирования ожидаемых спектров планетарных туманностей в ультрафиолете, в области длин волн короче 3000 Å и до 912 Å (Code, Aller). Вслед за этим проводился анализ ожидаемых запрещенных линий в ультрафиолете и указывалось на возможность нахождения с их помощью некоторых физических параметров туманности (Гурздян, Osterbrock). Параллельно шло накопление материала по вычислению атомных параметров для различных переходов — сил соударений, вероятностей запрещенных переходов и т. д. (Czyzak, Garstang). Проводились даже более корректные вычисления по нахождению интенсивностей наиболее сильных ультрафиолетовых линий в спектрах высоковозбужденных туманностей (Fowler).

Несмотря на такую активность теоретиков, само получение коротковолновых спектров планетарных туманностей оставалось вне сферы экспериментальных возможностей периода становления космической астрономии. Здесь сказываются как крайняя слабость самих планетарных туманностей (самая яркая из них едва достигает восьмой звездной величины), так и трудности, связанные с их захватом и гидированием в условиях полета космической обсерватории или вертикальной ракеты. И лишь предпринятая в декабре 1973 г. первая серьезная попытка завершилась удачей, когда удалось получить с помощью «Ориона-2» ультрафиолетовую спектрограмму одной планетарной туманности десятой звездной величины — IC 2149, находящейся в Возничем, недалеко от β Aug.

IC 2149 представляет собой планетарную туманность среднего возбуждения (класс возбуждения 4), ее фотографическая величина 9^m,9, а видимые размеры 6"×12", что позволило сфотографировать ее как точечный объект менисковым телескопом «Ориона-2» в комбинации с объективной призмой. При 15-минутной экспозиции спектрограмма этой туманности местами оказалась даже чуть ли не передержанной.

Была получена всего одна, но достаточно расширенная спектрограмма этой туманности, что позволило снять с нее не-

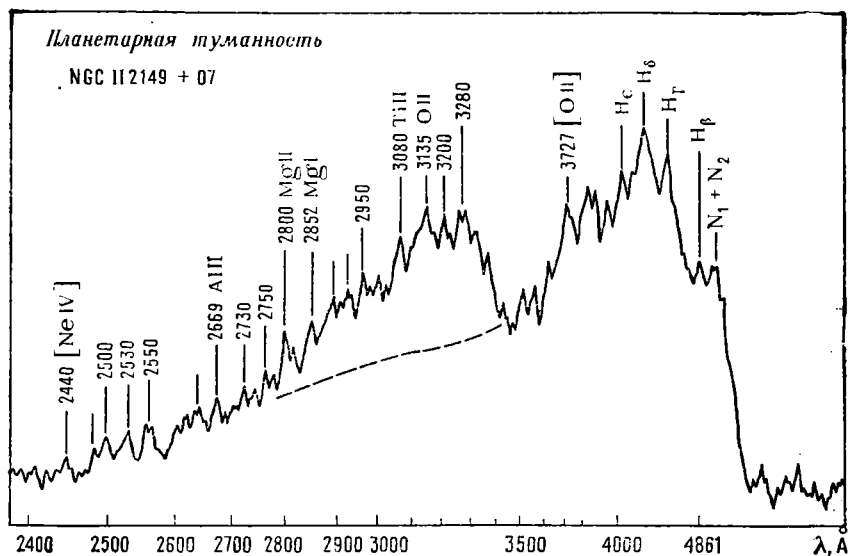


Рис. 8.1. Микрофотометрическая запись ультрафиолетовой спектрограммы планетарной туманности IC 2149 и ее ядра, полученной с помощью «Ориона-2». Выступающая часть от 3300 до 2800 Å вызвана наложением спектра соседней звезды

сколько микрофотометрических записей. Одна из них воспроизведена на рис. 8.1. Коротковолновая граница, пригодная для измерений, на этих записях простирается от 2400 Å. К сожалению, в центральной части спектра, примерно от 3300 Å до 2800 Å, на него оказалась наложенной длинноволновая часть спектра соседней, вероятно красной звезды около 11^m,5.

IC 2149 является одной из редких планетарных туманностей у которых ядро ($\sim 9^m,5$ в фотографических лучах) чуть ярче самой туманности. Поэтому полученная спектрограмма по сути дела представляет собой спектр ядра (звезда класса 07), на который наложен эмиссионный спектр туманности.

Конечно, только по одной спектрограмме, и то полученной с не таким уж высоким спектральным разрешением (около 18 Å на 2500 Å), нельзя делать далеко идущие выводы. Тем не менее, она оказалась достаточно интересной, чтобы можно было остановиться на ней более подробно.

Прежде всего, несмотря на крайне малую дисперсию на 5000 Å ($\sim 3000 \text{ Å мм}^{-1}$), линии $N_1 + N_2$ [OIII], $H\beta$ и некоторые линии бальмеровской серии водорода четко были выделены

Таблица 8.1

Ультрафиолетовые эмиссионные линии в спектре планетарной туманности IC 2149. Приведены также оценки относительных интенсивностей (E_{λ}/E_{β}) этих линий (наблюдаемые и исправленные с учетом межзвездной экстинкции)

Линия, Å	Отождествление	E_{λ}/E_{β}		Линия, Å	Отождествление	E_{λ}/E_{β}	
		Наблю-даемые	Исправ-ленные			Наблю-даемые	Исправ-ленные
2420	2420+2422 Ne IV	1,5	2,4:	2950	2945 He I	1,5	3,5
2670	2669 Al II	1,5	2,6	3060	3047 O III	1,3	3
2800	2795+2802 Mg II	1	2	3135	3135 O II	1	2,3
2850	2853 Ar IV?	1	2	3200	3203 He II	0,5	1
	2852 Mg I?						

на всех регистрограммах. Уверенно выделена также линия 3727 [OII], которая была самой короткой, обнаруженной по наземным наблюдениям. Далее, в области коротких волн (до 2400 Å) видно много эмиссионных линий, и, хотя некоторые из них могут быть вызваны флуктуациями фотографической эмульсии, в подавляющем числе случаев они представляют собой реальные линии, принадлежащие туманности. Список более или менее надежно отождествленных линий представлен в табл. 8.1 наряду с весьма приблизительными оценками их интенсивностей в единицах $H_{\beta}=10$ (привязка осуществлена посредством линии 3727 [OII]). Каждая из этих линий интересна с той или иной точки зрения, поэтому остановимся на них в отдельности.

2440 [NeIV]. Эта линия отождествляется с запрещенным дублетом трижды ионизованного неона 2439+2441 [NeIV]; его присутствие в спектрах планетарных туманностей было предсказано ранее (Гурзадян). Сам дублет возникает при переходах $^2D_{3/2, 5/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$ и является изoeлектронным с запрещенными линиями однажды ионизованного кислорода 3726+3729 [OII].

Однако основная конфигурация иона Ne^{+++} имеет еще уровень 2P , находящийся на 2,62 эВ выше уровня 2D и на 7,74 эВ выше 4S . Переходы $^2P \rightarrow ^2D$ дают четыре линии в видимой области: 4714, 4716, 4724 и 4726 Å; эти линии, однако, — и вообще никакие линии NeIV не были обнаружены на спектрограммах IC 2149, полученных в наземных условиях. Причиной этого может быть просто слабость самих линий. Действительно, пользуясь известными атомными параметрами, можно вывести для

отношения интенсивностей дублета E_{2440} к суммарной интенсивности указанного квартета (с условной длиной волны 4720 Å):

$$\frac{E_{2440}}{E_{4720}} = 8,4e^{\frac{30\,500}{T_e}},$$

что при электронной температуре туманности IC 2149 $T_e = 12\,400$ К дает: $E_{2440}/E_{4720} = 98$. Из табл. 8.1 имеем $E_{2440} = 4,8$, откуда найдем для ожидаемой интенсивности квартета 4720 [NeIV] величину порядка 0,05 H_β . Это находится ниже предела обнаруживаемости большинства наземных спектрографов.

Линии 4714, 4716, 4720 и 4724 [NeIV] были обнаружены применением исключительно чувствительных методов в спектре высоковозбужденной планетарной туманности NGC 7027; их относительные интенсивности E_λ/E_{H_β} оказались равными 0,008, 0,005, 0,013 и 0,013 соответственно, что дает для суммарной интенсивности этого квартета $E_{4720} \approx 0,04 H_\beta$ (Aller, Bowen, Minkowski). В то же время имеем из вышеприведенной формулы для этой туманности $E_{2440}/E_{4720} = 53$ (при $T_e = 16800$ К), т. е. линия 2440 [NeIV] должна быть хотя и не настолько сильной, как у IC 2149, но все-таки сильнее 4861 H_β . Это предсказание подтвердилось позднее, несколько лет спустя, когда были получены коротковолновые спектрограммы NGC 7027 с помощью Сорегписус; при этом наблюдаемое отношение E_{2440}/H_β оказалось равным $\sim 1,5$.

2669 AlII. Правильность этого отождествления может быть подтверждена хотя бы тем, что линия 2669 AlII является резонансной; ее присутствие как сильной линии в спектрах планетарных туманностей также было предсказано ранее (Aller). По интенсивности эта линия того же порядка, что и линия H_β . Если достоверно сделанное отождествление, то это первый случай обнаружения алюминия как химического элемента в составе планетарных туманностей вообще.

2800 MgII и 2852 MgI. Ультрафиолетовый дублет однажды ионизованного магния 2795+2803 MgII и линия нейтрального магния 2852 MgI являются резонансными, и поэтому их отождествление, по-видимому, следует считать правильным. К тому же линии эти являются самыми сильными магниевыми линиями вообще. Однако мы не совсем уверены в наших оценках их интенсивностей (см. табл. 8.1). Относительная интенсивность, например, дублета 2800 MgII ($\sim 2,5$), исправленная с учетом межзвездной экстинкции, оказалась на порядок больше, чем было найдено позднее у двух планетарных туманностей —

NGC 7027 и IC 418. Однако это, по-видимому, можно объяснить тем, что доля однажды ионизованных атомов магния в случае IC 2149, туманности низкого возбуждения, должна быть почти на порядок больше, чем в случае упомянутых двух туманностей, у которых магний находится согласно расчетам в основном в высших состояниях ионизации — дважды, трижды и выше.

Что касается эмиссионной линии 2850 Å, то ее отождествление с 2852 MgI, несмотря на хорошее совпадение, представляется в общем-то сомнительным; количество нейтральных атомов магния в условиях планетарных туманностей должно быть ничтожно мало и поэтому линию 2852 MgI скорее всего можно будет наблюдать у планетарных туманностей очень низкого возбуждения, а также с большей вероятностью во внешних частях диффузных туманностей.

Обнаружение дублета 2800 MgII в эмиссии в спектре IC 2149 и вообще в спектрах планетарных туманностей означает нечто большее, чем просто обнаружение очередной эмиссионной линии, ибо в данном случае речь идет об открытии новой категории или нового класса эмиссионных линий в физике газовых туманностей; этот вопрос рассмотрен в следующем разделе.

2945 HeI. Это одна из сильных рекомбинационных линий нейтрального гелия, и ее отождествление кажется правильным. На микрофотометрических записях спектра IC 2149 как будто видна еще одна линия нейтрального гелия — 2829 HeI.

3080 TiII. Эта линия отождествляется с четырьмя линиями однажды ионизованного титана 3066, 3073, 3078 и 3088 Å. В действительности все эти линии принадлежат мультиплету № 5 TiII, состоящему из девяти линий со средней длиной волны 3080 Å. Две из этих линий — 3066 и 3073 TiII являются даже резонансными, остальные — квазирезонансными в том смысле, что их нижние уровни находятся очень близко к основному уровню (в пределах 0,01—0,03 эВ).

Вообще говоря, рассматриваемая группа линий TiII на 3080 Å должна быть блендирована запрещенными линиями дублета ионизованного азота 3063+3071 [NII]. Но, как показывают вычисления, относительная интенсивность этого дублета должна быть очень мала — по крайней мере в 20 раз слабее линии H β . Поэтому можно заключить, что линия 3080 Å почти целиком должна принадлежать титану. При правильности сделанных предположений это будет первым свидетельством присутствия титана как химического элемента в планетарных туманностях.

3135. OII. Это, по-видимому, одна из сильных рекомбинационных линий однажды ионизованного кислорода, и ее присут-

ствие в спектрах туманностей предполагалось. Но в данном случае нельзя быть уверенным в ее правильном отождествлении.

Таким образом, список ультрафиолетовых эмиссионных линий планетарной туманности IC 2149 включает в себя все типы линий — резонансные, запрещенные и рекомбинационные, каждая из которых отличается особенностями, представляющими интерес с точки зрения физики планетарных туманностей.

Модельные расчеты, насколько нам известно, для планетарных туманностей среднего возбуждения (класса 4—5) до сих пор не были проведены. По-видимому, есть смысл предпринять подобные расчеты в отношении IC 2149, комбинируя все известные данные наблюдений [34, 28, 26, 38].

8.2. Дублет 2800 Mg II — новый класс эмиссионных линий в планетарных туманностях

Что принципиально нового могут дать линии магния для физики планетарных и вообще газовых туманностей? Какие практические или теоретические задачи могут быть решены с помощью этих линий, задачи, способные обогатить и расширить наши познания об объектах, находящихся в условиях сильной дилуции излучения и очень низкой плотности вещества?

Прежде всего не трудно убедиться, что ультрафиолетовые линии ионизованного магния 2795+2803 MgII, будучи резонансными, не могут возникать в результате обычной *флюоресценции*, при завершающем этапе на пути каскадных переходов сверху вниз, после рекомбинации дважды ионизованных атомов магния с электронами, ибо в этом случае отношение интенсивности этого дублета к интенсивности той или иной водородной линии будет в первом приближении пропорционально относительному содержанию магния Mg/H (порядка 10^{-5}). Это значит, что при флюоресцентном механизме возбуждения линии 2800 MgII ее интенсивность должна быть на 4—5 порядков меньше интенсивности водородных линий и, стало быть, ее практически нельзя будет обнаружить на спектрограмме планетарной туманности.

Но, как было отмечено выше, интенсивность линии 2800 MgII порядка интенсивности линии H β в случае планетарной туманности IC 2149, по данным «Ориона-2», и всего на порядок меньше в случае NGC 7027 и IC 418, по данным Copernicus.

Выход из этого положения может быть только один: допустить возможность возбуждения линий 2800 MgII и 2852 MgI

в условиях планетарных туманностей путем *неупругих электронных столкновений*. Благоприятствующим обстоятельством является не только факт, что эти линии резонансные, а главным образом то обстоятельство, что потенциалы возбуждения соответствующих резонансных уровней очень малы — 4,4 и 4,32 эВ. При этом ионы Mg^+ переходят с основного уровня на резонансный в результате электронных ударов, и число таких переходов тут же компенсируется спонтанными — и разрешенными — переходами вниз с испусканием фотонов 2795 + 2803 $MgII$.

Что касается эмиссионной линии H_β , то она возбуждается обычным флуоресцентным механизмом. Исходя из всего сказанного, можно вывести следующую формулу для отношения интенсивностей этих двух линий — $MgII$ и H_β :

$$\frac{E(MgII)}{E_\beta} = 4,485 \cdot 10^5 \frac{n(Mg^+)}{n(H)} T_e^{-1/2} e^{-\frac{51400}{T_e}}.$$

Эта формула интересна тем, что относительная интенсивность дублета $MgII$ в таком представлении (через интенсивность водородной линии) не зависит от электронной концентрации n_e , она зависит только от одного параметра — от T_e .

С помощью приведенной формулы можно найти, в частности, относительное содержание ионов магния $n(Mg^+)/n(H)$ по известной из наблюдений величине отношения $E(MgII)/E_\beta$. Для туманности IC 2149, например ($E(MgII)/E_\beta \approx 2$), получается $n(Mg^+)/n(H) \approx 10^{-6}$. Обычное же (универсальное) содержание атомов магния составляет $n(Mg^+)/n(H) \sim 2,5 \cdot 10^{-5}$. Отсюда следует, что в рассматриваемой туманности примерно 5 % атомов магния находится в однажды ионизованном состоянии — остальные атомы магния должны быть ионизованы два и более раз.

Таким образом, всего несколько процентов ионизованных атомов магния в состоянии возбудить эмиссионную линию 2800 $MgII$ силой, сравнимой с силой водородной линии H_β невзирая на то, что магний на четыре порядка менее обилен, чем водород.

В классической теории газовых туманностей все эмиссионные линии подразделяются на две группы, в зависимости от механизма их возбуждения. Первая группа — *разрешенные* линии, возбуждаются они путем *флуоресценции*. Вторая группа — *запрещенные* линии, возбуждаемые путем *неупругих электронных столкновений*. Теперь появляется третья группа эмиссионных линий, а именно, *разрешенных* по своей природе, но возбуждаемых как *запрещенные*, т. е. путем неупругих электронных

столкновений; это является качественно новым для физики планетарных туманностей результатом. Первыми и наиболее типичными представителями этой группы оказались ультрафиолетовые линии ионизованного магния. И хотя, как выяснилось позднее, электронными столкновениями могут возбуждаться и другие резонансные линии, в частности дублет 1549 CIV, 1908 CIII, 2326 CII и пр., своеобразное «лидерство» все-таки остается за линиями магния; так или иначе у ионизованного магния наименьшая энергия возбуждения резонансного уровня среди всех линий в ультрафиолете, принадлежащих различным ионам.

Один только факт, что магний стал как бы причиной появления целой категории эмиссионных линий — «магниевой» группы — уже сам по себе может характеризовать тот вклад, ту новизну, которую внес магний в физику планетарных туманностей. Впрочем, не следует забывать, что ионизованный магний не имеет метастабильных уровней, он не может возбуждать запрещенных линий, не может возбуждать «псевдорезонансных» линий (Гурзадян), и поэтому все, что можно «выжать» из него — это его разрешенные переходы.

Значение магниевых линий не ограничивается только этим. Из двух высоковозбужденных планетарных туманностей — MGC 7027 и NGC 7662, для которых позднее американскими астрофизиками были получены ультрафиолетовые спектрограммы, у одной (NGC 7662) линии MgII отсутствовали вовсе, а у другой, еще более высоковозбужденной туманности (NGC 7027) эти линии были обнаружены. Стало быть, дублет MgII является исключительно чувствительным индикатором, характеризующим определенные стороны физических условий туманностей вообще.

Согласно современным воззрениям планетарные туманности должны содержать в себе частицы пыли; во всяком случае этим пытаются объяснить наблюдаемые у некоторых из них высокие инфракрасные потоки. В связи с этим поднимается проблема деплеции — конденсация или прилипание свободных атомов и ионов к частицам пыли, в результате чего возникает дефицит отдельных элементов. А именно, срабатывает или нет это явление — деплеция — в условиях планетарных туманностей? Своеобразие проблемы заключается в том, что сами планетарные туманности суть объекты недолговечные — продолжительность их жизни порядка ста тысяч лет. Поэтому любой ответ на поставленный вопрос представит несомненный интерес не только для физики планетарных туманностей, но и, в частности, для

межзвездной среды; мы в этом случае будем иметь некую оценку минимального времени, при котором деплеция достигнет ощутимых размеров. Представляет несомненный интерес также вопрос об идентичности деплеции в обоих случаях — в межзвездной среде и в планетарных туманностях, имея в виду, что темп деплеции зависит не только от концентрации частиц пыли в среде, но и от ее физико-химических свойств.

Ультрафиолетовые линии магния позволяют вывести также ряд полезных зависимостей между различными параметрами туманностей. В частности, с помощью магниевых линий можно найти, оказывается, числовое значение коэффициента дилуции, т. е. отношение радиуса звезды к радиусу туманности. На базе этих линий можно даже разработать метод нахождения постоянных планетарных туманностей [5, 33].

8.3. Двухфотонное излучение

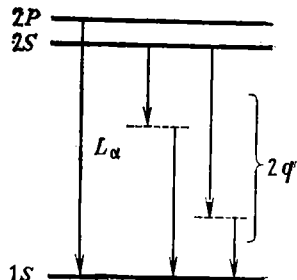
Поучительным примером того, как астрофизические наблюдения над небесными объектами помогают в решении проблем, относящихся к различным отраслям теоретической физики, в частности, атомной физики, может служить история с открытием двухфотонного излучения атомных систем, история, которая насчитывает пятьдесят лет.

Мы живем в мире однофотонных процессов. Всюду, начиная от пламени обыкновенной свечи, кончая звездами и Солнцем, всякие атомные соскоки с одного энергетического уровня на другой, или, выражаясь образно, каждый переход электрона с более высокой орбиты вокруг ядра на низшую, сопровождается испусканием одного и только одного фотона. Такова природа атомного микромира.

Однако в конце двадцатых годов немецкий физик-теоретик Гёперт-Мэйер (Göpert-Mayer), опираясь на только что появившийся аппарат квантовой механики, выявила чисто математическим путем, что атомные соскоки с одного состояния на другое могут быть осуществлены также испусканием одновременно двух фотонов. При этом частота каждого из этих фотонов может быть произвольной и разной при разных актах переходов, но сумма энергий обоих фотонов, разумеется, должна быть постоянной и равной разности энергий исходного и конечного состояний.

В начале сороковых годов стало очевидным, что двухфотонное излучение водорода, возникшее при переходе атома с бли-

Рис. 8.2. Двухфотонное ($2q$) излучение водорода. $2P$ при запрещенных переходах между дискретными уровнями $2S \rightarrow 1S$ (пунктирные линии). Разрешенный переход возможен между уровнями $2P \rightarrow 1S$, при этом рождается эмиссионная линия Лайман-альфа водорода ($L\alpha$)



жайшего метастабильного уровня $2S$ на основной уровень $1S$ должно представлять особый интерес (рис. 8.2). Это и побудило Брейта и Теллера (Breit, Teller) взяться за математическую разработку довольно сложной теории двухфотонного излучения водорода. В то время эта теория, несмотря на свою изящность, представлялась чересчур абстрактной для того, чтобы из нее можно было сделать выводы практического характера. И лишь в начале пятидесятых годов советский физик А. Я. Киппер и американские астрофизики Спитцер и Гринштейн (Spitzer, Greenstein) независимо друг от друга сумели приспособить эту теорию к астрофизическим проблемам. Прежде всего они нашли вероятность двухфотонного излучения; она оказалась равной $A(2q) = 8,227 \text{ с}^{-1}$, т. е. в миллион раз меньше вероятности обычных атомных переходов с испусканием одного фотона. Ученые сумели построить также теоретический спектр двухфотонного излучения водорода. Начинается этот спектр с $\lambda = 1216 \text{ \AA}$ и, достигая максимума примерно на $\lambda = 1400 \text{ \AA}$, быстро падает в области длинных волн, простираясь теоретически до бесконечности (рис. 8.3). Важно отметить, что основная доля — более 90 % — двухфотонного излучения приходится на коротковолновую область спектра, короче $3000 \text{ \AA}$; в видимую область простирается только «хвост» его спектра.

Любопытно все-таки отметить, что это единственный случай, когда переход атома с одного дискретного энергетического уровня на другой дискретный уровень не сопровождается испусканием одного и только одного фотона, а стало быть, порождением спектральной линии, как обычно, а дает сплошной спектр бесконечной ширины.

Для реализации двухфотонного излучения необходимо, чтобы ничто не мешало возбужденному атому «прожить» в метастабильном состоянии ($2S$) положенное время, в данном случае

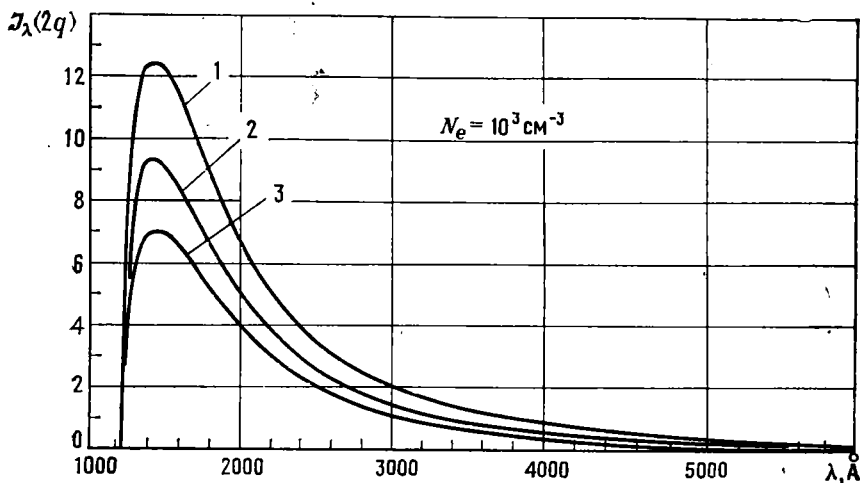


Рис. 8.3. Спектр двухфотонного излучения водорода; этот спектр начинается с $\lambda = 1216 \text{ \AA}$ и, достигая максимума примерно на $1400 \text{ \AA}$ быстро падает в видимой и инфракрасной области:

1 — $T_e = 10\,000 \text{ K}$; 2 — $T_e = 15\,000 \text{ K}$; 3 — $T_e = 20\,000 \text{ K}$

порядка одной десятой секунды. А помешать этому могут столкновения возбужденного атома либо с другими атомами, либо же с фотонами. Избежать таких столкновений, т. е. избежать «гашения» двухфотонного излучения, можно лишь в случае, если среда достаточно разреженная и одновременно в ней мала плотность излучения. Более определено, концентрация атомов при этом должна быть не выше 10^3 – 10^4 см^{-3} ; при больших концентрациях переходы $2S \rightarrow 1S$ хотя и будут иметь место, но без испускания двух фотонов. Эти предельные значения концентрации вещества чрезвычайно малы — они примерно в миллион раз меньше, чем концентрация частиц в самых совершенных современных вакуумных камерах. В этом и кроется причина, почему одно из фундаментальных предсказаний квантовой механики — возможность двухфотонного излучения — не получило до сих пор экспериментального доказательства в наших физических лабораториях.

Выходом из положения, оказывается, могут быть планетарные туманности; в них очень мала концентрация атомов — порядка 10^3 – 10^4 см^{-3} , очень мала и плотность излучения. Вот почему за последние 20–30 лет внимание астрофизиков и фи-

зиков было обращено на планетарные туманности, как на потенциальные источники генерации двухфотонного излучения. Диффузные туманности годятся для этой цели в значительно меньшей степени из-за содержания в них в большом количестве частиц пыли, создающих сильный непрерывный спектр в результате рассеяния излучения их центральных звезд.

Английский физик Ситон (Seaton) был первым, кто попытался выделить двухфотонную эмиссию у планетарных туманностей по данным обычных наземных спектров — по величине так называемого бальмеровского скачка (на $\lambda=3646 \text{ \AA}$). Однако согласно расчетам интенсивность двухфотонной эмиссии на этом скачке должна быть по крайней мере в 5–6 раз меньше полной интенсивности, обусловленной водородным и гелиевым континуумом на скачке. Поэтому метод бальмеровского скачка не может быть признан как достаточно чувствительный для этой цели. Уверенное решение проблемы двухфотонного излучения следует искать в получении и анализе спектрограмм планетарных туманностей в области короче $3000 \text{ \AA}$.

На зарегистрированной с помощью «Ориона-2» спектрограмме планетарной туманности IC 2149 явные признаки наличия той двухфотонной эмиссии, о которой идет речь.

Блеск центральной звезды (ядра) туманности IC 2149 такой же ($\sim 10^m$), что и интегральный блеск самой туманности. Поэтому полученная спектрограмма оказалась наложением друг на друга двух спектров — непрерывного и линейчатого. Отделив оба эти компонента друг от друга, можно найти наблюдаемый спектр ядра. После внесения поправки с учетом влияния межзвездного поглощения этот спектр на значительной своей протяженности оказался в хорошем согласии с теоретической моделью при эффективной температуре 50000 K для центральной звезды класса 07 (рис. 8.4). Вопрос заключается в том, что начиная с $\lambda \sim 2800 \text{ \AA}$ и до коротковолнового предела измерений ($2400 \text{ \AA}$) наблюдаемые потоки превышают теоретически ожидаемые значения.

Не трудно убедиться, что отмеченное *дополнительное излучение* (заштрихованная часть на рис. 8.4) не имеет никакого отношения к центральной звезде, и скорее всего часть этого излучения может быть искомой двухфотонной эмиссией, генерируемой водородом в самой туманности. Можно предложить по крайней мере два способа для проверки этого предположения.

Первый — качественный — способ основан на сравнении наблюдаемого спектра дополнительного излучения в области $2400\text{--}3500 \text{ \AA}$, представляющего собой смесь двух типов конти-

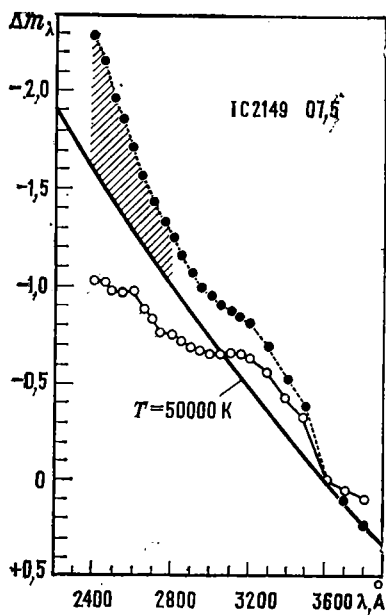


Рис. 8.4. Распределение энергии в ультрафиолете непрерывного спектра центральной звезды планетарной туманности IC 2149:

точки — наблюдения, направленные с учетом влияния межзвездного поглощения; сплошная линия — теоретическая модель при эффективной температуре фотосферы звезды $T=50\,000\text{ K}$; заштрихованная область — непрерывный спектр частично двухфотонного происхождения

нуумов (водорода и однажды ионизованного гелия) и $2q$ -излучения, с теоретически вычисленным спектром. Такое сопоставление показано на рис. 8.5, что свидетельствует о хорошем согласии наблюдений с теорией. Теоретическая линия (сплошная линия) на этом рисунке представляет собой фрагмент более общей картины (рис. 8.6), касающейся теоретического (расчетного) непрерывного спектра пла-

нетарной туманности с учетом континуумов водорода, гелия и двухфотонного излучения.

Второй — количественный — способ проверки основан на оценке суммарного количества дополнительного излучения и его сравнения с теоретически ожидаемой величиной для двухфотонного излучения. Для этого необходимо сперва найти из наблюдений величину отношения $Q(\lambda_1, \lambda_2)/N(\lambda_1, \lambda_2)$, где $Q(\lambda_1, \lambda_2)$ — число фотонов дополнительного излучения в интервале длин волн от λ_1 до λ_2 , а $N(\lambda_1, \lambda_2)$ — число фотонов, излучаемых центральной звездой в том же интервале длин волн.

Далее, из теоретического спектра двухфотонного излучения (см. рис. 8.3) можно найти величину $Q(2q)/Q(\lambda_1, \lambda_2)$, где $Q(2q)$ — полное число $2q$ -фотонов во всем спектральном диапазоне, от 1216 Å до бесконечности.

Наконец, обозначая через N_c полное число фотонов, испускаемых центральной звездой в частотах лаймановского континуума водорода ($\lambda \leq 912\text{ Å}$), можно вывести следующее соотношение между отношением $Q(2q)/N_c$ и температурой ядра T_* , нечто вроде анализа формулы Занстра (Zanstra) для двухфо-

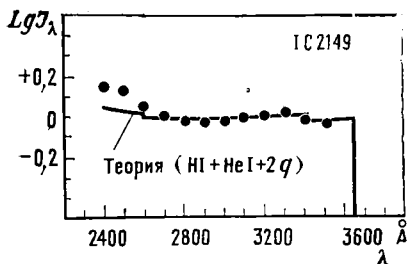
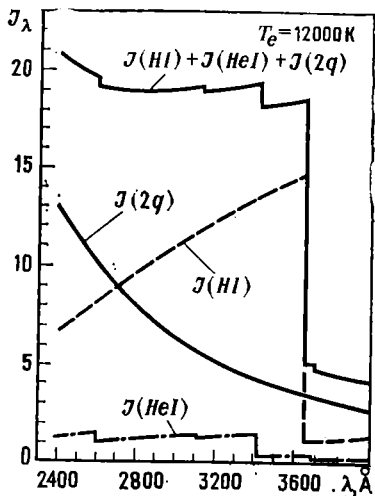


Рис. 8.5. Сравнение наблюдаемого спектра непрерывной эмиссии (точки) у планетарной туманности IC 2149 с теоретическим спектром (сплошная линия)

Рис. 8.6 Теоретический спектр непрерывного излучения планетарной туманности в ультрафиолете, рассчитанный при $T_e = 12\,000\text{ K}$, $n_e = 3,2 \cdot 10^3\text{ см}^{-3}$



тонного излучения:

$$\frac{Q(2q)}{N_c} = \frac{Q(\lambda_1, \lambda_2)}{N(\lambda_1, \lambda_2)} \frac{Q(2q)}{Q(\lambda_1, \lambda_2)} \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{x^2 dx}{e^x - 1}}{\int_{x_0}^{\infty} \frac{x^2 dx}{e^x - 1}},$$

где $x = hc/\lambda k T_*$. Если мы примем $\lambda_1 = 2400\text{ Å}$ и $\lambda_2 = 2800\text{ Å}$, то в этом случае около 70 % суммарной непрерывной эмиссии в этом интервале придется на двухфотонное излучение. Далее, найдем из рис. 8.4 и 8.3 соответственно $Q(\lambda_1, \lambda_2)/N(\lambda_1, \lambda_2) = 0,50$ и $Q(2q)/Q(\lambda_1, \lambda_2) = 1,4$. Эти данные можно получить из вышеприведенной формулы при двух значениях температуры ядра:

$T_*,\text{ K}$	$Q(2q)/N_c$
55000	0,67
66000	0,45

Согласно теории свечения газовых туманностей примерно 0,33-я часть актов рекомбинации атомов водорода со свободными электронами приходится на уровень $2S$, дающий начало двухфотонному излучению. Поэтому будем иметь для теоретической величины отношения $Q(2q)/N_c = 2 \cdot 0,33 = 0,66$. Это в «чистом» случае, если пренебречь электронными ударами вто-

рого рода. С учетом этого эффекта (фактор деактивации) будем иметь

$$\frac{Q(2q)}{N_c} = \frac{0,66}{1 + 0,63 \cdot 10^{-4} n_e}.$$

Подставив $n_e = 3,2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ в выражение для электронной концентрации туманности IC 2149, найдем $Q(2q)/N_c = 0,55$, что хорошо согласуется с наблюдениями.

Таким образом, два независимых метода — спектральное распределение и количество непрерывной эмиссии — свидетельствуют о присутствии двухфотонного излучения в туманности IC 2149.

Позднее американскими астрофизиками были получены коротковолновые спектрограммы других планетарных туманностей, в том числе NGC 7027 и NGC 7662. Однако обнаружить признаки наличия двухфотонной эмиссии в спектрах этих туманностей не удалось. Это может быть следствием двух причин: высокой электронной концентрации в этих туманностях, вследствие чего двухфотонное излучение вообще не может быть индуцировано, а также сильного межзвездного поглощения в направлениях этих туманностей.

Пример туманности IC 2149 пока является единственным, и поэтому вывод о существовании двухфотонной эмиссии у планетарных туманностей нельзя считать окончательным [15, 31, 39, 48].

ОКОЛОЗВЕЗДНЫЕ ОБЛАКА

9.1. Депрессия в непрерывных спектрах горячих звезд
в области длин волн около 2400 Å

Как известно, блокировка непрерывного излучения очень большим числом линий поглощения, принадлежащих главным образом нейтральным и ионизованным металлам (титан, хром, железо, кобальт, никель и т. д.), довольно сильно искажает общий вид непрерывного спектра в области длин волн короче 3000 Å. Этот эффект, предсказанный Элстом (Elst), получил свое первое экспериментальное подтверждение наблюдениями ОАО-2, а позднее наблюдениями «Ориона-2», TD-1A.

Сущность эффекта блокировки (бланкетирования) довольно проста: это доля света, поглощенного в спектральных линиях.

На спектрограмме или ее микрофотометрической записи упомянутый эффект проявляется в виде довольно протяженного спада или депрессии уровня непрерывного спектра. Особенно ощутим он при сопоставлении наблюдаемых потоков в ультрафиолетовых спектрах звезд с моделями звездных атмосфер. В качестве примера на рис. 9.1 приведена наблюдаемая и исправленная с учетом межзвездного поглощения кривая распределения энергии в непрерывном спектре звезды HD 36589 класса В6V в диапазоне длин волн 2000—3700 Å наряду с теоретической кривой, соответствующей энергетической модели при $T = 15700$ К. Как видим, общая структура наблюдаемого спектра хорошо согласуется с теорией. Вместе с тем выделяются ясно выраженные депрессии в непрерывном спектре в районе 2400 Å, а также 2800 Å: последняя в данном случае выражена менее сильно.

Новое, что дал «Орион-2» — это установление неодинаковости макроструктуры непрерывных спектров горячих звезд примерно на 2400 Å в пределах данного спектрального подкласса, при переходе от звезды к звезде. На рис. 9.2 воспроизведена последовательность распределения энергии (точки) в спектрах четырех звезд класса A0 почти одинакового блеска ($V = 8^m,0 - 8^m,8$) в интервале длин волн 3700—2300 Å, структура непрерывного спектра которых оказалась существенно отличающейся в области короче 3000 Å. Если в случае звезды HD 34380 распределение энергии в ее непрерывном спектре, по данным «Ориона-2», почти в точности следует теоретической

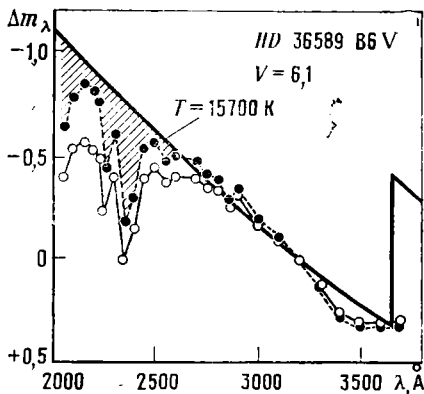


Рис. 9.1. Распределение энергии в спектре звезды HD 36589. Видны депрессии на 2050 и 2350 Å. Сплошная линия — теоретическая модель при $T=15700$ K и $\lg g=4$

модели (Fowler), в частности с наличием двух мощных депрессий на 2800 и 2400 Å, то у следующих звезд наблюдается постоянное отклонение от этой модели, вплоть до полного исчезновения обеих депрессий, у звезды HD 35848. Обращает на себя внимание, хотя и глу-

бокая, но довольно узкая депрессия на 2400 Å в спектре HD 34999.

Подобная картина была получена также для другой группы звезд, на этот раз подкласса A2 (рис. 9.3).

Однако модели звездных атмосфер без учета бланкетирования линиями следует все-таки считать не совсем приемлемыми даже для горячих звезд.

С появлением новейших моделей (Kurucz) с учетом фотоионизации и бланкетирования почти двух миллионов линий наиболее распространенных атомов и ионов анализ депрессии непрерывных спектров в области длин волн около 2400 Å с использованием данных «Ориона-2» был поставлен на более прочную основу.

В качестве примера на рис. 9.4 и 9.5 представлена макроструктура ультрафиолетовых спектров двух групп звезд классов B2—B3 и B9 соответственно. Конечно, всем звездам, в том числе и классов B2—B3, присущи некие естественные депрессии на длине волны 2400 Å, обусловленные поглощением излучения в их собственных фотосферах. В случае звезд B2—B3 эта депрессия не так сильна, чтобы быть обнаруженной сразу, во всяком случае у первой из трех звезд, показанных на рис. 9.4. Тем не менее, у первой сверху звезды (HD 37756) чувствуется наличие слабой депрессии, она становится заметной у второй (HD 40160) и достигает наибольшей величины у HD 5233.

Сделанный ранее вывод об отсутствии полной однородности в макроструктуре спектров горячих звезд в ультрафиолете у звезд одного и того же класса подтверждает рис. 9.5.

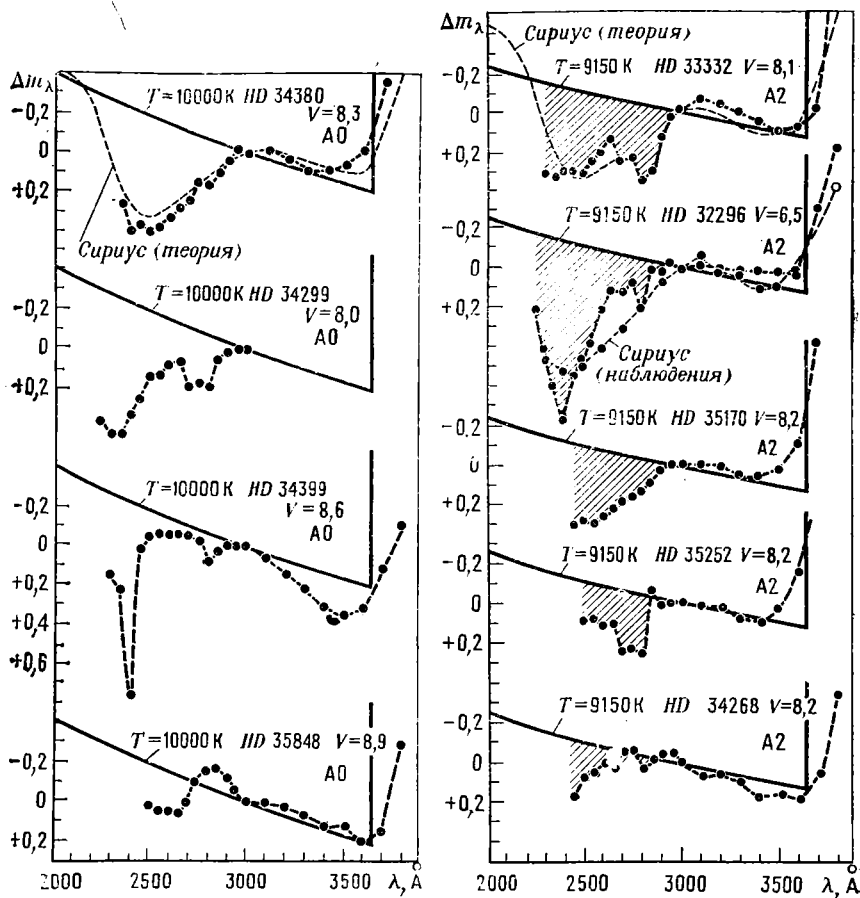


Рис. 9.2. Макроструктура ультрафиолетовых спектров группы из четырех звезд класса A0 по данным «Ориона-2» (точки). Представлены звезды как с предельно мощной депрессией на 2800 и 2400 Å (HD 34380), так и почти без заметных признаков указанной депрессии (HD 35848). Сплошные линии — теоретические модели

Рис. 9.3. Последовательность ультрафиолетовых спектров звезд класса A2 с меняющейся макроструктурой — разные мощности депрессии на 2400 и 2800 Å, по данным «Ориона-2» (точки). Сплошные линии — теоретическая модель (Mihalas)

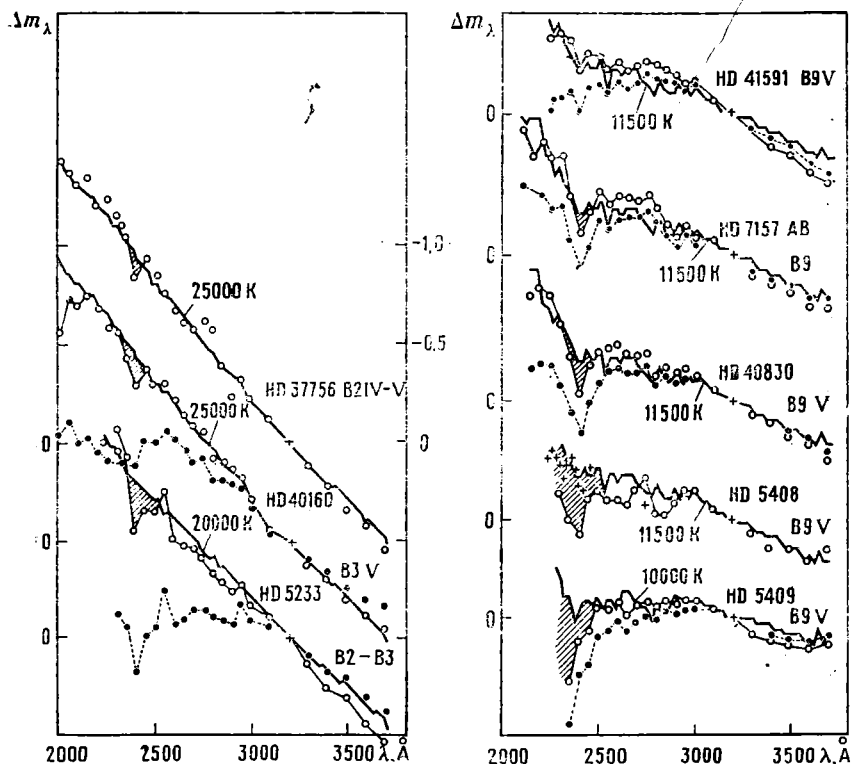


Рис. 9.4. Макроструктура ультрафиолетовых спектров группы из трех звезд классов B2—B3, по данным «Ориона-2». Едва заметная депрессия на 2400 Å у HD 37756 становится весьма значительной у HD 5233. Сплошные линии — теоретические модели (Klugicz)

Рис. 9.5. Распределение энергии в спектрах пяти звезд класса B9 в ультрафиолете, по данным «Ориона-2». Переход от верхнего распределения к нижнему соответствует возрастающей депрессии непрерывного спектра по отношению к теоретическому распределению (сплошные линии)

Из всего сказанного выше следует, что существующая классификация звезд недостаточна для описания их непрерывных спектров в ультрафиолете. По-видимому, в недалеком будущем спектральная классификация потребует нового параметра (к обычному обозначению подкласса), учитывающего ту или иную особенность в макроструктуре спектра в ультрафиолете (2000—3000 Å), в частности величину депрессии [19, 20, 21].

9.2. Околозвездные облака по данным ультрафиолетовых спектров горячих звезд

Идея объяснения наблюдаемой неоднородности макроструктуры ультрафиолетовых спектров горячих звезд одних и тех же спектральных классов, т. е. депрессии на длине волны 2400 Å, наличием околозвездных облаков вокруг них возникла в процессе обработки и осмысления наблюдательного материала, полученного «Орионом-2».

Как показывает количественный анализ, касающийся этого вопроса, наблюдаемое разнообразие можно объяснить дополнительным поглощением, которое испытывает выходящее из фотосферы излучение звезды в *собственном околозвездном облаке*. Важным моментом в этом анализе является выявление огромной роли резонансных линий, принадлежащих нейтральным и ионизованным металлам; по сути дела ими и обусловлено поглощение в облаке. Если локальная концентрация резонансных линий будет достаточно велика, то в результате их слияния могут возникнуть широкополосные депрессии в отдельных областях непрерывного спектра.

Облако следует условно рассматривать как дополнительный обращающий слой, расположенный разве лишь на некотором расстоянии от фотосферы звезды. Выходящее из фотосферы излучение с вполне известным спектральным распределением, проходя через облако, испытывает дополнительное поглощение, в результате чего меняется первоначальный вид фотосферного спектра. Так, до наблюдателя доходит видоизмененный и достаточно деформированный — в зависимости от поглощающих свойств самого облака — спектр, который мы называем *синтетическим*.

В то же время нетрудно убедиться, что по своим поглощающим свойствам облако будет отличаться от фотосферы центральной звезды, хотя бы потому, что степень ионизации любого элемента в облаке будет гораздо ниже, чем в фотосфере центральной звезды. Иначе говоря, облако всегда будет соответствовать более позднему спектральному классу, нежели классу центральной звезды. Так возникает понятие спектрального класса околозвездного облака. Эта задача была рассмотрена отдельно, в результате чего появился график, схожий с изображенным на рис. 9.6; на нем приведены кривые зависимости спектрального класса облака от спектрального класса звезды при трех значениях безразмерного параметра $\Phi = Wn_*/n_0$, где

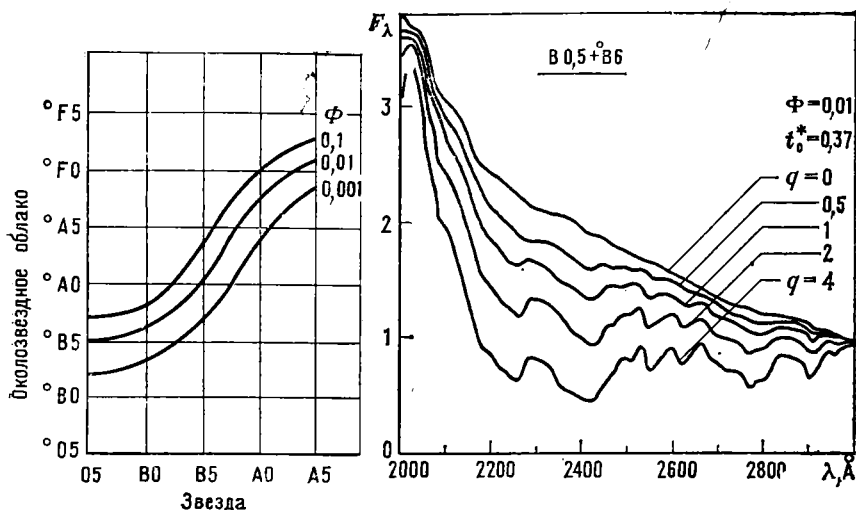


Рис. 9.6. Спектральные классы околозвездного облака (по вертикали) в зависимости от спектрального класса центральной звезды (по абсциссе) при трех значениях безразмерного параметра Φ : 0,1, 0,01 и 0,001

Рис. 9.7. Синтетические спектры для звезды класса B0,5, окруженной облаком класса $^{\circ}\text{B6}$. Случай $q=0$ соответствует отсутствию облака и наблюдаемому спектру звезды $\lambda \text{ Lep}$. Интенсивность F_{λ} дана в относительных единицах

W — коэффициент дилуции, а n_* и n_0 — электронная концентрация в фотосфере звезды и в облаке соответственно.

Дальше все сводится, как говорится, к технике вычислений: приписывая околозвездному облаку вокруг данной звезды вполне определенные поглощающие свойства, соответствующие поглощающим свойствам фотосферы некоей условной звезды несколько позднего класса (см. рис. 9.6), нетрудно рассчитать синтетический спектр — тот спектр, который дойдет до наблюдателя.

В качестве иллюстрации на рис. 9.7 и 9.8 приведены результаты по построению синтетического спектра для двух комбинаций «звезда+облако»: в первом случае центральная звезда класса B0,5 окружена облаком класса $^{\circ}\text{B6}$, во втором же звезда класса A0 — облаком класса $^{\circ}\text{A7}$.

Приведенные кривые следует считать довольно любопытными. Ведь кажется почти невероятным, чтобы наблюдаемая сквозь облака звезда могла иметь столь разнообразные по мак-

Рис. 9.8. Синтетические спектры для системы A0+A7

росту структуры спектры в зависимости от мощности (оптической толщины) самого облака q .

Обращает на себя внимание то, что особо нас интересует — возникновение и монотонное уси-

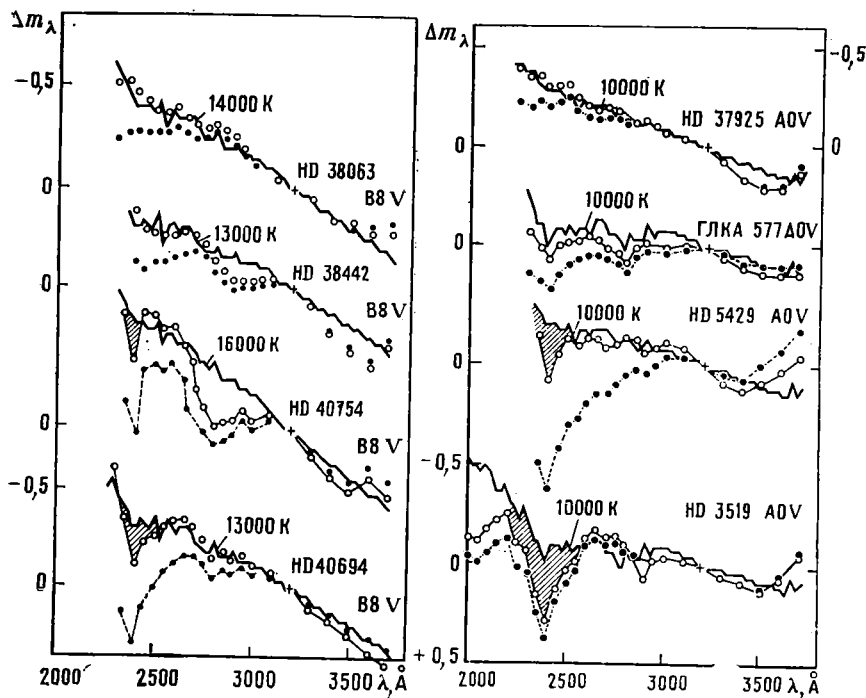
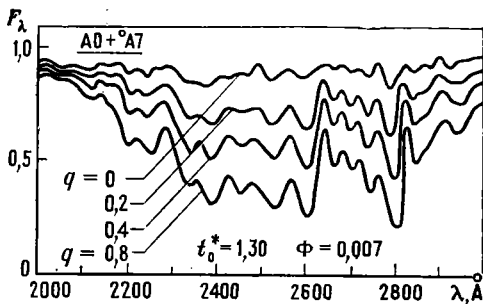


Рис. 9.9. Депрессии в непрерывных спектрах звезд спектрального класса B8, по данным «Ориона-2»

Рис. 9.10. Депрессии в непрерывных спектрах звезд класса A0, по данным «Ориона-2». В случаях двух последних наличие околозвездных облаков несомненно

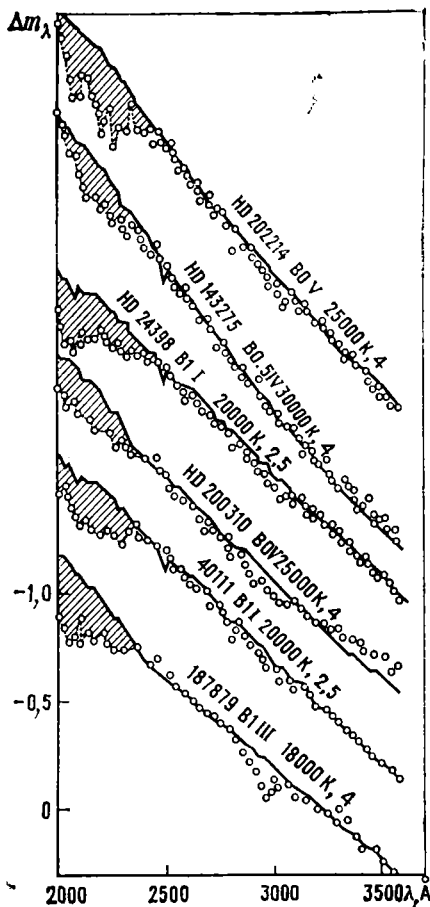


Рис. 9.11. Депрессии в непрерывных спектрах шести звезд спектральных классов B0—B1, по данным ОАО-2. Вокруг всех этих звезд присутствуют околосветные облака

ление по мере увеличения непрозрачности облака депрессия непрерывного спектра как раз на длине волны 2400 Å.

Таким образом, наличие депрессии непрерывных спектров в районе 2400 Å можно объяснить допущением присутствия околосветного облака вокруг рассматриваемой звезды.

Подытожим результаты, касающиеся околосветных облаков вокруг звезд классов B—A.

Исследование непрерывных спектров горячих звезд как по материалам ОАО-2, так и по материалам «Ориона-2» позволяет сделать вывод о том, что депрессия в ультрафиолете — примерно на 2400 Å — является довольно распространенным явлением, присущим значительной части горячих звезд. Так, у 12 звезд из 72, по данным «Ориона-2», и у 22 из 134, по данным ОАО-2, т. е. примерно у 20 % звезд, были

определенно обнаружены довольно сильные депрессии в их коротковолновых спектрах. Это одновременно есть процент горячих звезд, существование достаточно мощных облаков вокруг которых представляется наиболее вероятным.

В качестве иллюстрации на рис. 9.9, 9.10 и 9.11 показаны депрессии (заштрихованные) в непрерывных спектрах горячих звезд спектральных классов B—A, по данным «Ориона-2» и ОАО-2. Присутствие облаков вокруг этих звезд следует считать в высшей степени вероятным [23, 44].

9.3. Околозвездные облака — новая категория галактических образований

Открытие околозвездных облаков, к тому же на основе непрерывных спектров звезд в ультрафиолете, не было «запланировано» экспериментом «Орион-2».

Первые признаки существования околозвездных облаков вокруг отдельных звезд появились в конце пятидесятих годов, когда потребовалось найти разумное объяснение наблюдаемому замедлению расширения газовых оболочек Новых (Wallerstein). Однако явление Новой слишком экзотично и случайно, чтобы можно было создать на его основе доступный в широком масштабе метод детектирования и изучения околозвездных облаков вокруг звезд самых разных типов.

Принципиально по-новому решает поставленную проблему «метод депрессии». Сущность этого метода заключается в следующем. В ходе излучения на основе наблюдательного материала «Ориона-2» непрерывных спектров звезд ранних классов в ультрафиолете была обнаружена довольно широкая депрессия, примерно на длине волны 2400 Å, в распределении непрерывной энергии. Вскоре выяснилось, что мощность этой депрессии — ее глубина и протяженность — может быть разной у разных звезд одного и того же спектрального класса и класса светимости. Иначе говоря, мощность самой депрессии не зависит от эффективной температуры и размеров (ускорение силы тяжести) звезды, что, вначале показалось довольно странным.

Перечисленные факты указывают на то, что при формировании *наблюдаемых* спектров горячих звезд срабатывает какой-то неизвестный источник непрерывного или широкополосного поглощения. Характерной особенностью этого поглощения является его неодинаковость у разных звезд даже при строгой идентичности в обычном понимании их фотосфер. Во всяком случае стало ясно, что при теоретическом построении наблюдаемых спектров звезд что-то не было учтено.

Вывислось так же, что к возникновению депрессии на 2400 Å атмосферы самих звезд, в частности их фотосферы, не причастны. Правда, каждой звезде присуща некая минимальная, вернее, естественная депрессия, величина которой D_0 одинакова для всех звезд одного и того же подкласса; эта естественная депрессия имеет сугубо фотосферное происхождение. Весь вопрос заключается в том, что во всех случаях, когда наблюдаемая депрессия D_* превышает D_0 , разность $D_* - D_0$, как правило, не одинакова для звезд строго одного и того же подкласса.

Остается, по-видимому, допустить возможность существования нового, доселе неизвестного источника поглощения, источника, который находится вне фотосферы звезды, на пути от звезды к наблюдателю.

Первое, наиболее тривиальное предположение — межзвездное поглощение — отпадает. Во-первых, максимум межзвездного поглощения находится не на 2400—2500 Å, а на 2200 Å. Во-вторых, локальная депрессия на 2400 Å остается всегда даже после внесения соответствующей поправки на влияние межзвездного поглощения. В-третьих, сама наблюдаемая величина депрессии, т. е. разность $D_* - D_0$, не находится ни в какой зависимости от полного поглощения $E(B-V)$ или расстояния звезды.

При таких условиях выходом из положения может быть, оказывается, только одно: допущение возможности существования вокруг горячих звезд околосветных облаков. Такое облако в состоянии вызвать дополнительное поглощение и в результате образовать депрессию в непрерывном спектре в области длин волн 2200—2600 Å с центром примерно на 2400 Å. При этом как глубина, так и протяженность этой депрессии зависят от мощности самого облака — его массы и размеров. Разные звезды могут быть окутаны облаками разных мощностей, и поэтому нет ничего удивительного, что у разных звезд одного и того же спектрального подкласса мы наблюдаем депрессию разной глубины, а у иных звезд ее и вовсе нет.

Выяснился также физический механизм образования самой депрессии; это — поглощение непрерывного спектра звезды только в резонансных линиях нейтральных и однажды ионизо-

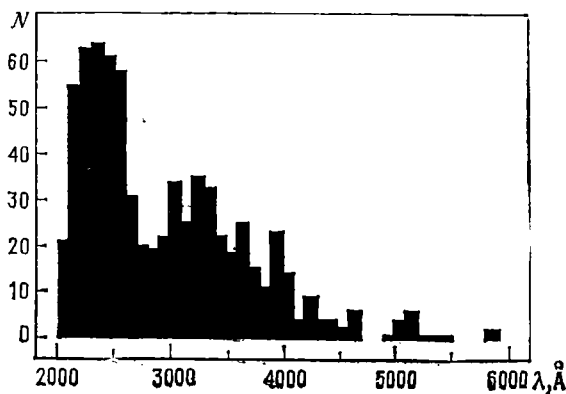


Рис. 9.12. Распределение числа резонансных линий N в интервале шириной 100 Å, принадлежащих более двадцати элементам по длине волны. Обращает на себя внимание очень сильная концентрация резонансных линий в ультрафиолете, в особенности в интервале 2300—2600 Å, и крайняя их малочисленность в видимой области (длине 4000 Å)

ванных атомов в облаке. Весьма убедительным доказательством этой точки зрения может служить само распределение числа резонансных линий для наиболее распространенных элементов по длине волны — оно представлено в графическом виде на рис. 9.12. Как следует из этого графика, максимум числа резонансных линий приходится как раз на область 2300—2500 Å и с густотой по 100 резонансных линий на 100 Å участка спектра.

Весьма примечательным (рис. 9.12) является факт быстрого уменьшения числа резонансных линий с переходом в сторону длинных волн, а в фотографической и фотовизуальной областях их практически нет совсем. Теперь стал понятным тот странный факт, почему околозвездные облака не были обнаружены до сих пор по данным наблюдений непрерывных спектров в обычном — оптическом диапазоне. Да потому, что в оптическом диапазоне почти нет резонансных линий — всего две-три пары. В этом кроется и причина устойчивости макроструктуры непрерывных спектров горячих звезд *в видимой области* даже в тех случаях, когда они явно окружены околозвездными облаками.

Из сказанного следует, кстати, что теория переноса лучистой энергии в *ультрафиолете* горячих звезд в самом общем случае должна учитывать влияние дополнительного поглощения в собственном околозвездном облаке. Что касается видимой области, то здесь теория может обойтись без учета этого фактора, сохраняя полностью существующее положение.

Межзвездная среда состоит из вещества, ни генетически, ни динамически не связанного с отдельными звездами. В отличие от нее околозвездное облако представляет собой образование, динамически независимое, но генетически связанное с центральной звездой. В этом смысле мы можем говорить об околозвездных облаках как о новой категории галактических образований, причем довольно многочисленной: общее количество околозвездных облаков в Галактике должно быть того же порядка, что и общее количество горячих звезд. Таким образом, освободившееся в процессе формирования и эволюции звезды вещество, прежде чем смешаться с межзвездной средой, «сосуществует» довольно долго в виде самостоятельного объекта на переходном этапе от звезды к межзвездной среде.

Что касается космогонического значения околозвездных облаков, то оно несомненно велико прежде всего с точки зрения возможного восстановления прошлой истории звезды. Ведь любого типа наблюдения, которые мы ведем сейчас над отдельными звездами, так или иначе дают информацию об их нынешнем состоянии и о процессах, идущих на данном этапе их жизни.

Это относится, в частности, к характеру и мощности выброса вещества из звезд. Между тем, «поймав» околозвездное облако у данной звезды и выведя все его параметры, мы сможем составить определенное суждение о ее прошлой деятельности, своего рода летопись прожитой жизни. Весь вопрос заключается в том, чтобы суметь прочесть этот «дневник»: правильно расшифровать данные наблюдений, раскрыть всю внутреннюю структуру облака, найти истинные значения его массы, размеры, определить химический состав, состояние ионизации, внутренней кинематики и пр.

Продолжать поиски околозвездных облаков у звезд разных типов, конечно, надо; собранный таким путем материал статистического характера, несомненно, представит самостоятельную ценность. Вместе с тем предметом особого внимания должно стать подробное и всестороннее изучение отдельных околозвездных облаков. При выборе же объектов исследования предпочтение следует отдать околозвездным облакам, связанным с двойными звездами, а также с горячими звездами в звездных ассоциациях [44].

9.4. Странное поведение линии 2800 Mg II у звезд класса A

Уже в тот период, когда стало возможным выделение и измерение по материалам «Ориона-2» ультрафиолетового дублета ионизованного магния 2800 Mg II в спектрах большого количества звезд разных классов, было обнаружено одно любопытное явление, касающееся поведения этой линии в спектрах звезд класса A, а именно: дисперсия эквивалентной ширины линии поглощения 2800 Mg II у этого класса звезд оказалась значительно больше, чем мы имели бы в случае, если бы эта дисперсия была вызвана ошибками измерений или естественным разбросом. Средняя величина $W(2800)$, например по индивидуальным данным около сорока звезд класса A0, составляет $5,5 \text{ \AA}$, в то время как наблюдаемые значения $W(2800)$ для отдельных звезд находятся в пределах $6\text{--}16 \text{ \AA}$ при средней величине эквивалентной ширины этого дублета $8 \text{ \AA}$. Это, так сказать, для нормальных звезд; «магниево» звезды не входят в эту группу.

Неожиданно интересное объяснение отмеченному явлению появляется в связи с представлением о том, что часть звезд класса A может быть окружена околозвездными облаками. Спектральный класс такого облака для этих звезд должен быть $^{\circ}\text{F}$ (см. рис. 9.6). Но ведь самой характерной чертой звезд клас-

са F является как раз присутствие в их спектрах исключительно мощной линии поглощения 2800 MgII, настолько мощной, что она по сути дела превращается в широкую и глубокую депрессию в непрерывном спектре. Не следует забывать, что дублет 2800 MgII является к тому же резонансным. Поэтому последствия присутствия даже слабого облака класса F вокруг звезды A дадут о себе знать прежде всего в том, что произойдет весьма заметное усиление собственной линии 2800 MgII в спектре звезды A.

Совершенно ясно, что в таких условиях даже малейшее отличие в общей мощности околозвездных облаков у разных звезд класса A отразится прежде всего на силе линии 2800 MgII в их спектрах. Иначе говоря, у одних и тех же звезд класса A со строго идентичными характеристиками (химический состав, эффективная температура, светимость и пр.) дисперсия в мощности околозвездных облаков тут же вызовет значительную дисперсию в интенсивностях дублета 2800 MgII. Таким образом, своего рода чувствительность звезд класса A к дублету 2800 MgII скорее всего следует объяснить тем, что они связаны с околозвездными облаками именно класса F, у которых дублет является наиболее сильной особенностью среди звезд всех классов.

Не отвергая возможности того, что наблюдаемые дисперсии в величинах эквивалентных ширин линии поглощения 2800 MgII в спектрах звезд класса A и ранее в какой-то мере могут быть объяснены дисперсией в относительном содержании самого магния в фотосферах этих звезд, представление о том, что по крайней мере часть из них может быть окружена околозвездными облаками, дает наиболее естественное и простое объяснение отмеченному явлению. В случае, если такое объяснение получит в дальнейшем подтверждение, мы, очевидно, сумеем по отклонению W (2800) от средней для данного класса звезды величины детектировать околозвездные облака вокруг них, что по сути дела является целью в обсуждаемой проблеме [2, 35].

9.5. Звезды без околозвездных облаков

Как уже отмечалось выше, сущность метода «депрессии» обнаружения околозвездных облаков состоит в анализе депрессии непрерывных спектров в районе длин волн 2400 Å, т. е. в сопоставлении наблюдаемой кривой распределения энергии в спектре той или иной звезды с соответствующей теоретической моделью, в которой учтено влияние эффекта блокировки. Именно это сопоставление может дать однозначный ответ на вопрос

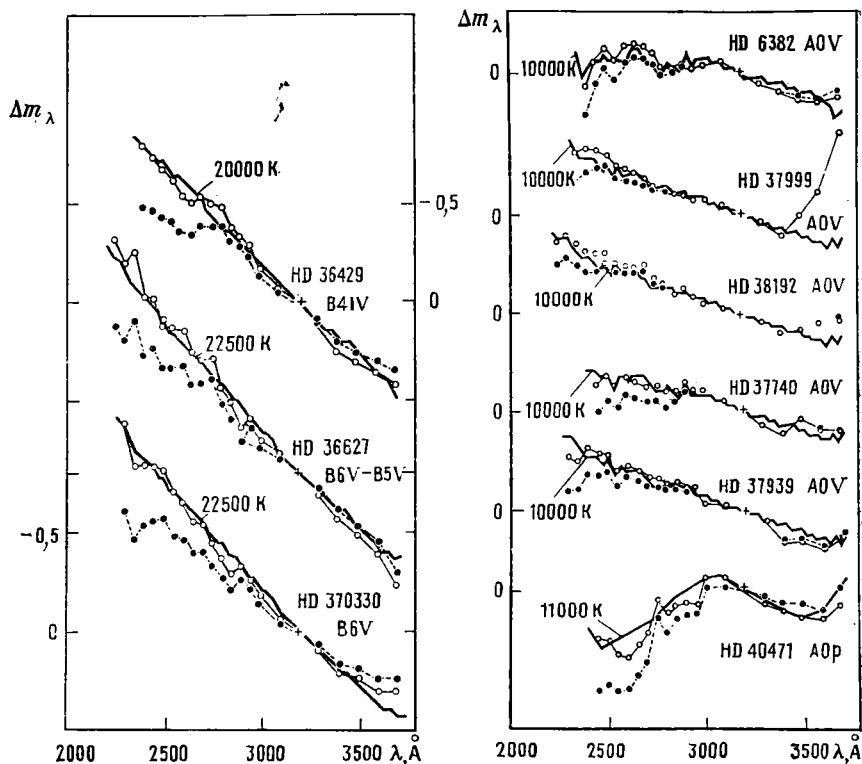


Рис. 9.13. Наблюдаемое (точки) и исправленное (кружки) распределение энергии в ультрафиолетовых спектрах звезд 36429, 36627 и 37330, по данным «Ориона-2». Сплошные линии — теоретические модели Куруча

Рис. 9.14. Наблюдаемое (точки) и исправленное (кружки) распределение энергии в ультрафиолете звезд класса A0 HD 6382, 37999, 38192, 37740, 37939 и 40471, по данным «Ориона-2». Сплошные линии — модели Куруча, а в случае HD 40471 — модель Лекрона

о присутствии или отсутствии околосветового облака вокруг рассматриваемой звезды.

У некоторых звезд, оказывается, околосветовые облака могут отсутствовать вовсе. Во всяком случае, если они даже и присутствуют, то их мощность не настолько велика, чтобы оказаться в пределах чувствительности нашего метода детектирования облаков.

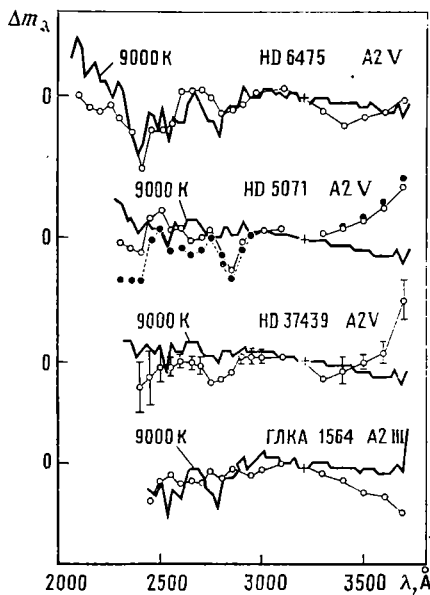


Рис. 9.15. Распределение энергии в непрерывном спектре звезд HD 6475, 5071, 37439 и ГЛКА 1564. В случае звезды HD 37439 указаны среднеквадратичные ошибки измерений

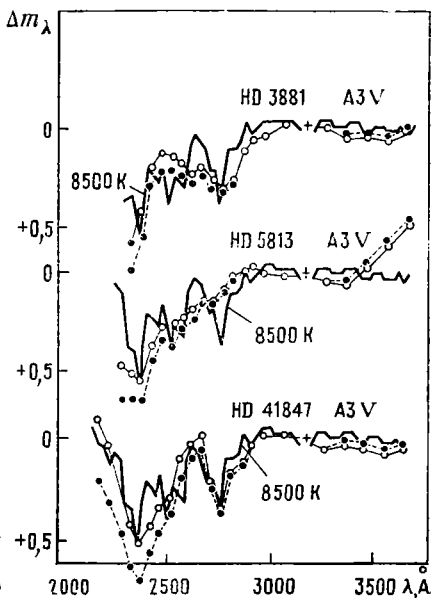


Рис. 9.16. Наблюдаемое и исправленное распределение энергии в спектрах звезд HD 3881, 5813 и 41847

В таких случаях следует попытаться получить однозначный ответ — «нет облака» — каким-либо иным методом, в частности методом 2800 MgII, если для этого имеются соответствующие данные об эквивалентной ширине этой линии.

Случаи отсутствия околозвездных облаков вокруг некоторых звезд представлены на рис. 9.13—9.16 (данные «Ориона-2»).

Что касается каталога ОАО-2, то из 134 проанализированных звезд 112, по всей вероятности, не обладают околозвездными облаками, вернее даже, если вокруг некоторых из них и имеются облака, методом «депрессии» они не обнаруживаются [22].

СПЕКТРАЛЬНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ЗВЕЗД
ПО УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ**10.1. Спектральная классификация звезд
по их коротковолновым спектрограммам**

В классической астрофизике спектральная классификация звезд осуществляется, как правило, на основе данных о структуре спектральных линий. Что касается непрерывных спектров, то они не были признаны достаточно информативными для того, чтобы стать индикаторами спектрального класса.

Иначе обстоит дело, когда мы переходим в область ультрафиолетовых лучей — короче 3000 Å и до 1000 Å. Здесь сам характер непрерывного спектра и в первую очередь длина изображения спектрограммы должны находиться в сильной зависимости от эффективной температуры звезды, т. е. от ее спектрального класса. Очевидно, приняв это свойство за основу, можно с успехом использовать коротковолновые спектрограммы для целей спектральной классификации звезд даже в тех случаях, когда спектральные линии отсутствуют вовсе.

В качестве наглядной иллюстрации на рис. 10.1 приведен фрагмент одного из снимков «Ориона-2». По нему можно убедиться, до чего резко отличаются друг от друга длины ультрафиолетовых спектрограмм двух звезд почти одного и того же блеска, одна из которых класса A0, а другая класса K0. Чем длиннее спектрограмма, тем горячее звезда, тем к более раннему классу она относится.

Другой пример сильной зависимости длины ультрафиолетовых спектрограмм (полученных с помощью объективной призмы) от спектрального класса показан на рис. 10.2, представляющем собой монтаж из четырех «орионовских» спектрограмм для звезд классов B9, A0, G5 и K0 соответственно; здесь даже на глаз видна разница в один подкласс (спектрограммы звезд B9 и A0), что само по себе говорит о чувствительности метода. По-видимому, этот метод при его массовом применении может обеспечить точность классификации не ниже двух или трех подклассов.

Таким образом, задача по сути дела сводится к построению «калибровочной кривой» классификации — кривой зависимости длины спектрограммы от спектрального класса, как это показано на рис. 10.3. Для этого необходимо подобрать на данном кадре, полученном с определенной экспозицией, несколько



Рис. 10.1. Фрагмент одного кадра, полученного с помощью «Ориона-2». Видны ультрафиолетовые спектрограммы двух звезд почти одного и того же блеска, одна из которых класса A0 (SAO 040280, стрелка слева), другая — класса K0 (SAO 040242, стрелка справа). На этом примере видно, как резко могут отличаться формы и в особенности длины спектрограмм в ультрафиолетовой области в зависимости от спектрального класса (эффективной температуры) звезды

звезд разных спектральных классов, но почти одного и того же фиксированного блеска V_k . Разумеется, каждая такая кривая может быть использована только для классификации звезд, блеск которых достаточно близок к V_k .

Что касается практического применения изложенного метода, то оно, конечно, должно быть осуществлено несколько иначе, в частности:

а) должны сравниваться друг с другом не длины спектрограмм, а их микрофотометрические записи без перехода к шкале интенсивности. В этом случае легко будет сгруппировать звезды с почти одинаковыми блесками. В какой-то мере будет доведен до минимума эффект межзвездного поглощения;

б) в случае невозможности подбора стандартных слабых звезд на данном кадре, такие стандарты могут быть подобраны среди *ярких* звезд, ультрафиолетовые спектрограммы которых

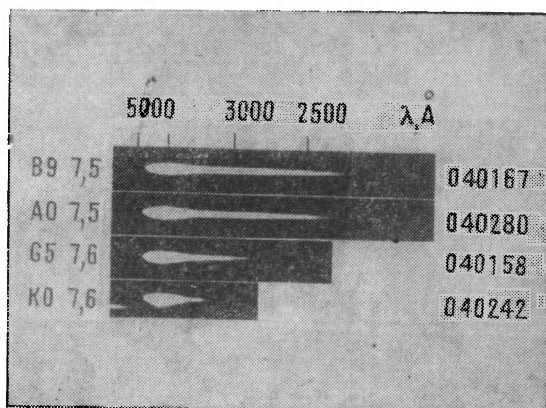


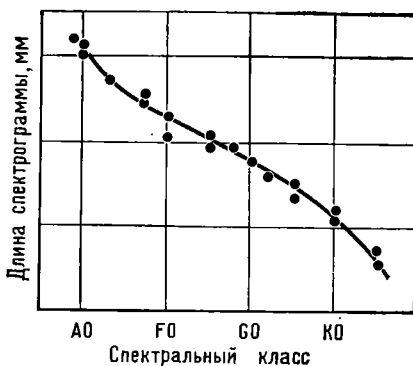
Рис. 10.2. Монтаж из четырех спектрограмм, полученных с помощью «Ориона-2» спектрограммы принадлежат звездам разных классов — B9, A0, G5, K0, но почти одного и того же блеска ($V=7^m,5-7^m,6$). Заметна разница между длинами двух спектрограмм звезд, отличающихся друг от друга на один спектральный подкласс (B9 и A0). Цифры справа — номера звезд по каталогу Смитсоновской астрофизической обсерватории

получены при меньших экспозициях. Однако в этом случае надо позаботиться о переходе от одного кадра к другому.

Спектральные снимки, полученные с применением широкопольных телескопов системы Шмидта и Максутова, а также объективных призм, отличаются, как известно, большой однородностью. Если добавить к этому возможность получения этим способом спектральных снимков сразу для очень большого количества звезд, то метод их спектральной классификации по длине ультрафиолетовых спектрограмм может оказаться весьма эффективным и прежде всего для слабых звезд. Имея в виду трудности получения спектрограмм слабых звезд с высоким спектральным разрешением, спектральная классификация на основе данных ультрафиолетовых спектрограмм умеренного и даже низкого разрешения в будущем может оказаться чуть ли не единственным выходом из положения.

Конечно, этот метод нуждается в доработке, вернее, его еще надо создать, прежде чем перейти к практическому применению. Здесь необходимо серьезно продумать учет влияния межзвездного поглощения. Ведь оно, по сути дела, сокращает длину спектрограммы, в результате чего мы будем иметь в лучшем случае оценку нижнего предела спектрального класса

Рис. 10.3. Калибровочная кривая для спектральной классификации звезд методом (длины ультрафиолетовых спектрограмм). Кривая строится для каждого кадра в отдельности с использованием длины спектрограмм звезд известных спектральных классов (точки). Чем длиннее спектрограмма, тем ранее спектральный класс звезды



рассмотренной звезды; истинный класс будет всегда несколько более ранним, чем класс, найденный из прямых наблюдений. Может создаться ситуация, при которой длины спектрограмм двух звезд существенно разных классов окажутся одинаковыми вследствие того, что одна из них (более раннего класса) может находиться на очень большом расстоянии от нас и поэтому коротковолновый «хвост» ее спектра будет сильно обрезан межзвездным поглощением.

Однако эти и подобные трудности, следует думать, будут преодолены, и в результате в руках астрофизиков окажется мощный, широко доступный и очень эффективный метод спектральной классификации слабых звезд массовым способом. Кстати, как раз здесь в большей мере, чем в других областях практической астрофизики, предвидится эффективное применение ЭВМ для автоматической обработки спектрограмм и отождествления спектральных классов звезд.

Описанный способ спектральной классификации — по длине коротковолновых спектрограмм — был применен в отношении группы примерно из 2000 слабых звезд (до 13^m) в области вокруг Капеллы, спектральные снимки которых были получены с помощью «Ориона-2». Полученные при этом результаты, однако, носят предварительный характер, поскольку поправки на влияние межзвездного поглощения не были внесены [17, 40].

10.2. Спектральная классификация звезд с помощью линии поглощения 2800 Mg II

В фотосферах горячих звезд классов O—B0 магний находится в основном высоких степеней ионизации — там количество однажды ионизованных атомов магния Mg^+ очень мало. По-

этому линии поглощения MgII у этих звезд должны быть очень слабые. По мере перехода к звездам поздних классов, т. е. по мере уменьшения эффективной температуры T_* , количество ионов Mg^+ в их фотосферах растет и, следовательно, должна расти эквивалентная ширина дублета магния, $W(\text{MgII})$. Иначе говоря, следует ожидать существования отрицательной корреляции между $W(\text{MgII})$ и T_* , а именно, роста $W(\text{MgII})$ с уменьшением T_* .

В фотосферах очень холодных звезд магний находится почти целиком в нейтральном состоянии, и поэтому у них линии MgII должны быть очень слабыми. По мере перехода к звездам ранних классов, т. е. по мере увеличения T_* , мы должны наблюдать рост $W(\text{MgII})$; в этом случае корреляция между $W(\text{MgII})$ и T_* положительная. Так мы приходим к выводу о существовании максимума в зависимости $W(\text{MgII})$ от T_* при переходе от горячих звезд к холодным.

Первое упоминание о существовании сильной зависимости между наблюдаемой интенсивностью или эквивалентной шириной линии поглощения 2800 MgII и спектральным классом было сделано еще в 1972 г. (Гурздян) на основе известных в то время данных всего четырех звезд: Солнца (G2), по ракетным наблюдениям В. П. Качалова и А. В. Яковлевой, Канопуса (F0), по ракетным наблюдениям Кондо (Kondo), Веги (A0), по наблюдениям «Ориона-1» (Гурздян, Оганесян) и пекулярной звезды $\gamma \text{ Cas}$ (B0,5) — по ракетным наблюдениям Бохлина (Bohlin); наблюдаемые значения $W(2800)$ для этих звезд оказались равными соответственно 66, 22, 3,2 и 0,5 Å. Построенный по этим данным график зависимости $W(2800)$ от спектрального класса показан на рис. 10.4.

Вскоре существование эмпирической зависимости $W(2800) \sim T_*$ получило подтверждение по результатам измерений для восьми звезд (Оганесян). Затем голландские астрофизики сделали шаг вперед, сопоставив найденную ими на основе данных наблюдений для 31 звезды эмпирическую зависимость $W(2800) \sim T_*$ с теорией. Наконец, после появления первых результатов «Ориона-2» для 51 звезды была построена более насыщенная для того времени (1975 г.) диаграмма зависимости $W(2800)$ от спектрального класса (Гурздян); график этой зависимости показан на рис. 10.5.

В дальнейшем, по мере обработки материалов «Ориона-2» (S-59, Cornegnicus), происходит резкое увеличение числа звезд с известными $W(2800)$ — оно превышает 400. При этом наблюдения S-59 (около 100 звезд) и Cornegnicus (около 40 звезд) ох-

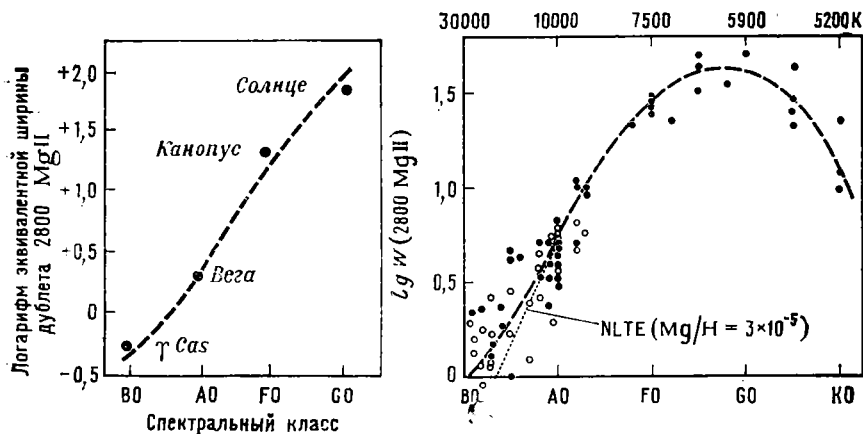


Рис. 10.4. Эмпирическая зависимость (по состоянию на 1972 г.) между эквивалентной шириной W (2800 MgII) дублета ионизованного магния 2800 MgII и спектральным классом по данным четырех звезд: Вегы (A0), Канопуса (F0), γ Cas (B0,5) и Солнца (G2).

Рис. 10.5. Эмпирическая зависимость (по состоянию на 1975 г.) логарифма эквивалентной ширины W (2800 MgII) (W берется в ангстремах) резонансного дублета ионизованного магния 2800 MgII от спектрального класса звезды, построенная по данным «Ориона 2» (точки) и S-59 (кружки). Точечной линией показана теоретическая зависимость для звезд классов B3—A0 при величине содержания магния (по сравнению с содержанием водорода) в их фотосферах, равной $3 \cdot 10^{-5}$

ватывают преимущественно звезды ранних классов (O—B3), а наблюдения «Ориона-2» (около 300 звезд) — звезды почти всех классов — от B0 до K0. Что касается звезд класса M до 10—11^m, то у них линии поглощения MgII не должны наблюдаться вовсе из-за очень низкого уровня собственного непрерывного излучения звезды на этом участке спектра; у этих звезд дублет MgII, как правило, выступает в эмиссии и имеет хромосферное происхождение. Частично это относится и к звездам класса K.

Несмотря на неоднородность собранного наблюдательного материала, все-таки можно сделать некоторые выводы, касающиеся поведения дублета MgII у звезд разных спектральных классов. С этой целью построен график зависимости между W (MgII) и спектральным классом (рис. 10.6), по данным наблюдений упомянутых выше трех орбитальных обсерваторий —

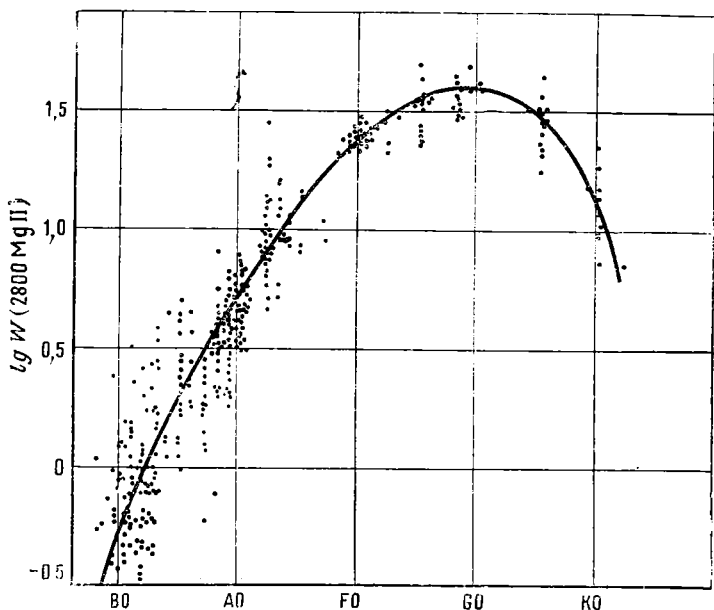


Рис. 10.6. Эмпирическая зависимость (по состоянию на 1980 г.) логарифма эквивалентной ширины W (2800 MgII) от спектрального класса, по данным «Ориона-2» (около 300 звезд), Coregnicus (около 40 звезд) и S-59 (около 100 звезд)

TD-1A(S-59), Coregnicus и, в особенности, «Ориона-2». При построении этого графика, который по существу представляет собой своего рода третье поколение (1980 г.) в истории построения эмпирической зависимости между $W(\text{MgII})$ и спектральным классом, были использованы, насколько это возможно, исправления с учетом влияния межзвездного магния значения $W(\text{MgII})$.

Следует отметить, что под $W(\text{MgII})$ на рис. 10.6 подразумевается суммарная эквивалентная ширина для всех четырех линий MgII — двух резонансных (2795 и 2803 Å) и двух субординатных (2790 и 2798 Å). Впрочем, вклад последних двух относительно невелик — в среднем 20—25 % от суммарной величины $W(\text{MgII})$. Вместе с тем использование суммарной эквивалентной ширины всех четырех линий представляет определенное удобство для анализа в тех случаях, когда по постановке самого эксперимента эти компоненты не должны разрешаться (например, в случае «Ориона-2»).

Как следует из последнего рисунка, величины $W(\text{MgII})$ у горячих звезд действительно малы — меньше 1 Å у звезд О и порядка 1—3 Å у звезд В. Далее, с переходом к звездам А и F эквивалентная ширина дублета MgII продолжает расти; она находится в пределах 5—15 Å у звезд класса А и доходит до 25 Å у звезд класса F0. Своего максимального значения — около 40 Å — $W(\text{MgII})$ достигает у звезд F5—G0. Затем, с переходом к звездам более поздних классов, кривая падает сравнительно быстро; у звезд, например класса K0, величина $W(\text{MgII})$ порядка 10 Å.

Обращает на себя внимание разная степень рассеяния (дисперсия) наблюдаемых точек у звезд разных классов; она больше у звезд ранних классов (О—В) и существенно меньше у звезд классов F—G. Разумеется, в известной степени это рассеяние вызвано ошибками измерений — они относительно велики в случае звезд О—В и малы в случае звезд поздних классов. Последнее заключение нельзя считать окончательным; возможно, по мере появления новых данных для звезд классов F—G дисперсия в величинах $W(\text{MgII})$ может увеличиться.

Крайние значения $W(\text{MgII})$ на приведенной кривой зависимости $W(\text{MgII})$ — спектр отличаются (между классами О—В и F5—G0) более чем в сто раз (!). Это свидетельствует о большой чувствительности силы дублета 2800 MgII к спектральному классу, а по существу к эффективной температуре и модели фотосферы, несмотря на то, что разброс, по всей вероятности, вполне реальный, в величинах $W(\text{MgII})$ у отдельных классов относительно велик.

На рис. 10.6 нанесена также кривая, фиксирующая среднее положение зависимости $W(\text{MgII})$ — спектр. Средние наблюдаемые значения эквивалентной ширины $W(\text{MgII})$ ультрафиолетового дублета 2800 MgII для звезд разных классов, по данным «Ориона-2», следующие (для классов О8—В0 — по данным S-59):

Спектральный класс	$W \text{ Mg II}$ Å	Спектральный класс	$W \text{ Mg II}$ Å
O8	0,5	F0	26
B0	0,6	F2	29
B2	0,8	F5	35
B5	1,8	F8	39
B8	3,5	G0	40
A0	5,5	G2	38
A2	8,2	G5	30
A5	14	G8	20
A8	21	K0	13

Найденная эмпирическая зависимость $W(\text{MgII})$ — спектр может представить исключительный интерес прежде всего для спектральной классификации звезд: располагая ультрафиолетовым спектром интересующей нас звезды неизвестного спектрального класса и найдя из него наблюдаемую величину $W(\text{MgII})$, нетрудно определить затем с помощью кривой на рис. 10.6 искомый спектральный класс. Преимущество этого метода заключается в том, что общее межзвездное поглощение, обусловленное пылевой составляющей межзвездного вещества, не влияет на величину $W(\text{MgII})$; на нее влияет только поглощение межзвездными ионами магния. Поэтому метод «магния» для целей спектральной классификации нуждается в более детальной разработке. Так или иначе перспективность и возможность широкого применения этого метода вряд ли вызывает сомнение, в особенности, если иметь в виду возможность получения массовым способом, с помощью широкопольных телескопов и объективных призм, спектрограмм сразу для большого количества звезд.

Немаловажное значение имеет также то обстоятельство, что дублет MgII является наиболее доступной спектральной особенностью звезд в самом близком ультрафиолете.

В рассматриваемом случае — спектральная классификация звезд — речь идет по существу о практическом применении найденной эмпирической зависимости $W(\text{MgII})$ — спектр. Однако эта зависимость может и должна представлять определенный интерес также и для теории. Дело в том, что теория пока не в состоянии предсказать ожидаемую интенсивность (эквивалентную ширину) дублета MgII в поглощении у звезд спектрального класса позднее A2. Но конечной целью теории, очевидно, должен быть вывод теоретической зависимости $W(\text{MgII})$ — спектр вдоль всей спектральной последовательности — от O до K. Возможно, более углубленная трактовка этой проблемы закончится представлением не одной кривой, а целого семейства кривых, изображенных на рис. 10.6, охватывающих те или иные свойства или особенности самой звезды или ее фотосферы. И тогда, возможно, станет понятной наблюдаемая дисперсия или физический разброс в каждой точке — в каждом спектральном классе — указанной зависимости.

Несомненно, при более строгой постановке проблемы следовало бы говорить не об одной единственной кривой зависимости $W(\text{MgII})$ — спектр, а о целой полосе с определенной — и непостоянной — шириной вдоль этой зависимости [6, 35, 41, 47].

10.3. Спектральная классификация звезд с помощью линий Fe I и Fe II

Несмотря на не очень высокое спектральное разрешение снимков «Ориона-2», все-таки удалось проследить за поведением двух линий поглощения — 2967 Fe I и 2755 Fe II — в спектрах звезд разных классов. Это поведение вполне определенное: эквивалентная ширина линии нейтрального железа 2967 Fe I растет с переходом от звезд ранних классов к поздним (рис. 10.7), эквивалентная же ширина линии ионизованного железа 2755 Fe II наоборот, уменьшается (рис. 10.8). Правда, эти линии, в особенности 2755 Fe II не были выделены на «орионовских» спектрах в чистом виде, они оказались блендированными другими слабыми линиями поглощения. Но выбранные линии 2967 Fe I и 2755 Fe II обладают как раз тем преимуществом, что находящиеся в соседстве с ними линии поглощения принадлежат почти целиком нейтральному железу в первом случае и ионизованному железу во втором. Благодаря этому линии, вернее бленды, дают некую обобщенную информацию об относительном содержании нейтрального и ионизованного железа соответственно в фотосфере данной звезды. Заметим, что поведение линий 2967 Fe I и 2755 Fe II вдоль спектральной последовательности не противоречит тому, что было известно ранее по данным линий поглощения Fe I и Fe II в оптическом диапазоне.

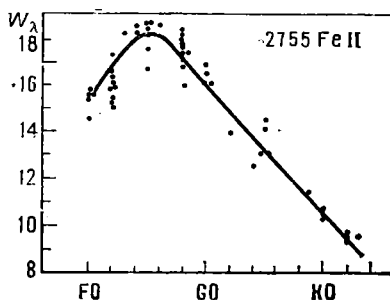
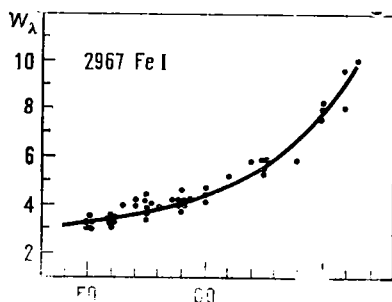


Рис. 10.7. Эмпирическая зависимость между эквивалентной шириной линии поглощения 2967 Fe I и спектральным классом звезды, по данным «Ориона-2»

Рис. 10.8. Эмпирическая зависимость между эквивалентной шириной линии поглощения 2755 Fe II и спектральным классом, по данным «Ориона-2»

Очевидно, найденные закономерности можно использовать для целей спектральной классификации звезд промежуточных классов — от F0 до K5. Для этого достаточно найти из спектрограммы рассматриваемой звезды эквивалентную ширину линий 2967 FeI или 2755 FeII; по существу обе линии должны дать один и тот же результат, а на практике, очевидно, придется использовать средние из найденных по обеим линиям оценки спектрального класса [14].

ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЗВЕЗДНЫХ АТМОСФЕР

11.1. Электронная концентрация звездных фотосфер по данным линий магния

В астрофизике существует немало способов определения эффективной температуры звездных фотосфер. К тому же эти способы довольно надежны и дают уверенные результаты.

Иначе обстоит дело с определением электронной концентрации в звездных фотосферах. По сути дела астрофизика располагает всего двумя методами определения средних электронных концентраций в фотосферах. Один из них основан на использовании спектральных линий одного и того же атома в разных стадиях ионизации. Из доступных в оптическом диапазоне линий в практике используются для этой цели линии CaI и CaII — резонансная линия 4227 CaI и резонансный дублет 3933 CaII и 3968 CaII. Иногда используются аналогичные линии для стронция — 4607 SrI и 4078 SrII и 4216 SrII. Но эти линии не всегда доступны и удобно выделяемы. К тому же линии нейтрального кальция вовсе отсутствуют в спектрах звезд O и B, а линии нейтрального стронция можно обнаружить в спектрах звезд начиная лишь с класса F0 и позднее.

Второй метод нахождения электронной концентрации в фотосферах звезд основан на подсчете линий балмеровской серии водорода, вернее, фиксации номера последней линии этой серии в спектре звезды; номер линии зависит от электронной концентрации среды. Однако применение этого метода возможно лишь в случае получения спектрограммы интересующей нас звезды с достаточно высоким спектральным разрешением.

Оба способа нахождения n_e не отличаются высокой точностью. Поэтому поиски новых путей или даже расширение области применения, скажем, первого метода может стать существенным прогрессом в данной проблеме. В этом отношении весьма многообещающими представляются резонансные линии 2852 MgI и 2800 MgII (имеется в виду их доступность — когда есть возможность выхода за пределы земной атмосферы — в широком диапазоне класса звезд и удобство их выделения и измерения даже на спектрограммах умеренного разрешения). Это относится, в частности, к использованию наблюдательного материала «Ориона-2» для этой цели.

Имея из наблюдений эквивалентные ширины W (2800) и W (2852) для интересующей нас звезды, с помощью соответст-

вующих кривых роста мы находим полное число ионов и нейтральных атомов магния N^+ и N_1 , а отсюда — эффективную степень ионизации N^+/N_1 , разумеется, усредненную по всей глубине обрабатываемого слоя. Остается лишь представить N^+/N_1 в зависимости от электронной концентрации n_e , и тогда последняя будет определена.

Имеем из условия ионизационного равновесия:

$$n_1 \int_{\nu_0}^{\infty} \alpha_{\nu} \frac{4\pi B_{\nu}(T_*)}{h\nu} d\nu = n^+ n_e D^+(T_e),$$

где n_1 и n^+ — концентрации нейтральных и однажды ионизованных атомов в заданном слое фотосферы; $D^+(T_e)$ — полный коэффициент рекомбинации ионов магния со свободными электронами; α_{ν} — коэффициент непрерывного поглощения магния; ν_0 — частота ионизации магния.

Умножая обе части этого уравнения на элемент оптической толщи $d\tau$ и интегрируя от 0 до ∞ , найдем для среднего значения электронной концентрации n_e :

$$n_e = 1,17 \cdot 10^8 \frac{N_1}{N^+} \frac{T_*}{D^+(T_e)} e^{\frac{-90\,000}{T_*}}.$$

Зависимость D^+ от T_e обычно довольно слабая, а в условиях фотосфер можно принять $T_e \approx T_*$. Далее, имея в виду, что у звезд F—G эквивалентные ширины линий 2800 и 2852 Å довольно значительные — больше 5 Å, что соответствует самой крайней — третьей части кривой роста, можем принять $W \sim (fN)^{1/2}$, где f — сила осциллятора. В этом случае отношение N^+/N_1 может быть представлено непосредственно через эквивалентные ширины W (2800) и W (2852), и тогда формула зависимости n_e (в см^{-3}) от этих параметров наблюдений может быть представлена в явном виде, а именно:

$$n_e = 0,7 \cdot 10^{15} \left[\frac{W(2852)}{W(2800)} \right]^2 T_* e^{\frac{-90\,000}{T_*}}.$$

В качестве иллюстрации в табл. 11.1 приведены значения n_e , найденные описанным способом («метод магния») для фотосфер группы звезд классов F0—K0. При этом использованы данные наблюдений «Ориона-2» для W (2800) и W (2852). Судя по этим данным, электронная концентрация в звездных фо-

Таблица 11.1

Электронная концентрация n_e в фотосферах ряда звезд классов F0—K0, найденная «методом магния» (по данным «Ориона-2»)

Звезда SAO	Спектральный класс	$W(2852)$, ° A	$W(2800)$ ° A	n_e , см ⁻³	Звезда SAO	Спектральный класс	$W(2852)$, ° A	$W(2800)$ ° A	n_e , см ⁻³
040226	F0	14	27	$1,0 \cdot 10^{13}$	008	F8	14	36	$0,4 \cdot 10^{12}$
136	F0	12	29	$0,6 \cdot 10^{13}$	124	G0	16	50	$0,14 \cdot 10^{12}$
251	F2	13	23	$0,5 \cdot 10^{13}$	158	G5	14	30	$0,7 \cdot 10^{11}$
077	F5	15	50	$0,6 \cdot 10^{12}$	289	G5	17	45	$0,4 \cdot 10^{11}$
104	F5	15	44	$0,7 \cdot 10^{12}$	146	G5	17	25	$1,4 \cdot 10^{11}$
170	F5	15	35	$1,1 \cdot 10^{12}$	374	K0	9	12	$0,2 \cdot 10^{11}$

тосферах падает довольно быстро (на два порядка) при переходе от звезд класса F0 до K0 [2, 6].

11.2. Еще раз об электронной концентрации в звездных фотосферах

Довольно четко выраженное поведение указанных выше линий 2967 FeI и 2755 FeII вдоль спектральной последовательности (см. рис. 10.7 и 10.8) позволяет предложить еще один метод нахождения электронной концентрации n_e в звездных фотосферах, аналогично тому, как это было сделано выше по линиям MgI и MgII. Для этого достаточно знать из наблюдений числовое значение параметра Q , представляющего собой отношение эквивалентных ширин указанных линий:

$$Q = \frac{W(2755)}{W(2967)}.$$

Затем, пользуясь формулой, выведенной почти тем же путем, что и для случая «метода магния»:

$$n_e = 1,20 \cdot 10^{17} \frac{T_*}{Q^2} e^{-\frac{92290}{T_*}}$$

можно найти n_e .

На рис. 11.1 показано изменение параметра Q вдоль спектральной последовательности от F0 до K2; эта кривая была построена по результатам измерений спектрограмм нескольких десятков

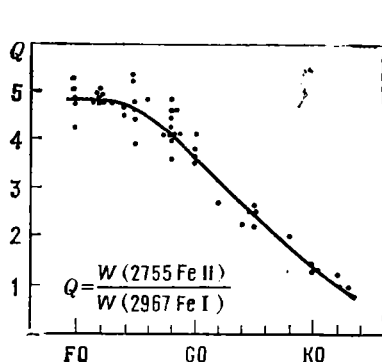


Рис. 11.1. Зависимость параметра Q от спектрального класса, построенная по данным рис. 10.7 и 10.8

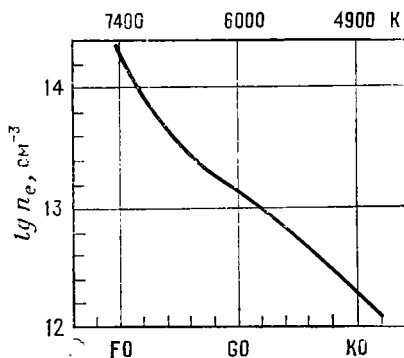


Рис. 11.2. Найденная «методом Q » зависимость электронной концентрации в фотосферах звезд промежуточных типов (F0—K2) от спектрального класса

звезд, полученных «Орионом-2». С помощью этой кривой была найдена электронная концентрация в фотосферах звезд классов F0—K2; она оказалась равной:

Спектральный класс	n_e , см ⁻³
F0	$14,7 \cdot 10^{13}$
F2	$6,7 \cdot 10^{13}$
F5	$3,0 \cdot 10^{13}$
G0	$1,25 \cdot 10^{13}$
G5	$0,60 \cdot 10^{13}$
K0	$0,22 \cdot 10^{13}$

В графическом виде зависимость n_e от спектрального класса показана на рис. 11.2.

Полученные результаты оказались на порядок больше, чем мы имели выше при «методе магния». О причинах расхождения трудно сказать что-либо определенно; этот вопрос может стать предметом отдельного рассмотрения. В частности, не следует исключать возможность того, что линии железа, с одной стороны, и линии магния, с другой, могут возбуждаться в разных слоях фотосферы звезды [14].

11.3. Метод нахождения эффективной температуры горячих звезд с помощью линий 2905 Si II и 2932 Mg II

Наблюдения, сделанные «Орионом-2», позволили выделить две линии 2905 Si II и 2932 Mg II в спектрах звезд, отношение которых, оказывается, может быть использовано для нахождения эффективной температуры звезды.

Спектральные линии 2905 Si II и 2932 Mg II, соответствующие линии H_{α} водорода, наблюдаются в поглощении в спектрах горячих звезд — от B0 до A0. Однако силы самих линий выступают в разных соотношениях в зависимости от спектрального класса, а по существу от эффективной температуры звезды. У звезд класса B1 силы (эквивалентные ширины W) обеих линий почти одинаковы. По мере перехода к звездам поздних классов линия 2905 Si II становится слабее линии 2932 Mg II, т. е. $W(2905 \text{ Si II}) < W(2932 \text{ Mg II})$. У звезд же классов ранее B1 наблюдается обратное соотношение — $W(2905 \text{ Si II}) > W(2932 \text{ Mg II})$.

На рис. 11.3 представлены фрагменты микрофотометрических записей спектров «Ориона-2», характеризующие изменение силы указанных ли-

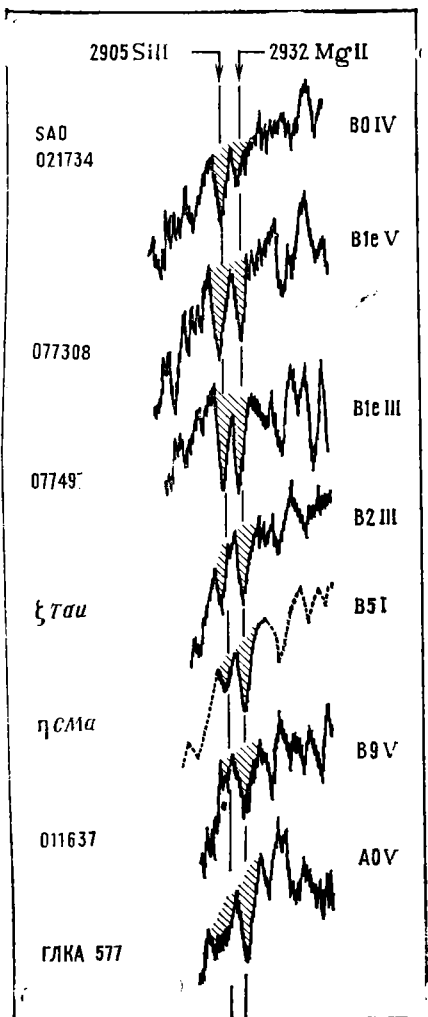


Рис. 11.3. Последовательность фрагментов микрофотометрических записей спектров, характеризующая изменение силы линий 2905 Å (2904 + 2906) Si II и 2932 (2928 + 2936) Mg II при переходе от звезд B0 к A0

ний при переходе от звезд B0 к A0. В спектре звезды SAO 021734 класса B0 IV линия кремния значительно сильнее линии магния. У звезды SAO 077308 класса B1e V линия 2932 MgII сильнее, чем у предыдущей. Создается впечатление, что линии 2905 SiII и 2932 MgII выравниваются по силе у звезды SAO 077497, гиганта спектрального класса B1e. В спектре ξ_0 Тау класса B2e III—V линия кремния как будто ослабевает по сравнению с линией магния. У звезды η CMa, сверхгиганта класса B5, глубины линий 2905 SiII и 2932 MgII соответствуют данным Андерхилл, а контуры нанесены условно. Начиная со спектрального класса B2 линия 2905 SiII становится слабее линии 2932 MgII. Еще слабее линия кремния по сравнению с линией магния в спектре звезды SAO 011637 класса B9V и исчезает у звезды ГЛКА 577, классифицируемой как A0V.

Особо примечательны эти две линии с практической точки зрения: они находятся рядом, буквально соприкасаясь (во всяком случае на «орионовских» снимках), благодаря чему крайне упрощается нахождение отношения их интенсивностей. В этом случае следует полагать что ошибки при нахождении отношения $W(2905)/W(2932)$ должны быть намного меньше, чем те, которые обычно возникают при измерении эквивалентных ширин. Своеобразие ситуации заключается еще в том, что по многим атомным параметрам SiII и MgII одинаковые. Так, одинаково у кремния и магния их космическое содержание, а также одинаковы их потенциалы первой и второй ионизации (χ^+ и χ^{++}). Единственное, чем отличаются условия возбуждения линий 2905 SiII и 2932 MgII — это потенциалы возбуждения ϵ_{12} исходных (резонансных) уровней: в случае MgII ($\epsilon_{12} = 4,42$ эВ) в два раза меньше, чем в случае SiII ($\epsilon_{12} = 9,84$ эВ). Вследствие этого населенности резонансных уровней, от которых зависят силы упомянутых линий, становятся существенно отличными при данной эффективной температуре звезды.

Мы можем, однако, оценить, хотя бы качественно, ожидаемое поведение отношения интенсивностей указанных линий в зависимости от эффективной температуры звезды. При допущении, что относительные интенсивности этих линий определяются населенностью атомов на резонансных уровнях, можно написать в первом приближении:

$$\frac{E(2905 \text{ Si II})}{E(2932 \text{ Mg II})} \approx C \frac{(n_2^+/n_1^+)_{\text{Si}}}{(n_2^+/n_1^+)_{\text{Mg}}} = C e^{-\frac{\epsilon_{12}^{\text{Si}} - \epsilon_{12}^{\text{Mg}}}{kT}},$$

где T_* — температура звезды, значение C можно найти из условия, что $E(2905 \text{ Si II})/E(2932 \text{ Mg II}) \approx 1$ при $T_* = 20\,000 \text{ К}$.

Тогда будем иметь, подставляя также числовые значения ϵ_{12} для Si II и Mg II:

$$\frac{E(2905 \text{ Si II})}{E(2932 \text{ Mg II})} = 23,4 e^{-\frac{63\,500}{T_*}}.$$

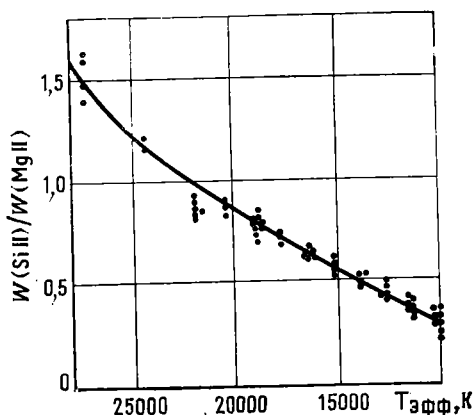
Применив эту формулу для ряда значений T_* , найдем значения указанного отношения для последовательности $B0 \rightarrow B1 \rightarrow \rightarrow A0$: 1,87 при $T_* = 25\,000 \text{ К}$, 0,04 при $T_* = 10\,000 \text{ К}$. Полученные цифры качественно находятся в согласии с тем, что мы имеем на рис. 11.3.

На рис. 11.4 представлена графическая зависимость между эффективной температурой звезд спектральных классов $B0-A0$ и отношением эквивалентных ширин ионизованных дублетов 2905 Si II и 2932 Mg II, построенная на основе обработки коротковолновых спектрограмм 58 звезд по данным «Ориона-2». Как следует из этого рисунка, наибольший разброс имеет место у звезд типа A0 и B0, достигая в среднем 25 %. По мере продвижения к спектральным классам $B4-B5$ как справа, так и слева величина разброса уменьшается, достигая минимума у звезд типа B5 ($T_{\text{эфф}} = 16\,500 \text{ К}$).

Полученные результаты позволяют проводить спектральную классификацию с максимальной погрешностью в два подкласса у звезд классов A0 и B0 и с точностью в полтора подкласса у звезд по всему диапазону.

Таким образом, найденная закономерность может превратиться в чувствительный индикатор для определения эффективной температуры звезд ранних классов.

Рис. 11.4. Эмпирическая зависимость между эффективной температурой звезд спектральных классов $B0-A0$ и отношением эквивалентных ширин линий ионизованных дублетов 2905 Si II и 2932 Mg II, построенная по данным ультрафиолетовых спектрограмм 58 звезд (данные «Ориона-2»)



сов по величине отношения интенсивностей линий поглощения 2905 SiII и 2932 MgII.

Обычно в астрофизической практике эффективные температуры звездных фотосфер находятся, как правило, по результатам анализа непрерывных спектров звезд. Здесь же был предложен по сути дела метод нахождения эффективных температур с помощью линий поглощения. Следует полагать поэтому, что предложенный метод может найти успешное применение во всех тех случаях, когда у нас будут спектрограммы звезд до ближнего ультрафиолета (до 2800 Å).

Найденные описанным способом эффективные температуры, очевидно, следует отнести к распределению непрерывных спектров звезд в области длин волн, короче границы ионизации Mg и Si, т. е. практически короче 1600 Å [24, 45].

КОСМИЧЕСКИЙ КОРАБЛЬ НА СЛУЖБЕ ГЛАВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Более десяти лет прошло с того времени, когда мне, совместно с Валентином Лебедевым, было оказано большое доверие — провести эксперимент на космическом корабле «Союз-13» с космической обсерваторией «Орион-2» на борту. К этому полету мы оба готовились недолго, около года, однако к каждой тренировке, каждому испытанию относились с большой ответственностью и с большим старанием.

Взаимопонимание в нашем экипаже, мне кажется, находилось на том уровне, который способствовал успешному усвоению программы полета. Это было обусловлено тем, что каждый из нас в отдельности приступил к изучению космического корабля и подготовке к эксперименту задолго до полета. В частности, мы досконально изучали звездное небо, конфигурации созвездий, запоминали названия и звездные величины множества звезд: для этого много лет подряд, три раза в неделю, по вечерам посещали Московский планетарий. На самолетах выполняли полеты в южные районы нашей страны, где наблюдали за звездным небом для приобретения устойчивого навыка отыскивать необходимые светила при реальной работе и особенно при недостатке времени. Нас обучали, как по самому кратчайшему пути переходить от наблюдения одного созвездия к другому. Свободного времени фактически не было, готовились не только в рабочие дни, но и по вечерам и по воскресеньям. Подготовка нам нравилась не только познанием нового, но и прекрасным отношением преподавателей, конструкторов, ученых, инженеров-инструкторов, всех, кто участвовал в данной работе.

Мы освоили действия экипажа в различных климато-географических условиях, проводили совместные морские испытания, теоретически готовились к каждой тренировке.

Космонавтам сотни часов приходилось работать в космическом корабле-тренажере, который дает возможность проигрывать все участки космического полета на Земле, отработать выведение и спуск, всевозможные динамические операции и многое другое. Но самое основное, ради чего необходимо было выполнить данный полет — астрофизическая обсерватория «Орион-2», которая устанавливалась снаружи бытового отсека космического корабля «Союз-13». Именно для вывода этой обсерватории на орбиту вокруг Земли и был предназначен запуск космического корабля «Союз-13».

Этот научный эксперимент был задуман и разработан учеными АН Арм. СССР под непосредственным научным руковод-

ством чл. — корр. АН Арм. ССР Г. А. Гурзадяна. Не один раз мы побывали в то время в Армении, познакомились, подружились с профессором Г. А. Гурзадяном. Он возлагал на нас большие надежды.

В процессе подготовки в Армении мы изучали в деталях аппаратуру «Орион-2», теоретически и практически готовили себя к управлению космическим телескопом, слушали лекции астрофизиков и инженеров, много ночей провели в обсерватории, наблюдая интересующие нас звезды и работая с пультом управления телескопом «Орион-2». Интересно и с большим энтузиазмом ученые и инженеры, занимающиеся созданием обсерватории «Орион-2», рассказывали и объясняли нам все то, что необходимо было выполнить на орбите, все те особенности, которые могут возникнуть при ее эксплуатации.

Даже обычное общение между космонавтами создателями научной аппаратуры позволяло нам быть уверенными в надежной работе техники, а ученым — в правильности наших действий.

В обсерватории мы познакомились с удивительными оптическими приборами, телескопами и спектрографами. Из-за полной непрозрачности земной атмосферы в коротковолновых (ультрафиолетовых) лучах наблюдения наземных обсерваторий ограничиваются узким оптическим диапазоном длин волн. Между тем, информативность ультрафиолетовых лучей поистине необъятна, и для их наблюдений необходимо вывести обсерваторию за пределы земной атмосферы на высоту более 200 км.

В 1971 году экипаж орбитальной станции «Салют-1» с помощью астрофизической обсерватории «Орион-1» впервые в нашей стране получил ультрафиолетовые спектрограммы нескольких звезд.

Атмосфера, которая задерживает пагубное для всего живого ультрафиолетовое излучение, не дает возможности ученым получать интересующую их информацию. Космос — для астрономов — непочатый край работы. Вот поэтому, занимаясь вопросами астрофизики, пришли к выводу, что необходимо создать космическую обсерваторию и поставить ее на борт космического корабля. Создать такую обсерваторию не так-то просто. Во-первых, сама обсерватория представляет собой сложный аппарат с уникальной оптикой и сложной конструкцией. Во-вторых, с помощью специальных устройств и двигателей необходимо направить эту обсерваторию на интересующий участок звездного неба. В-третьих, ввиду того, что спектрофотографирование осуществляется с длительными экспозициями — до

30 мин — необходимо снабдить космическую обсерваторию, вернее, ее телескоп специальной следящей системой. Иначе говоря, телескоп должен в течение длительного времени быть направленным в нужную точку звездного неба и практически на него не должны влиять колебания и качки космического корабля.

Всем этим требованиям и отвечала астрофизическая обсерватория «Орион-2». Перед тем, как оказаться на орбите, тщательно проверялась ее работоспособность и надежность в управлении. Затем она была установлена на борт «Союз-3» снаружи бытового отсека. Все агрегаты и двигатели обсерватории должны были работать в открытом космосе — это еще одна особенность «Ориона-2».

После успешной сдачи экзаменов и заключительной комплексной тренировки нас отправили на самолетах на Байконур. Там, на космодроме, в течение двух недель мы должны были провести отсидку в космическом корабле, последнюю примерку всего снаряжения, заниматься подготовкой документации.

Чем ближе приближалась дата старта, тем больше увеличилось волнение, и после того, когда на государственной комиссии наш экипаж был утвержден первым, все наши мысли заняли космический полет и действия на орбите. Любой момент сопровождался непосредственной мыслью о выполнении задания, о старте и работе на орбите.

18 декабря 1973 г. никогда не забудется! Его я ждал долго. Целых девять лет! Это был солнечный и прекрасный день!

Когда мы вышли из автобуса на космодроме, нас ослепила своим серебристым блеском ракета. Не знаю, может и забилося у меня сердце чаще, но тревоги, а тем более страха не было. С приятным волнением простились мы со всеми, кто оставался на Земле, быстро вошли в кабину лифта и очутились на вершине ракетносителя у нашего «Союза-13».

Мы заняли свои места в стартовых креслах космического корабля. Закрыли люки. До старта — 2 часа. Набирается стартовая готовность. Экипаж проверяет оборудование и аппаратуру корабля. И вот подаются команды: — Ключ на старт.

— Зажигание.

Прижимаюсь к ложементу, специально отлитому по конфигурации тела. Очень медленно идут секунды. И вот, наконец: —

Предварительная!

В кабину доходит чуть приглушенный объемный звук от предварительной работы двигателей.

— Пуск!

И тут сквозь обычный шум работы агрегатов жизнеобеспечения вдруг врывается оглушительный треск и гул работы двигателя. Неожиданно какая-то неведомая сила будто приподняла меня над креслом, секунду покачала, а потом плавно опустила и начала вдавливать в ложемент. Перегрузки выведения доходят до четырех единиц — это значит, что твой собственный вес увеличивается в четыре раза. Весь процесс выведения длится немногим более 10 мин. Однако минуты эти тянутся довольно медленно.

Ракета-носитель тем временем поднимается все выше и выше. Скорость все возрастает. Чувствуется незначительное дрожание, небольшое колебание по тангажу.

С Земли идут четкие команды:

— Тангаж, рысканье в норме. Давление в камере сгорания двигателя заданное.

Как обычно отвечаем:

— Самочувствие хорошее, работа двигателя на слух нормальная.

Проходит чуть больше двух минут. Что-то негромко шелкнуло, шум от работы двигателей уменьшился. Прошло отделение первой ступени ракетносителя. Проходит третья минута, опять слышен треск. Это отделился головной обтекатель ракеты. Сейчас он не нужен. Защищать корабль «Союз-13», находящийся под обтекателем, от динамического напора воздуха уже не надо, мы довольно высоко, здесь плотность атмосферы совсем ничтожна.

Яркий пучок солнечного света пробивается через иллюминатор. Но вот заканчивается пятая минута, умолкают двигатели второй ступени, запускается двигатель третьей. Вскоре наш «Союз-13» достигает заданной высоты и первой космической скорости. И вдруг... Что-то мгновенно ударило нас сзади и тут же куда-то выбросило, в какое-то неосязаемое, непонятное пространство. Та же непонятная сила мгновенно повернула меня вместе с приборной доской головой вниз, через спину, градусов на сто, повернула и в таком положении оставила. Что это такое? — Невесомость!

Погасло телевизионное освещение, включились часы. Мы вышли на орбиту. Наш корабль отделился от ракетносителя.

Трудно сосредоточиться, мысли прыгают. И вдруг бортжурнал выскальзывает из рук и довольно быстро плывет к вентилятору. И не просто плывет, а вращается, страницы его, скрепленные металлическими кольцами ошетинились во все сторо-

ны, как иголки у ежа. Той силы, которая на Земле заставляла их принимать и сохранять форму книги, здесь не стало. Вместо бортжурнала плывет по кабине какой-то живой цилиндр. Но вот он достиг вентилятора, дотронулся до него, повернулся и поплыл назад, к моему иллюминатору. Я пробую неуверенными движениями поймать его, но он не дается в руки, плывет в другую сторону. Движения его напоминают движения мыльного пузыря, если на него дуют дети. Хочу еще раз дотронуться до него, но почувствовал, что привязан. Расстегиваю ремни. И в то же мгновение взрываюсь вверх, хотя и не отталкивался. Выбросили меня из кресла едва уловимые движения мышц рук и ног. Я взмыл вверх с какой-то закруткой.

Быстрым, немного растерянным движением рук хватаюсь за что-то, тело все время куда-то разворачивается, ощущение такое, будто я потерял над собой всякий контроль, превратился в воздушный шарик и меня куда-то все время толкает, то в одну, то в другую сторону.

На помощь приходит Валентин, схватив меня за ногу, фиксирует в определенном положении. Я успел поймать бортжурнал и, нащупав рукой привязную систему, опустился в кресло. Нужно привязаться, осмотреться, успокоиться. А главное — сосредоточиться! Нужно заставить себя не увлечься, не удивляться невесомости, а направить все свои силы, все старание на одно — контроль и точное исполнение команд. Что-то шелкнуло, немного покачнулся корабль: это раскрылись панели солнечных батарей. Раскрылись и антенны, сейчас можно вести связь с Землей. Докладываем: «Заря, выведение прошло нормально, солнечные батареи и антенны раскрыты, есть отделение, самочувствие хорошее, продолжаем контроль состояния систем».

В ответ слышим уверенный голос Земли: «Кавказы (это наши позывные), вы вышли на заданную орбиту. Продолжайте выполнять штатную программу полета».

Штатная программа... Всего два слова, а сколько нервов, эмоционального напряжения, сколько точных, отработанных до автоматизма команд и действий, сколько физической и душевной энергии, как со стороны нас с Валентином, так и со стороны тех кто помогает нам с Земли!

Связь с Землей продолжается несколько минут и обрывается, мы выходим из зоны радиовидимости с территории Советского Союза. Еще больше часа нам придется провести в скафандрах, проверяя герметичность отсеков корабля, выдавая целые группы команд, пока опять не выйдем на связь и пока назем-

ные операторы не получают подтверждение по автоматическим каналам, что у нас все нормально.

После этого мы переходим в бытовой отсек, снимаем скафандры (в них космонавты находятся только на самых сложных участках полета — на участке выведения на орбиту и во время спуска) и надеваем полетные костюмы.

Так начинался наш с Валентином полет на «Союзе-13», основной эксперимент которого состоял в исследовании спектров звезд с помощью астрофизической обсерватории «Орион-2». Кроме того, в программу нашей работы входило еще около 30 других исследований и наблюдений.

И вот, наконец, утром после полного контроля систем корабля получили команду с Земли:

— «Кавказы», я — «Заря». Примите радиограмму. На следующем витке выполнить эксперимент с «Орионом-2». Основная звезда — Сириус.

Мы с Валентином заняли свои рабочие места: я — за пультом управления кораблем, Валентин — за пультом управления телескопом. На Земле мы находили Сириус за несколько секунд. А здесь? Смотрю в стекла визира. Замечаю созвездие. Какое? Напрягаю память. На Земле проще, там видишь созвездие целиком, а здесь визир осматривает только его какую-то часть — несколько звездочек. Но тренировки не напрасны: узнаю Орион. Легким поворотом ручки управления нахожу «голову» созвездия, сейчас все просто: Сириус — он в созвездии Большого Пса — находится внизу, по направлению пояса Ориона. Осторожно разворачиваю корабль: в «глазу» визира — Сириус. Стабилизирую корабль и предупреждаю борт-инженера:

Сириус в перекрестии! Не двигаться!

Валентин отвечает: — Понял! Навожу визир телескопа!

А еще через несколько секунд подтвердил: — Сириус в перекрестии. Включаем датчики — специальные звездные годы — захватчики, ориентирующие телескоп в нужном направлении, стабилизируем его. Наконец включаем экспозицию. Спектрограммы звезд для заданной области неба сняты! Неделя мы «загоняли» звезды в визир корабля и телескопа. За это время при помощи системы «Орион-2» сделали несколько тысяч спектральных снимков более трех тысяч звезд. Специалисты были довольны. Особенно рад был чистоте спектров Григор Арамович Гурзян. Вуаль от свечения ночного неба, мешающая наблюдать звезды с Земли, почти отсутствовала.

Если сказать, что все получилось очень просто, будет неправильно. В космосе, в условиях невесомости, трудиться значи-

тельно сложнее. Несмотря на это работа с «Орионом-2» поглощала нас полностью.

Мы не считались со временем, отдавали часы отдыха и сна на эксперименты. И самое главное, внутренне были довольны той работой, которая была поручена.

Еще до полета мы верили в свои силы и надеялись, что эксперимент пройдет удачно как на Земле, так и на орбите, очень тщательно и скрупулезно относились ко всему, однако не ожидали таких хороших результатов, о которых нам после полета рассказывал Григор Арамович Гурздян.

Для меня «Союз-13» был первый корабль, который нам совместно с Валентином Лебедевым доверили испытать в космосе. «Орион-2» явился первой уникальной научной аппаратурой, с которой мы выполняли эксперименты на орбите. И самое главное, что мы впервые встретились с людьми, которые создавали космическую технику, с испытателями, с одержимыми и влюбленными в свое дело учеными, всеми теми, кто дал путевку в жизнь «Ориону-2».

П. И. Климук

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акопян А. С. О макроструктуре непрерывных спектров в ультрафиолете звезд классов A0—A2. Сообщ. Бюраканской обс., 1976, 48, 177—186.
2. Асатрян Р. С. Ультрафиолетовый дублет ионизованного магния 2800 MgII в спектрах слабых звезд. Сообщ. Бюраканской обс., 1976, 48, 187—208.
3. Гурзadyн Г. А. Градиент электронной температуры в планетарных туманностях. Астрофизика 1965, I, 91—108.
4. Гурзadyн Г. А. Интересная «ультрафиолетовая» звезда, обнаруженная «Орионом-2». Астрофизика 1974, 10, 379—386.
5. Гурзadyн Г. А. Об эмиссионных линиях MgII и CaII в планетарных туманностях. Астрофизика, 1979, 15, 461—471.
6. Гурзadyн Г. А. Звездные хромосферы или 2800 MgII в астрофизике. М.: «Наука», 1983.
7. Гурзadyн Г. А., Оганесян Дж. Б. Использование синхротронного излучения для энергетической калибровки астрономической аппаратуры, Астр. ж. 1971, 48, 1289—1300.
8. Гурзadyн Г. А., Оганесян Дж. Б. Спектрофотометрия двух «ультрафиолетовых» звезд, обнаруженных «Орионом-2», Астрофизика, 1975, 11, 585—591.
9. Гурзadyн Г. А., Оганесян Р. Х. Ультрафиолетовая спектрофотометрия группы горячих звезд в Парусах. Астрофизика II, 1975, 397—408.
10. Гурзadyн Г. А., Епремян Р. А., Оганесян Дж. Б., Рустамбекова С. С. Абсолютные монохроматические потоки в ультрафиолетовых спектрах звезд по данным «Ориона-2», Астрофизика, 1982, 18, 398—416.
11. Гурзadyн Г. А., Оганесян Дж. Б., Рустамбекова С. С., Епремян Р. А. Каталог ультрафиолетовых звезд по данным «Ориона-2». Ереван: Изд-во Академии Наук Армянской ССР, 1984. 370 с.
12. Епремян Р. А. Спектрофотометрия звезд классов F, G, K в ультрафиолете. Сообщ. Бюраканской обс., 1976, 48, 154—176.
13. Епремян Р. А. Структура непрерывных спектров звезд типа F—G в ультрафиолете. Сообщ. Бюраканской обс., 1976, 48, 137—153.
14. Епремян Р. А. Об электронной концентрации в фотосферах звезд F—G—K. Астрофизика, 1976, 12, 647—656.
15. Киппер А. Я. Теория двойного излучения световых квантов для атома водорода. Публ. Тартусской обс. 1952, 32, 63—93.
16. Оганесян Дж. Б. О поведении ультрафиолетового дублета ионизованного магния в звездных спектрах.—Астрономический журнал, 1973, 50, с. 972—979.
17. Оганесян Дж. Б. Ультрафиолетовая спектрофотометрия горячих звезд. Сообщ. Бюраканской обс., 1978, 48, 68—100.
18. Оганесян Дж. Б., 1976, Диссертация, ГЛКА.
19. Оганесян О. В. Спектральная классификация звезд по их ультрафиолетовым спектрограммам. Сообщ. Бюраканской обс., 1976, 48, 14—67.
20. Рустамбекова С. С. Ультрафиолетовые спектры группы горячих звезд в Тельце. Сообщ. Бюраканской обс. 1976, 48, 101—121.
21. Рустамбекова С. С. О макроструктуре спектров горячих звезд в ультрафиолете. Астрофизика, 1980, 16, 457—468.
22. Рустамбекова С. С., 1982, Диссертация, БАО.

23. Рустамбекова С. С. Макроструктура горячих звезд по данным ОАО—2, *Астрофизика*, 1983, 19, 533—546.
24. Чолакян В. Г., 1981, Дипломная работа, Ереванский Государственный университет.
25. Abt H. A. Spectral Types in Gurzadyan's clustering in Auriga. 1978, *Publ. Astr. Soc. Pacific* v. 90, 555—556.
26. Aller L. H. Anticipated Spectra of Planetary Nebula in «Satellite Ultra-violet». 1961, *Mem. Soc. Roy. Sci. Liege*. v. 4, 535—538.
27. Basri G. S., Linsky J. L. Outer Atmospheres of cool Stars. II. MgII Flux Profiles and Chromospheric Radiative Loss Rates. 1979, *Astrophys. J.* v. 234, 1023—1035.
28. Code A. D. Stellar Astronomy from a Space Vehicle. 1960, *Astron. J.* v. 65, 278—284.
29. Code A. D., Meade M. R. Ultraviolet Photometry from the Orbiting. Astronomical Observatory. XXXII. Atlas of Ultraviolet Stellar Spectra. 1979, *Astrophys. J. Suppl.* v. 39, 195—289.
30. Doherty L. R. OAO Observations of Magnesium II Emission in Late-Type Stars. 1971, *Phil. Trans. Roy. Soc. London* v. A270, 189—195.
31. Göpert—Mayer M. C. Über die Wahrscheinlichkeit des Zusammenwirkens zwei Lichtquanten in einen Elementarakkt. 1929, *Naturwiss.* v. 19, 932—937.
32. Gurzadyan G. A. A Group of Ultra—Violet» Stars in Auriga. 1974. *The Observatory*, v. 94, 293—295.
33. Gurzadyan G. A. Ultraviolet Spectra of Stars and Nebulae («Orion-2») 1975, *Proceedings of the Third European Astron. Meeting, Tbilisi*. 1—5 July, pp. 33—66.
34. Gurzadyan G. A. Ultraviolet Chromospheric Lines in the Spectra of Late—Type Stars. 1975, *Month. Not. Roy. Astr. Soc.* v. 172, 617—621.
35. Gurzadyan G. A. Behavior of 2800 MgII in Stellar Spectra. 1975, *Publ. Astr. Soc. Pacific* v. 87, 289—299.
36. Gurzadyan G. A. Ultraviolet Spectrophotometry of the Emission Star SAO 0400183. 1975. *Astrophys. J.* v. 39, 213—216.
37. Gurzadyan G. A. The Ultraviolet Spectr. of Planetary Nebula IC 2149, 1975, *Month. Not. Roy. Astr. Soc.* v. 172, 249—256.
38. Gurzadyan G. A. Planetary Nebulae. Gordon and Breach. N. Y. (1969).
39. Gurzadyan G. A. Two—Photon Emission in Planetary Nebula IC 2149. 1976. *Publ. Astr. Soc. Pacific* v. 88, 891—895.
40. Gurzadyan G. A. On the Possibility of Spectral Classification of Stars by their Ultraviolet Spectrograms 1974. *Astron. Astrophys.* v. 35. 493—494.
41. Gurzadyan G. A. A Magnesium Feature in Ultraviolet Stellar Spectra. 1972, *Sky and Telesc.* v. 43, 350—351.
42. Gurzadyan G. A., Jarakyan A. L., Krmoyan M. N., Kashin A. L., Loretzsyanyan G. M., Ohanesyan J. B. Space Astrophysical Observatory «Orion-2». 1976, *Astrophys. and Space Sci.* 1976, 393—446.
43. Gurzadyan S. A., Rustambekova S. S. Silicon—Rich Stellar Envelope? 1975, *Nature* v. 254. 311—312.
44. Gurzadyan G. A., Rustambekova S. S. Circumstellar Clouds Derived from

- Ultraviolet Stellar Spectra. 1980, *Astrophys. and Space Sci.* v. 69, 295—318.
45. Gurzadyan G. A., Rustambekova S. S., On the Behaviour of the Lines 2905 SiII and 2932 MgII in the Spectra of B—A Stars. 1981, *Astrophys. and Space Sci.* v. 80, 231—235.
46. Heiser A. M., Uckotter C. L., Uckotter D. G. Photometry of the «Ultraviolet» Stellar Group in Auriga. 1978. *Publ. Astr. Soc. Pacific* v. 90, 105—107.
47. Lamers H. J., Hucht K. A. van der, Snijders M. A. J., Sakhbullin N. The Equivalent Widths of MgII Lines near 2800 Å in the Spectra of 31 Stars. 1973, *Astron. Astrophys.* v. 25, 105—112.
48. Spitzer L., Greenstein J. Continuous Emission from Planetary Nebulae. 1951, *Astrophys. J.* v. 114. 407—420.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
От редакционной коллегии	5
Введение	8

1 часть

АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ «ОРИОН-2» НА КОСМИЧЕСКОМ КОРАБЛЕ «СОЮЗ-13»

1 Глава. Космический корабль «Союз-13»

1.1. Конструкция и возможности корабля «Союз-13» .	21
1.2. Бортовые системы корабля	23
1.3. Бортовое оптическое оборудование	25
1.4. Купол обсерватории	30
1.5. Шлюзы для транспортировки кассет	32
1.6. Операция шлюзования кассет	33
1.7. Комплексные наземные испытания	35

2 Глава. Космическая обсерватория «Орион-2»

2.1. Принцип создания обсерватории «Орион-2»	39
2.2. Приборный состав обсерватории «Орион-2»	41
2.3. Компонировка обсерватории «Орион-2» на корабле «Союз-13»	45
2.4. Оптическая система широкопольного телескопа «Ориона-2»	47
2.5. Оптические системы вспомогательной аппаратуры «Ориона-2»	50
2.6. Конструкция менискового телескопа	53
2.7. Конструкция астродатчиков	58
2.8. Кинематические и структурные особенности трехосной системы астростабилизации «Ориона-2»	61
2.9. Трехосная следящая система астростабилизации «Ориона-2»	65
2.10. Функциональная электрическая схема «Ориона-2»	66
2.11. Температурный режим обсерватории	67
2.12. Контрольные датчики. Телеметрическая информация	70
2.13. Спектральные и фотометрические характеристики «Ориона-2»	72
2.14. Энергетическая калибровка астрономических телескопов с использованием синхротронного излучения	76

3 Глава. Обсерватория «Орион-2» на орбите

3.1. Баллистическое обеспечение полета	81
3.2. Выбор опорных звезд астростабилизации	88
3.3. Бортовые звездные карты и журнал	89
3.4. Подготовка космонавтов	90
3.5. Наведение обсерватории «Орион-2» на опорные звезды сле- жения и астростабилизации	91
3.6. Функциональная программа «Ориона-2» на орбите	92
3.7. Программа полета	96

2 часть

НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА «ОРИОН-2»

4 Глава. Излучение горячих звезд

4.1. Спектральные снимки, полученные «Орионом-2»	101
4.2. Ультрафиолетовые спектры горячих звезд	104
4.3. Непрерывные спектры звезд класса А в ультрафиолете	110
4.4. Ультрафиолетовые спектры звезд неизвестных типов	113
4.5. Макроструктура спектров горячих звезд в ультрафиолете	120
4.6. Группировка «ультрафиолетовых» звезд в «Возничем». Звездная ассоциация нового типа?	124
4.7. Горячие звезды южного неба	126
4.8. Странная звезда	132
4.9. Абсолютная спектрофотометрия в ультрафиолете	135
4.10. Каталог «Ориона-2»	136

5 Глава. Излучение холодных звезд

5.1. Спектральные особенности звезд промежуточных классов (F—G—K) в ультрафиолете	141
5.2. Макроструктура спектров звезд промежуточных классов в ультрафиолете	144
5.3. Комбинированные спектрофотометрические наблюдения — внеатмосферные и наземные	151
5.4. Сильные линии поглощения в спектрах холодных звезд	154

6 Глава. Дублет 2800 Mg II в звездных спектрах

6.1. Первые результаты	156
6.2. Наблюдения «Ориона-2»	157

6.3. Результаты измерений 2800 Mg II	158
6.4. Влияние межзвездного ионизованного магния	161
6.5. Депрессия непрерывного спектра у звезд F—G	163
6.6. Дублет 2800 Mg II в эмиссии	165
6.7. Дублет MgII одновременно в эмиссии и поглощении	167
6.8. Сверхмощные хромосферы, открытые «Орионом-2»	168

7 Глава. Звезды с особенностями

7.1. Горячие звезды с эмиссионными линиями класса Ве в ультрафиолете	172
7.2. «Магниевые» звезды	177
7.3. Звездная оболочка с аномальным содержанием кремния	180

8 Глава. Газовые туманности в ультрафиолете

8.1. Первая ультрафиолетовая спектрограмма планетарной туманности	184
8.2. Дублет 2800 Mg II — новый класс эмиссионных линий в планетарных туманностях	189
8.3. Двухфотонное излучение	192

9 Глава. Околосветные облака

9.1. Депрессия в непрерывных спектрах горячих звезд в области длин волн около 2400 Å	199
9.2. Околосветные облака по данным ультрафиолетовых спектров горячих звезд	203
9.3. Околосветные облака — новая категория галактических образований	207
9.4. Странное поведение линии 2800 Mg II у звезд класса A	210
9.5. Звезды без околосветных облаков	211

10 Глава. Спектральная классификация звезд по ультрафиолетовым наблюдениям

10.1. Спектральная классификация звезд по их коротковолновым спектрограммам	214
10.2. Спектральная классификация звезд с помощью линии поглощения 2800 MgII	218

10.3. Спектральная классификация звезд с помощью линий Fe I и Fe II	223
11 Глава. Физические параметры звездных атмосфер	
11.1. Электронная концентрация звездных фотосфер по данным линий магния	225
11.2. Еще раз об электронной концентрации в звездных фото- сферах	227
11.3. Метод нахождения эффективной температуры горячих звезд с помощью линий 2905 Si II и 2932 Mg II	229
Космический корабль на службе главного эксперимента	233
Список литературы	240

**ОБСЕРВАТОРИЯ В КОСМОСЕ:
«СОЮЗ-13» — «ОРИОН-2»**

Редакторы *Ф. Г. Тубьянская, Г. П. Филипповская*
Художественный редактор *В. В. Лебедев*
Технический редактор *Л. А. Макарова*
Корректор *Н. Г. Богомолова*
Переплет художника *С. Н. Орлова*

ИБ 4408

Сдано в набор 16.07.84. Подписано в печать 30.10.84.
Т-20244. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага типографская № 1.
Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л.
14,88 (в т. ч. вкл. 0,47). Усл. кр.-отт. 15,82. Уч.-изд. л.
14,94 (в т. ч. вкл. 0,37). Тираж 1720 экз. Заказ 1635.
Цена 2 р. 70 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство
«Машиностроение»,
107076, Москва, Б-76, Стромынский пер., д. 4.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам
издательств, полиграфии и книжной торговли.
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

**Приобретайте книги издательства «Машиностроение»
в магазинах, распространяющих техническую литературу.**

Баллистика и навигация космических аппаратов: Учебник для технических вузов/А. А. Дмитриевский, А. И. Гузенко, Н. М. Иванов и др.

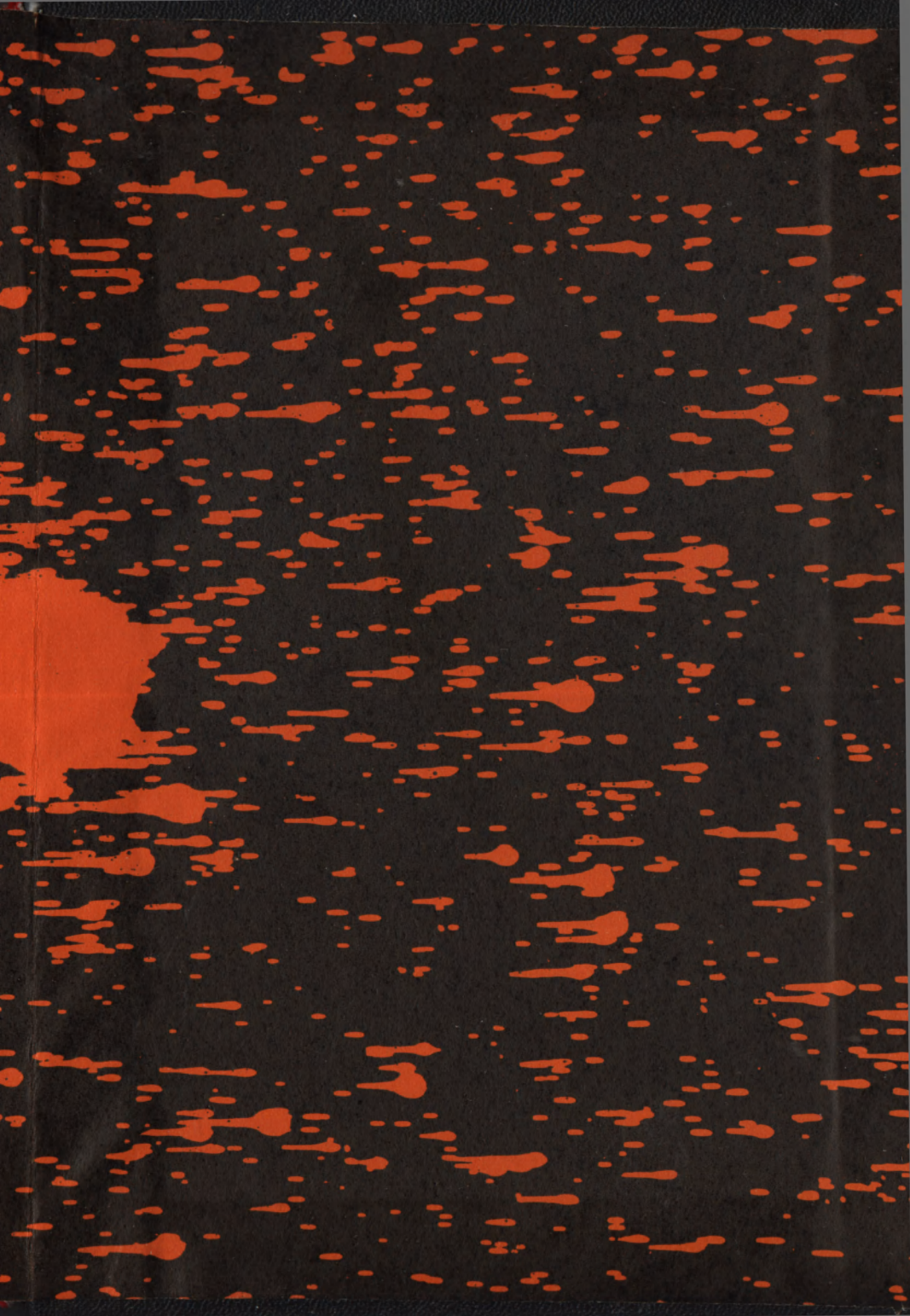
Конструкция и проектирование космических летательных аппаратов: Учебник для авиационных вузов/Н. И. Паничкин, Ю. В. Слепушкин, В. П. Шинкин и др.

Малоземов В. В., Рожнов В. Ф., Правецкий В. Н. Системы жизнеобеспечения экипажей летательных аппаратов: Учебник для авиационных вузов.

Попов В. И. Системы ориентации и стабилизации космических аппаратов.

Глушко А. А. Космические системы жизнеобеспечения (биофизические основы проектирования и испытания).





2р.70к.



• МАШИНОСТРОЕНИЕ •