

523.035.29

ЗОДИАКАЛЬНЫЙ СВЕТ

Н. Б. Дивари

В настоящее время общепринятой, хотя и не единственной, является гипотеза о том, что зодиакальный свет обусловлен рассеянием солнечного излучения на сконцентрированных в виде линзообразного облака частицах межпланетной пыли, вытянутого вдоль эклиптики. На возможность такого объяснения указал еще в 1683 г. Ж. Кассини¹, который дал первое научное описание зодиакального света. Со времени Кассини эта гипотеза неоднократно детализировалась, однако ее общий характер сохранился до настоящего времени. Ниже мы попытаемся показать, что эта гипотеза не может рассматриваться как единственная возможность объяснения известных свойств зодиакального света, и более того, укажем на те факты, которые противоречат этой гипотезе.

При анализе наблюдений зодиакального света нужно очень осторожно относиться к опубликованным результатам, имея в виду, что эти наблюдения весьма затруднительны из-за малой яркости зодиакального света, а также из-за того, что зодиакальный свет наблюдается на фоне ночного неба, яркость которого сравнима с яркостью зодиакального света. Выделение зодиакального света из общего наблюдаемого потока излучения обычно делается при определенных предположениях относительно распределения яркости атмосферной составляющей ночного неба. Звездная составляющая, как правило, учитывается статистически. Большие трудности представляет строгий учет влияния поглощения и рассеяния зодиакального света нижними слоями земной атмосферы.

Фотоэлектрические наблюдения зодиакального света чаще всего ведутся вдоль альмукантаратов, близких к горизонту, где влияние атмосферного свечения и тропосферной экстинкции велико. Внеатмосферные яркости зодиакального света обычно определяются, исходя из далекого от истины предположения о том, что атмосферное свечение ночного неба не зависит от азимута, а зависит только от зенитного расстояния. При этом интенсивность атмосферной составляющей в данном альмукантарате определяется либо по точкам, далеким от эклиптики, либо по яркости неба в полюсе с последующим приведением ее к данному альмукантарату по формуле, предполагающей знание высоты эмиссионных слоев ночного неба. Такой способ редукции может вносить значительные погрешности. Влияние тропосферы на яркость зодиакального света имеет существенное значение, поскольку наблюдения ведутся вблизи горизонта. Так как зодиакальный свет имеет значительные угловые размеры, формула Бугера в ее обычной форме неприменима. В. Г. Фесенков² в качестве приближенного учета влияния тропосферы предложил использовать видоизмененную формулу Бугера, в которой коэффициент прозрачности увеличен приблизительно на 0,02, чтобы учесть зодиакальный свет, рассеиваемый тропосферой. Такое приближение может быть более или менее

приемлемым в случае, если эклиптика перпендикулярна к горизонту. Однако, как было показано В. Г. Фесенковым³, при наклонном положении эклиптики относительно горизонта влияние тропосферной составляющей не одинаково вдоль альмукантарата и использование видоизмененной формулы Бугера может вносить погрешности, значительно превосходящие погрешности современных фотоэлектрических наблюдений. Представляется крайне затруднительным, а может быть, и невозможным, получение в настоящее время абсолютных яркостей зодиакального света, свободных от погрешностей, связанных с учетом всех составляющих свечения ночного неба и тропосферной экстинкции. Благодаря этому выводы относительно природы зодиакального света сейчас можно делать только на основе тщательно проверенных результатов наблюдений, проводимых в различных местах земного шара при идеальных атмосферных условиях.

Имеется довольно много работ, в которых на основе тех или иных результатов наблюдений зодиакального света авторы определяют структуру межпланетного пылевого облака, ответственного за явление зодиакального света. Однако почти во всех случаях для сопоставления своих выводов с результатами наблюдений авторы используют какую-либо одну или в лучшем случае две характеристики явления. Чаще всего для этой цели используется распределение яркости и поляризации зодиакального света вдоль эклиптики. Другие важные особенности явления при этом игнорируются. Совершенно очевидно, что использование без надлежащего критического анализа только некоторой ограниченной части известных фактов о зодиакальном свете может привести к необоснованным выводам о природе рассеивающей материи. Всякая теория зодиакального света должна строиться на полном комплексе сведений о зодиакальном свете и объяснять все наблюдаемые факты, а не только некоторую их часть. Поэтому представляется весьма целесообразным критическое рассмотрение имеющихся результатов наблюдений, оценка их надежности и возможности построения той или иной гипотезы на основе имеющихся наблюдательных фактов.

1. ПОЗИЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Определение положения зодиакального света на звездном небе проводилось многими наблюдателями. Большое число наблюдений было сделано визуально, без каких-либо приборов. Первые наблюдения такого рода были проведены Фацио (см.⁴), который указал на связь зодиакального света с эклиптической. Кассини считал, что ось зодиакального света совпадает с плоскостью солнечного экватора (см.⁵). Глазомерные оценки положения оси зодиакального света проводились Джонсом⁶, Маршаном⁷, Захаровым⁸, Гофмейстером^{9, 10}, Шёнбергом и Пихом¹¹, Шмидом¹² и др. Результаты этих наблюдений весьма противоречивы, так что трудно прийти к какому-либо определенному выводу. Так, например, Гофмейстер^{9, 10} считает, что ось зодиакального света строго следует за большими планетами. По Маршану⁷, ось зодиакального света наклонена к эклиптике под углом 6—7° при долготе восходящего узла в 70° и, таким образом, близка к плоскости солнечного экватора. Шмид¹² пришел к заключению, что положение оси зодиакального света зависит от географической широты места наблюдения. В тропиках ось совпадает с эклиптической, а в средних широтах она смещается к северу в северном полушарии и к югу — в южном. Из наблюдений Захарова⁸, проводившихся в Ашхабаде, следует, что в течение года ось зодиакального света не одинаково ориентирована относительно эклиптики, а именно, в сентябре — октябре ось вечернего зодиакального света совпадает с эклиптической, а поздней весной наклонена к ней на 6—

8°. К аналогичному результату о непостоянстве наклона оси зодиакального света еще в конце прошлого столетия пришел Тэпман (см.¹³). Шёнберг и Пих¹¹ нашли, что ось зодиакального света не представляет собой большого круга. Линия симметрии зодиакального света располагается на небесной сфере вдоль малого круга, параллельного эклиптике и смещенного к северу на 1° для наблюдателя, находящегося вблизи тропика Рака, и на 1° к югу для наблюдателя, находящегося вблизи тропика Козерога.

Глазомерные оценки положения оси зодиакального света обладают тем существенным недостатком, что они количественно не учитывают влияние экстинкции земной атмосферы и различных составляющих свечения ночного неба. Первые определения положения оси зодиакального света на основе инструментальных фотометрических наблюдений были сделаны В. Г. Фесенковым¹³ по измерениям, проведенным в 1913 г. в Медоне, Пейра-Каве и Ницце (Франция). В табл. I приведены результаты, полученные различными наблюдателями по инструментальным наблюдениям.

Таблица I

Автор	Год наблюдений	Географ. широта	Высота, м	Метод наблюдений	Результат
Фесенков ¹³	1913	+44°	1500	Визуальный фотометр	Смещена к северу от эклиптики на 2°
Фесенков ¹³	1913	+49	67	То же	Смещена к северу на 1°
Эльви и Роч ¹⁴	1936	+31	1890	Фотоэлектрический фотометр	Смещена к северу на 2°
Бруннер ¹⁵	1931—1932	+47	1583	Визуальный фотометр	Смещена к северу на 3—5°
Дивари ¹⁶	1946—1950	+43	1450	То же	Смещена к северу на 1°
Регенер ¹⁷	1953—1954	+35	2800	Фотоэлектрический фотометр	Совпадает с эклиптикой
Блекуэлл ¹⁸	1955	—16	2750	Фотографический метод	Смещена к северу на 0°,2
Блекуэлл, Ингэм ¹⁹	1958	—16°	5200	То же	Наклон к эклиптике 1°,5, долгота восходящего узла 115°
Донич ^{20,21}	1946—1949	+23°		То же	Наклон к эклиптике 2°, долгота восходящего узла 118°
Бер и Зиден-топф ²²	1952	+46°	3576	Фотоэлектрические измерения	Смещена к северу на 1—2°
Петерсон ²³	1959	+35	2800	То же	Совпадает с эклиптикой (наклон 0°,18±1,1)
Дивари и Асаад ²⁴	1957	+24	200	То же	Совпадает с эклиптикой или смещена к северу на 1°
Дивари и Крылова ²⁵	1958	+43	3000	То же	Близка к эклиптике, но не совпадает с ней

Как видно из приведенных данных, инструментальные наблюдения, как и глазомерные, не приводят к одному определенному результату. На основании этих наблюдений можно сделать весьма неопределенное заключение о том, что ось зодиакального света близка к эклиптике. Данные, приведенные в таблице, позволяют считать, что ось зодиакального света в пределах около 2° совпадает с эклиптикой. Однако ясно, что нет оснований для более точного заключения. В настоящее время при теоретическом анализе можно в равной мере считать, что ось зодиакального света совпадает с эклиптикой либо с неизменной плоскостью Лапласа, либо

смещена параллельно эклиптике на $1-2^\circ$, либо наклонена к ней под небольшим углом. Заслуживает внимания также вывод, сделанный на основании глазомерных оценок и не противоречащий инструментальным измерениям о том, что ось зодиакального света параллельна эклиптике, но смещение зависит от широты места наблюдения. Фурухата²⁶ пришел к заключению, что центральная линия зодиакального света близка к плоскости метеорного потока Таурид. Для уточнения ориентации плоскости симметрии зодиакального света относительно эклиптики необходимы дальнейшие наблюдения и усовершенствование метода обработки полученных измерений.

II. ЯРКОСТЬ ЗОДИАКАЛЬНОГО СВЕТА ВДОЛЬ ЭКЛИПТИКИ

Определения яркости зодиакального света производились многими наблюдателями. Большинство из них публикует только яркости вдоль эклиптики. Первые инструментальные измерения такого рода были проведены В. Г. Фесенковым. Полученные им яркости, выраженные в относительных единицах, приведены в¹³.

В табл. II указаны некоторые сведения об опубликованных сериях фотоэлектрических измерений яркости зодиакального света вдоль эклиптики, проведенных в разное время и в различных местах. В табл. III (верхние числа каждой строчки) собраны значения яркости зодиакального света вдоль эклиптики, выраженные в числе звезд $10\text{ }mg$ с квадратного градуса. В пятом столбце табл. II указано, какие звезды использованы авторами для этой цели. Поскольку авторы использовали различные фотометрические системы (фотографические, визуальные, фотовизуальные), не все эти яркости сравнимы между собой. Чтобы провести сравнение опубликованных данных, мы привели яркости к одной системе единиц, а именно—к единицам 10^{-13} средней яркости солнечного диска (единицы B_\odot). Эти значения помещены в нижнем правом углу каждой клетки табл. III. При редукции опубликованных яркостей мы считали, что распределение энергии в спектре зодиакального света совпадает с распределением энергии в спектре Солнца (спектральный класс G2). Для звездной величины Солнца приняты следующие значения: $m_{pv} = -26,76$ ²⁷ и $m_{ph} = -26,20$ ²⁸. При этом не делалось различия между фотовизуальной системой (изофотная длина волны $544\text{ }m\mu$), системой V (изофотная длина волны $553\text{ }m\mu$) и визуальной системой (изофотная длина волны $560\text{ }m\mu$). Площадь солнечного диска принята равной $0,223$ кв. градуса. В последнем столбце табл. II приведены значения переводного коэффициента μ , на который нужно умножать яркости, выраженные в числе звезд $10\text{ }mg$ с кв. градуса, чтобы получить яркости в единицах 10^{-13} средней яркости солнечного диска.

Как видно из приведенных в табл. III значений яркости (в единицах B_\odot), имеется существенное различие в абсолютных яркостях зодиакального света, измеренных различными наблюдателями. Несомненно, что некоторое расхождение может быть обусловлено неточным учетом влияния экстинкции земной атмосферы, что может, в частности, проявляться при сопоставлении наблюдений, проведенных на различных высотах над уровнем моря при разных атмосферных условиях. Однако не исключена возможность того, что основной причиной расхождения могут быть реальные колебания яркости зодиакального света. Этот важный вопрос требует особого рассмотрения.

Для теоретического анализа могут быть рекомендованы средние значения яркости зодиакального света вдоль эклиптики, приведенные в предпоследней строчке табл. III (в единицах B_\odot). В последней строке табл. III

Таблица II

Опубликованные фотоэлектрические и фотографические измерения яркости зодиакального света вдоль эклиптики в абсолютных единицах

Авторы	Год наблюдений	Географическая широта станций	Высота станций, м	Единицы яркости, использованные авторами	m_{\odot}	μ
Эльви и Роч ¹⁴	1935		1890	Звезды 10 m_g , фотограф. с кв. градуса	—26,20	$7,38 \cdot 10^{-16}$
Фурухата ²⁴	1948—49			Звезды 5 m_g , класса A0 с кв. град.		
Бер и Зиден-тофф ²²	1952	+46°	3576	Звезды, которые в данном спектральном интервале имеют блеск 10 m_g с кв. град.	—26,76	$4,41 \cdot 10^{-16}$
Роч и др. ²⁹	1952—53	+36		Звезды 10 m_g , визуальн. класса G0 с кв. град.	—26,76	$4,41 \cdot 10^{-16}$
Барбье ³⁰	1952—53	+44	650	Звезды 10 m_g , фотограф. класса G0 с кв. град.	—26,20	$7,38 \cdot 10^{-16}$
Регенер ¹⁷	1954	+35	2800	Звезды 10 m_g , фотограф. класса G0 с кв. град.	—26,20	$7,38 \cdot 10^{-16}$
Блекуэлл ¹⁸	1955	+16	2743	10 ⁻¹³ средней яркости солнечного диска		
Эльзессер ³¹	1956		1500	Звезды, которые в данном спектральном интервале имеют блеск 10 m_g с кв. град.	—26,27	$4,41 \cdot 10^{-16}$
Дивари и Асаад ²⁴	1957	+24	200	Звезды 10 m_g класса G2 с кв. град.	—26,76	$4,41 \cdot 10^{-16}$
Ингэм ³²	1958	—16	5200	10 ⁻¹³ средней яркости солнечного диска		
Петерсон ²³	1959	+35	2800	Звезды 10 m_g визуальн. класса G0 с кв. град.	—26,76	$4,41 \cdot 10^{-16}$
Робле ³³	1961	+43	2850	10 ⁻¹³ средней яркости солнечного диска		
Дивари и Крылова ²⁵	1958	+43	3000	Звезды 10 m_g фотовиз. класса G2 с кв. град.	—26,76	$4,41 \cdot 10^{-16}$
Дивари, Крылова и Мороз ³⁴	1955	+43	1450	Звезды 10 m_g фотовизуальн. класса G2 с кв. град.	—26,76	$4,41 \cdot 10^{-16}$

приведены полученные по этим значениям средние яркости зодиакального света, выраженные в числе звезд 10-й фотовизуальной звездной величины спектрального класса Солнца (G2) с кв. градуса.

Относительный ход яркости зодиакального света вдоль эклиптики в зависимости от элонгации ϵ можно достаточно хорошо аппроксимировать степенной функцией $\sim \epsilon^{-k}$. В табл. IV приведены значения показателя степени k , определенные различными авторами. Как видно из табл. IV,

Яркости зодиакального света вдоль эклиптики, выраженные в двух единицах

Авторы	λ (ммк)	$e = \lambda_{\odot} - \lambda $								
		30°	35°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	90°
14	450	— —	— —	912 6,73	740 5,46	618 4,56	436 3,22	322 2,45	261 1,93	213 1,57
26, 7. II 1948 г.	450	— —	2570 —	1360 —	— —	690 —	430 —	280 —	200 —	150 —
26, 27. I 1949 г.	450	— —	890 —	710 —	— —	440 —	280 —	210 —	140 —	100 —
22	543	— —	855 3,90	725 3,20	615 2,71	515 2,27	395 1,74	325 1,43	255 1,12	200 0,88
29	530	2330 10,3	1590 7,01	1184 5,22	945 4,17	755 3,33	498 2,20	371 1,64	297 1,31	247 1,09
30	440	— —	1075 7,93	700 5,17	530 3,91	420 3,10	255 1,88	200 1,48	143 1,06	110 0,81
17	450	1400 10,3	1000 7,38	750 5,53	590 4,35	480 3,54	320 2,36	— —	— —	— —
18	630	— 5,5	— 3,89	— 2,90	— 2,3	— 1,8	— —	— —	— —	— —
31	Визуальн. область	1230 5,42	800 3,53	630 2,78	— —	420 1,85	270 1,19	180 0,79	130 0,57	110 0,48
24	414	— —	900 3,97	690 3,04	530 2,34	410 1,81	300 1,32	220 0,97	160 0,71	110 0,49
24	541	— —	— —	740 3,26	570 2,51	450 1,98	280 1,23	180 0,79	120 0,53	74 0,33

Продолжение табл. III

Авторы	λ (мкм)	$\varepsilon = \lambda_{\odot} - \lambda $								
		30°	35°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	90°
24	522	— —	— —	700 3,09	500 2,20	390 1,72	250 1,40	170 0,75	120 0,53	91 0,40
32	620	— 8,84	— 6,09	— 4,42	— 3,32	— 2,58	— 1,66	— 1,15	— —	— —
23	435	1660 7,32	1230 5,42	926 4,08	— —	697 3,07	380 1,67	291 1,29	246 1,08	223 0,98
23	542	1820 8,03	1150 5,07	875 3,86	— —	558 2,46	392 1,83	320 1,41	254 1,12	232 1,02
23	638	2020 8,91	1290 5,69	1010 4,45	— —	645 2,84	432 1,90	327 1,44	278 1,23	237 1,05
33	463	— —	— 8,9	— 5,40	— 3,95	— 3,02	— 2,24	— 1,89	— 1,73	— —
33	528	— —	— 10,0	— 6,05	— 4,45	— 3,60	— 2,69	— 2,16	— 1,80	— —
33	616	— —	— 9,4	— 6,30	— 4,75	— 3,75	— 2,60	— 2,07	— 1,70	— —
25	406	— —	— —	1140 5,03	690 3,04	535 2,36	350 1,54	220 0,97	150 0,66	— —
25	543	— —	— —	880 3,88	680 3,00	520 2,29	320 1,41	200 0,88	150 0,66	— —
34	460	— —	800 3,53	600 2,65	430 1,92	335 1,48	200 0,88	— —	— —	— —
34	520	— —	905 3,97	670 2,98	460 2,03	350 1,57	223 0,99	— —	— —	— —
Средние 10 ⁻¹³ В _⊙	—	8,45	5,98	4,29	3,38	2,66	1,78	1,38	1,11	0,83
Средние 10 ^m g фото- виз. G2	—	1920	1360	973	766	603	404	313	252	188

Таблица IV

Значения показателя степени k

Авторы	λ , ммк	ε	k	Авторы	λ , ммк	ε	k
Роч и др. ²⁹	530	30—60°	2,22	Эльви и Роч ¹⁴	450	40—70	1,87
Регенер ¹⁷	450	30—60	2,12	Бер, Зидентопф ²²	543	35—60	1,48
Дивари и Асаад ²⁴	414	35—60	2,4	Фурухата, 7.II	450	35—70	3,13
»	541	40—60	2,1	1948 ²⁶			
Никольский ³⁵	540	32—55	2,5	Фурухата, 27.I	450	35—70	2,04
Ингэм ³²	620	20—70	2,4	1949			
Петерсон ²³	435,5	25—60	2,22	Фурухата 10.II	720	35—70	2,59
»	542,5	25—60	2,19	1945			
»	638	25—60	2,19	Фурухата, 12.II	720	30—70	1,25
Дивари, Крылова ²⁵	410	40—85	2,9	1947			
То же	540	40—80	2,5	Барбье ³⁰	440	35—70	2,65
Дивари, Крылова, Мороз ³⁴	460	35—65	2,7	Эльзассер ³¹	Визу- альная область	30—60	1,46
То же	520	35—65	2,5	Робле ³³	463	35—65	2,33
				»	528	35—65	2,24
				»	616,5	35—65	2,30

Примечание. Последние 11 значений k были вычислены нами по опубликованным яркостям, приведенным в табл. III.

имеются значительные расхождения в относительном ходе яркости вдоль эклиптики, полученные по различным наблюдениям. Это может быть вызвано погрешностями при учете влияния прозрачности земной атмосферы на яркость зодиакального света. К сожалению, еще нет общепринятой теории учета влияния земной атмосферы на яркость зодиакального света и обработка полученных измерений не ведется всеми наблюдателями по одинаковой схеме. Среднее значение показателя степени k оказалось равным 2,26.

III. ХОД ЯРКОСТИ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО К ЭКЛИПТИКЕ

К сожалению, опубликовано очень мало измерений хода яркости зодиакального света в направлении, перпендикулярном к эклиптике, поскольку большинство наблюдателей ограничиваются измерениями яркости вдоль эклиптики. Как было показано В. Г. Фесенковым², наблюдаемый конус зодиакального света оказывается заметно шире, чем вычисленный теоретически в предположении, что зодиакальный свет обусловлен рассеянием солнечного света на частицах метеорной пыли, образующейся в межпланетном пространстве в результате дезагрегации астероидов. Это заключение было подтверждено в работе²⁵, где было показано, что зависимость яркости зодиакального света от эклиптической широты представляется зависимостью вида

$$I = I_0 \exp[-k_1(\beta - \beta_0)^2],$$

где β_0 — широта максимума яркости I_0 при данной элонгации. По наблюдениям 1958 г.²⁵ k_1 оказалось равным 0,0039, а по наблюдениям 1955³⁴ $k_1 = 0,00335$. Для поляризованного излучения³⁴ $k_1 = 0,00275$.

Большое значение для теории зодиакального света имеет вопрос о том, насколько далеко от эклиптики распространяется зодиакальный свет

по небесной сфере. Хотя принято считать, что зодиакальный свет распространяется на все небо, имеются данные, противоречащие этой концепции. Согласно наблюдениям Бруннера¹⁵, проводившимся в Альпах, интенсивность света ночного неба перестает изменяться в зависимости от эклиптической широты при $\beta > 25^\circ$. Фотометрические наблюдения, проведенные нами в визуальных лучах в период с 1946 г. по 1950 г.³⁶, показали, что при элонгациях, больших 90° , интенсивность зодиакального света перестает изменяться при эклиптических широтах, больших 35° (1 на рис. 1). На основании поляризационных наблюдений Фурухата²⁶ нашел, что при элонгации 45° зодиакальный свет отсутствует при широтах, больших 60° , или, по крайней мере, не превышает 1% общей яркости ночного неба. Заключение о том, что зодиакальный свет практически отсутствует на больших эклиптических широтах, подтверждается также и тем, что степень поляризации ночного неба в этих областях неба близка к нулю. Например, согласно измерениям Фурухаты²⁶ в полюсе эклиптики степень поляризации меньше 0,3%. Согласно наблюдениям, проведенным в Египте²⁴, степень поляризации ночного неба вдали от эклиптики оказалась менее 1%.

Недавно Саито³⁷ пришел к заключению, что зодиакальный свет распространяется на все небо, тем самым подтвердив результат Ван-Рейна³⁸. Полученный Саито и Ван-Рейном ход зависимости яркости зодиакального света от эклиптической широты для интервала элонгаций $120-180^\circ$ приведен на рис. 1. Для получения яркости зодиакального света Саито использовал новый метод, заключающийся в том, что атмосферная составляющая непрерывного спектра свечения ночного неба на волне $\lambda 5250 \text{ \AA}$ определялась по интенсивности излучения ночного неба на волне $\lambda 5577 \text{ \AA}$. При этом связь между двумя интенсивностями для ночного неба устанавливалась статистически из самих же наблюдений. Рассмотрение данных, приведенных на рис. 1, показывает, что результаты Саито не противоречат заключению о том, что зодиакальный свет остается постоянным при $\beta > 60^\circ$. С другой стороны, вызывает сомнения весьма пологий ход кривой зависимости яркости зодиакального света от эклиптической широты, который не может обеспечить градиента, достаточного для того, чтобы была видна зодиакальная полоса, особенно если учесть, что в общем потоке света ночного неба имеются и другие, более интенсивные составляющие. Последнее в равной мере относится также к результату, полученному Ван-Рейном. Несомненно, что полученное Саито значение зодиакальной составляющей в полюсе эклиптики, несколько превосходящее 100 единиц звезд 10 mg с кв. градуса, нуждается в детальной проверке, тем более, что цвет этой составляющей по данным Саито оказался близким к цвету звезды класса K, а не к цвету Солнца.

Как отмечает В. Г. Фесенков³⁹, зодиакальная составляющая в полюсе эклиптики ничтожно мала, что обуславливает в этой точке неба суммарную

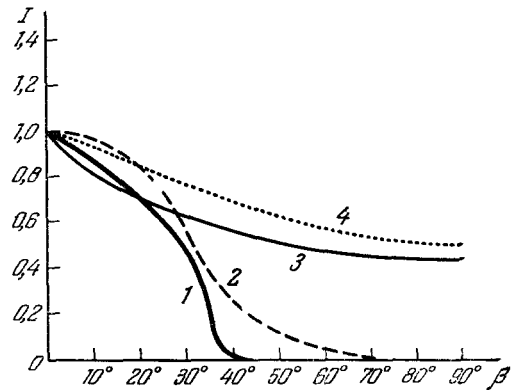


Рис. 1. Зависимость яркости зодиакального света от эклиптической широты β при больших элонгациях.

1 — Наблюдения Дивари³⁶ для элонгаций, больших 90° ; 2 — наблюдения Фурухаты²⁶ для элонгации 45° ; 3 — наблюдения Саито³⁷ для элонгаций $120-180^\circ$; 4 — наблюдения Ван-Рейна³⁸ для элонгаций $120-150^\circ$.

наблюдаемую степень поляризации, не превосходящую 1—2%. Учитывая все изложенное выше, можно считать, что имеющиеся наблюдения с большим основанием позволяют считать, что зодиакальный свет не распространяется на все небо, а концентрируется вблизи эклиптики.

IV. СПЕКТР ЗОДИАКАЛЬНОГО СВЕТА

Первый спектр зодиакального света был получен Фэзом ⁴⁰, установившим наличие в нем полос поглощения, что позволило считать, что зодиакальный свет представляет собой рассеянный солнечный свет. К такому же результату приводит изучение спектров, полученных Еропкиным и Козыревым ⁴¹ и Гофмейстером ⁴². В 1932 г. Раманатан ⁴³ обнаружил в спектре зодиакального света усиление эмиссионных линий ночного неба. Этот результат был подтвержден Каримовым ^{44, 45}, Тиховым ⁴⁶ и Карягиной ⁴⁷. Однако фотоэлектрические наблюдения Роча и др. ²⁹ и Дивари и Асаада ⁴⁸ позволяют с достаточной уверенностью считать, что в зодиакальном свете нет усиления эмиссионных линий ночного неба. Кроме того, спектры, полученные Фэзом ⁴⁰, Гофмейстером ⁴², Кабаном и Дюфе ⁴⁹, также подтверждают заключение об отсутствии усиления эмиссионных линий, а согласно Еропкину и Козыреву ⁴¹ и Гофмейстеру ⁴² в зодиакальном свете наблюдалось даже ослабление эмиссионной линии λ 5577. До сих пор неясно, почему на некоторых спектрограммах получается усиление эмиссионных линий, которое не подтверждается фотоэлектрическими наблюдениями. Возможно, что это обуславливается инструментальными эффектами, связанными с весьма низкой разрешающей способностью спектрографов, обычно используемых для получения спектров зодиакального света, или является результатом случайности при усреднении за время экспозиции меняющейся вдоль альмукантарата интенсивности эмиссионной линии.

Значительный интерес в связи с возможной ролью электронов в образовании конусов зодиакального света имеют контуры спектральных линий зодиакального света. На спектрограммах, полученных Гофмейстером ⁴², фраунгоферовы линии *G*, *h*, *H* и *K* отчетливо разделяются в спектре противосияния, но несколько замыты в спектре зодиакального света. Анализ спектра Гофмейстера был сделан Бекерсом ⁵⁰, пришедшим к заключению, что только 0,4 интенсивности зодиакального света обусловлено рассеянием на твердых пылинках, а остальная часть — рассеянием на свободных электронах. Однако нужно заметить, что результат Бекерса нельзя считать в какой-либо мере надежным, поскольку использованные им спектры Гофмейстера не предназначены для такого рода исследований.

Специальное исследование фраунгоферовых линий в спектре зодиакального света было выполнено Блекуэллом и Ингэмом ⁵¹ по спектру, полученному в 1958 г. в Боливийских Андах (Чакалтайя) при помощи дифракционного спектрографа с дисперсией 38 Å/мм. Полученные спектрограммы, представляющие собой наложение спектров зодиакального света, ночного неба и сумерек, сначала освобождались от спектра ночного неба. Для этого использовались результаты фотоэлектрических сравнений интенсивности зодиакального света и света ночного неба в широкой области спектра с последующим интерполированием для получения относительной доли интенсивности свечения ночного неба на каждой длине волны. Полученный таким образом спектр затем освобождался от эмиссионных линий сумеречного свечения путем сопоставления его со спектром Солнца, взятым из Утрехтского атласа. После этого по регистрограммам, освобожденным таким способом от спектра ночного и сумеречного неба, определялись глубины фраунгоферовых линий в точке максимального поглощения

линий и сравнивались с глубинами соответствующих линий солнечного спектра. Для семи отобранных фраунгоферовых линий отношение глубины линии зодиакального света к глубине линии солнечного спектра в среднем оказалось равным 0,97. Кроме этого, были найдены отношения величин

$$A = \frac{\left[\int I_{\lambda} d\lambda \right]_{\text{зод. свет}}}{\left[\int I_{\lambda} d\lambda \right]_{\text{Солнце}}}$$

для пяти линий спектра зодиакального света и Солнца, которые в среднем дали значение 1,04. Комбинируя результаты, полученные этими двумя методами, Блекуэлл и Ингэм нашли окончательное значение для отношения глубины фраунгоферовых линий в спектрах зодиакального света и Солнца, равное $1,01 \pm 0,10$. Это значение показывает, что в спектре зодиакального света отсутствует замывание фраунгоферовых линий, которое могло бы быть вызвано рассеянием на свободных электронах.

Однако Шмидт и Эльзессер⁵² возражают против последнего заключения, считая, что Блекуэлл и Ингэм неправильно провели усреднение полученных отношений. Они указывают, что поскольку рассматриваемые отношения теоретически не могут быть больше единицы, при усреднении измеренных отношений следует отбросить те значения, которые больше единицы на величину, превышающую вероятную ошибку одного измерения. При этом по тем же данным Блекуэлла и Ингэма⁵¹ они получили для среднего значения отношения глубины фраунгоферовой линии в спектре зодиакального света к глубине соответствующей линии в спектре Солнца значение $0,95 \pm 0,10$, что практически мало изменяет результат Блекуэлла и Ингэма⁵¹. Важным недостатком методики Блекуэлла и Ингэма следует считать то, что ими не учтено истинное распределение энергии в спектрах ночного неба и звездного фона, накладывающихся на спектр зодиакального света. При этом нужно иметь в виду, что спектр ночного неба отличается от спектра зодиакального света. Такого же рода замечание относится и к спектру сумеречного неба, который использовался Блекуэллом и Ингэмом для сравнения с солнечным спектром. Фотоэлектрические наблюдения сумеречного излучения, проведенные с интерференционными фильтрами⁵³, показали, что спектр сумеречного свечения отличается от спектра Солнца, причем в видимой области существенный эффект оказывает поглощение озоном в полосе Шапюи.

Учитывая сделанные замечания, результат Блекуэлла и Ингэма⁵¹ нельзя считать достаточно точным для дальнейших выводов относительно природы материи зодиакального света. Тем не менее этот результат показывает, что в пределах точности наблюдений и метода обработки отношение глубины фраунгоферовых линий в спектрах зодиакального света и в спектре Солнца близко к единице, т. е. в спектре зодиакального света отсутствует заметное замывание фраунгоферовых линий солнечного спектра.

Щеглов⁵⁴, используя электронно-оптический преобразователь в комбинации с эталоном Фабри — Перо, обнаружил в зодиакальном свете усиление эмиссии в лучах H_{α} . Им было найдено, что излучение неба в лучах H_{α} (λ 6563) зависит от эклиптической широты и элонгации от Солнца так, что вдоль эклиптики при изменении элонгации от 90 до 180° интенсивность падает приблизительно в пять раз. В направлении, перпендикулярном к эклиптике, при изменении широты от 0 до 90° интенсивность уменьшается приблизительно в шесть раз. Согласно измерениям Щеглова эмиссионная линия H_{α} не имеет следов заметного уширения или смещения в результате эффекта Доплера, т. е. эта линия эмиттируется атомами водорода, не имеющими радиальной составляющей скорости более 2—3 км/сек.

Измерения контура линии поглощения H_{β} λ 4861, проведенные в Бolivийских Андах (Чакалтайя) при помощи высокоразрешающего дифракционного спектрографа, использованного в комбинации с эталоном Фабри—Перо, позволили Джеймсу⁵⁵ установить, что в вечернем зодиакальном свете наблюдается доплеровское смещение в синюю сторону, но отсутствует заметное замывание линии. В утреннем зодиакальном свете обнаружено красное смещение, однако оно получается значительно менее уверенно, чем синее смещение вечером.

V. ЦВЕТ ЗОДИАКАЛЬНОГО СВЕТА

Обычно цвет зодиакального света определяется при помощи фотоэлектрических наблюдений. Такие наблюдения дают возможность определить отношение интенсивностей зодиакального света в двух участках спектра и сравнить их с соответствующим отношением для солнечного излучения или непосредственно получить показатель цвета зодиакального света. В табл. V приведены опубликованные значения показателя цвета

Таблица V

Значения показателя цвета зодиакального света

Авторы	$C. I_{\lambda, c}$	$C. I_{\odot}$	Δ	$\lambda_{\text{син}}/\lambda_{\text{зел}}$
Бер и Зидентопф ²²	0,63	0,43	+0,20	444/542
Дивари и Асаад ²⁴	0,35	0,45	—0,10	414/541
Никольский ³⁵	0,56	?	?	414/540
Петерсон ²³	0,48	0,45	+0,03	435/543
Дивари и Крылова ²⁵	0,47	0,63	—0,16	406/543
Робле*) ³³	—	—	+0,16	463/528
Дивари, Крылова и Мороз ³⁴	—	—	+0,14	460/520

*) Вычислено мною по данным табл. V работы 33.

зодиакального света или значения $2,5 \lg (I_{\lambda}/I_c)$, где I_{λ} и I_c — интенсивности зодиакального света соответственно в зеленых и синих лучах. В третьем столбце таблицы даны значения показателя цвета Солнца, а в четвертом разность Δ показателей цвета зодиакального света и Солнца, которая равна $2,5 \lg (I_{\lambda}/I_c)$, если наблюдаемые яркости I_{λ} и I_c выражены в единицах яркости солнечного диска. В последнем столбце таблицы приведены эффективные длины волн спектральных интервалов, использованных для получения отношения интенсивностей.

Результаты Дивари и Асаада²⁴ и Дивари и Крыловой²⁵ показывают, что зодиакальный свет несколько синее Солнца. Это согласуется с результатом Карягиной⁵⁶, показавшей при помощи спектрографических наблюдений, что цвет зодиакального света несколько синее, чем цвет Солнца. Однако результаты Бера и Зидентопфа²², Петерсона²³, Робле³³, а также Дивари, Крыловой и Мороза³⁶ противоречат этому заключению. Согласно этим наблюдениям зодиакальный свет несколько краснее Солнца. Возможно, что эти расхождения связаны с ошибками при учете селективной прозрачности атмосферы, на что обращалось внимание в работе²⁴. Как указали Бер и Зидентопф²², они не считают уверенным свое определение показателя цвета, поскольку стандартизация в синей области произведена ими не достаточно надежно. Среднее значение разности между показателем цвета зодиакального света и показателем цвета Солнца по шести определениям, приведенным в табл. V, равно 0,04 mg , что показывает, что цвет зодиакального

света практически совпадает со цветом Солнца. Этот результат согласуется со старыми фотоэлектрическими наблюдениями Эльви и Рудника (цит. по ⁵⁷), а также со спектрографическими измерениями Еропкина и Козырева ⁴¹ и Каримова ⁴⁴, показывавшими, что распределение энергии в спектре зодиакального света близко распределению в спектре Солнца.

Рассматривая зодиакальный свет при больших эклиптикальных широтах, Саито ³⁷ определил, что цвет этого света близок к цвету звезды класса К. Однако этот результат, находясь в резком противоречии с измерениями, проведенными другими авторами, не может быть принят и, возможно, является следствием недостаточно полного освобождения от составляющей свечения ночного неба, которое заметно краснее Солнца ⁵⁸.

Таким образом, фотометрические и спектрографические наблюдения зодиакального света позволяют сделать заключение о том, что цвет зодиакального света близок к цвету Солнца. Однако это заключение следует рассматривать только как первое приближение, и представляется желательным проведение более точных, специально поставленных наблюдений с целью выяснения более тонких особенностей распределения энергии в спектре зодиакального света.

VI. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЗОДИАКАЛЬНОГО СВЕТА

Измерения хода степени поляризации излучения зодиакального света вдоль эклиптики впервые были сделаны Дюфе ⁵⁹ фотографическим методом. Фотоэлектрические наблюдения были использованы для определения степени поляризации зодиакального света многими наблюдателями. В табл. VI приведены результаты, полученные различными авторами.

Как видно из приведенных в табл. VI значений, имеются значительные расхождения в определениях абсолютных величин степени поляризации. Например, измеренные значения поляризации при элонгации $\epsilon = 60^\circ$ колеблются от 0,08 (по ³⁵) до 0,36 (по ³¹) при среднем по всем наблюдениям значении 0,22. Такие большие различия обусловлены трудностями правильного выделения составляющей зодиакального света из общего потока излучения ночного неба. Поскольку при наблюдениях зодиакального света измеряется общий поток света, включающий излучение свечения ночного неба, которое практически не поляризовано ⁶⁰, наблюдаемая степень поляризации оказывается меньше, чем степень поляризации зодиакального света. Так, согласно анализу Вайнберга ⁶¹ наблюдаемая степень поляризации суммарного излучения в узком спектральном интервале, выделяемом интерференционным фильтром с центром у 530 мк, при элонгации $\epsilon = 60^\circ$ равна 0,16, а степень поляризации зодиакального света в этой же области равна 0,28. Чем шире используемый для наблюдений фильтр, тем меньше оказывается наблюдаемая степень поляризации, поскольку широкий фильтр пропускает большую долю неполяризованного излучения ночного неба. Например, в тех же условиях при $\epsilon = 60^\circ$ наблюдаемая поляризация в белом свете оказалась равной всего 0,04, вместо 0,16 по измерениям с узким фильтром.

Из данных табл. VI прежде всего очевидно, что монотонное падение степени поляризации с увеличением элонгации при элонгациях, больших 35° , полученное Бером и Зидентопфом ²² и Никольским ³⁵, не согласуется со всеми остальными определениями, и поэтому этот результат следует считать ошибочным. По-видимому, можно считать установленным, что степень поляризации возрастает с увеличением элонгации от 30 до $60-70^\circ$. В области $50-70^\circ$ степень поляризации меняется мало. При элонгациях, больших 70° , ход степени поляризации согласно наблюдениям Дюфе ⁵⁹, Фурухаты ²⁶, Дивари и Асаада ²⁴ и Петерсона ²³ медленно

Степень поляризации зодиакального света вдоль эклиптики

<div> <div>ε</div> <div>Авторы</div> </div>	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°	105°	120°	135°
Дюфэ ⁵⁹	—	—	0,125	—	0,125	—	0,13	—	0,15	—	0,13	0,10	0,06	0,04	0,025	—	—	—
Фурухата ²⁶	—	—	—	—	0,15	0,18	0,20	0,21	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17	0,15	0,13	—	—	—
Бери Зидентопф ²²	—	—	—	0,23	0,23	0,22	0,22	0,21	0,19	0,17	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	—	—	—
Блекуэлл ¹⁸	0,09	0,14	0,19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Дивари и Асаад ²⁴	—	—	0,15	0,16	0,17	0,18	0,20	0,22	0,22	0,22	0,21	0,20	0,18	0,16	0,13	—	—	—
Эльзессер ³¹	—	—	0,20	—	0,29	—	0,31	—	0,33	—	0,36	—	0,35	—	0,36	—	—	—
Никольский ³⁵ . . .	—	—	0,14	0,19	0,18	0,16	0,13	0,10	0,08	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Блекуэлл, Ин- гэм ¹⁹	—	—	0,22	0,27	0,29	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,32	—	—	—	—	—	—	—
Петерсон ²³ (синий)	—	—	—	—	—	—	—	—	0,22	—	—	0,17	—	—	0,15	0,13	0,12	0,12
Петерсон ²³ (зелен.)	—	—	—	—	—	—	—	—	0,23	—	—	0,21	—	—	0,20	0,165	0,16	0,15
Робле ³³	—	—	—	0,10	0,13	0,14	0,16	—	0,19	—	—	0,22	—	—	—	—	—	—
Дивари, Крылова, Мороз ³⁴ (син.) . . .	—	—	0,14	0,17	0,17	0,20	0,21	0,22	0,24	—	—	—	—	—	—	—	—	—
То же ³⁴ (зелен.)	—	—	0,16	0,17	0,21	0,22	0,23	0,22	0,23	0,23	—	—	—	—	—	—	—	—
Средние (сгла- жен.)	0,08	0,13	0,16	0,18	0,20	0,22	0,23	0,24	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21	0,20	0,19	0,16	0,15	0,14

уменьшается с увеличением элонгации. Однако по наблюдениям Эльзесера³¹ при элонгации 70—90° степень поляризации остается практически неизменной. Для элонгаций, больших 90°, имеется только одно определение Петерсона²³, которое показывает, что в области 90—135° степень поляризации заметно падает. По измерениям Блекуэлла¹⁸, проведенным с высоты 2700 м, в области элонгаций 20—30° степень поляризации возрастает с увеличением элонгации.

В последней строчке табл. VI приведены средние сглаженные значения степени поляризации. При этом для усреднения не использованы измерения²² и³⁵, поскольку они дают относительный ход, противоречащий остальным наблюдениям. При усреднении исключены также наблюдения Дюфе⁵⁹, поскольку они относятся к широкому участку спектра

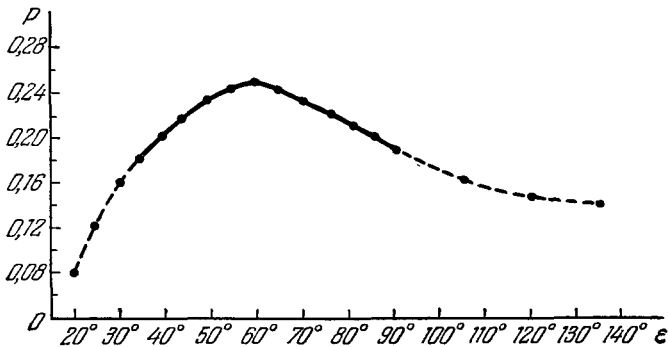


Рис. 2. Усредненная зависимость степени поляризации от элонгации для эклиптики.

(фотографическая область спектра) и поэтому, по-видимому, приводят к низким значениям степени поляризации, особенно при больших элонгациях. Усредненные значения степени поляризации получены без учета возможной зависимости степени поляризации от длины волны, поскольку для этого уточнения сейчас нет достаточного наблюдательного материала. На рис. 2 показана зависимость степени поляризации зодиакального света от элонгации для эклиптики, которая в настоящее время может быть принята в качестве наиболее вероятной зависимости на основании опубликованных данных различных авторов.

Измерения степени поляризации зодиакального света вне эклиптики проводятся редко. Для области эклиптических широт $-15^\circ \leq \beta \leq 25^\circ$ значения степени поляризации зодиакального света приведены в³⁴.

Ориентация вектора поляризации исследовалась Фесенковым⁶² по измерениям, проведенным им в Ливийской пустыне. Оказалось, что вектор поляризации при вертикальном положении эклиптики направлен вдоль вертикала на Солнце. Однако при наклонных положениях эклиптики направление вектора поляризации не совпадает с направлением на Солнце, а отклоняется к направлению вертикала. Этот странный эффект нуждается в специальной проверке.

VII. ЗОДИАКАЛЬНЫЙ СВЕТ И СОЛНЕЧНАЯ КОРОНА

Предположение о связи зодиакального света с солнечной короной основано на теории Гротриана, согласно которой солнечная корона состоит из двух составляющих: электронной (*K*-корона) и пылевой (*F*-корона). Если *F*-составляющая короны и зодиакальный свет обусловлены

рассеянием солнечного излучения на твердых пылинках межпланетного пространства, то было бы естественно, чтобы солнечная корона непрерывно переходила в зодиакальный свет. Эта концепция впервые была развита Алленом ⁶³ и Ван-де-Хюлстом ⁶⁴. В дальнейшем она нашла поддержку в работах Рензе, Джексона и Тодда ⁶⁵, Роча и Ван-Бисброка ⁶⁶, Блекуэлла и Ингэма ⁶⁹. Наблюдения зодиакального света обычно проводятся при

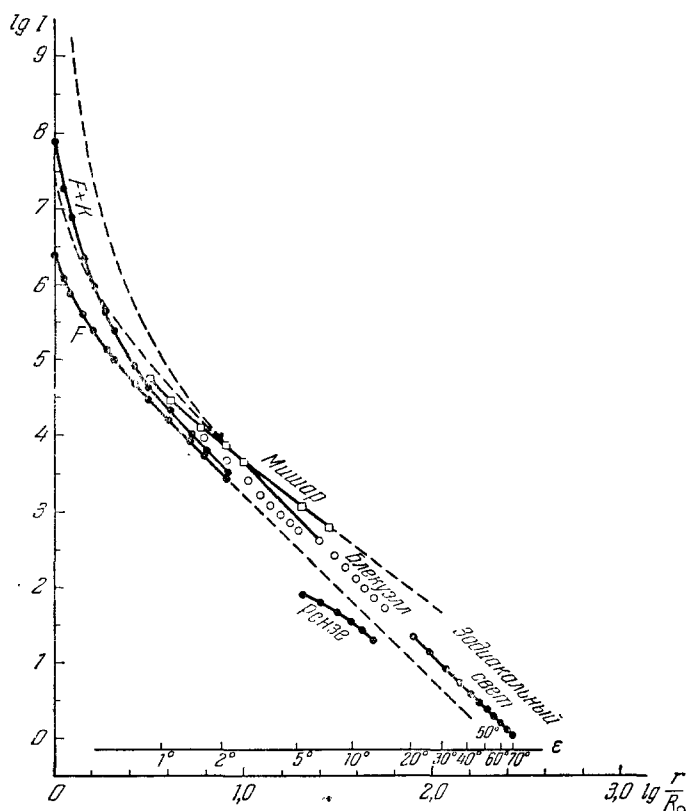


Рис. 3. Яркость внешней короны по данным различных авторов и средняя яркость зодиакального света.

элонгациях $\epsilon > 30^\circ$. Классические наблюдения короны охватывают область в несколько солнечных радиусов от центра солнечного диска и могут быть представлены моделью Ван-де-Хюлста ⁶⁷, охватывающей область до $10 R_\odot$ ($2^\circ, 7$) от центра солнечного диска. Мисар, Дольфус, Пекер, Лафитер и д'Азамбужа ⁶⁸ по наблюдениям солнечного затмения 25 февраля 1952 г. в Хартуме измерили интенсивность короны до расстояния в $28 R_\odot$ ($7^\circ, 5$) и поляризацию до $10 R_\odot$ ($2^\circ, 7$). Рензе, Джексон, и Тодд ⁶⁵ исследовали область между $5^\circ, 5$ ($21 R_\odot$) и 13° ($47,5 R_\odot$) по наблюдениям затмения 25 февраля 1952 г. с самолета, летящего на высоте 9750 м. Блекуэлл ⁶⁹ измерил интенсивность внешней короны в области от $6 R_\odot$ до $55 R_\odot$ ($14^\circ, 7$) и поляризацию от $6 R_\odot$ до $20 R_\odot$ ($5^\circ, 3$) с высоты 13 000 м во время затмения Солнца 30 июня 1954 г.

На рис. 3 в логарифмической шкале приведены в единицах 10^{-13} средней яркости солнечного диска яркости внешней короны и зодиакального света. Как видно из графика, имеются значительные расхождения между яркостями внешней короны, измеренными различными наблюдате-

лями. Экстраполируя кривые изменения яркости, полученные по наблюдениям Мишара с соавторами⁶⁸ и Рензе с соавторами⁶⁵, можно видеть, что ни одна из этих кривых не может рассматриваться как продолжение кривой для яркости зодиакального света. Кривая Блекуэлла⁶⁹, находящаяся между первыми двумя, служит вполне хорошим продолжением кривой изменения яркости зодиакального света. Однако с внутренней (солнечной) стороны кривая Блекуэлла не является точным продолжением кривых Ван-де-Хюлста для солнечной короны, хотя она и параллельна соответствующему отрезку кривой Ван-де-Хюлста как для F -, так и для $F + K$ -короны. Чтобы соединить кривые Блекуэлла и Ван-де-Хюлста, Ингэм³² вынужден был несколько изменить кривую Ван-де-Хюлста, взяв

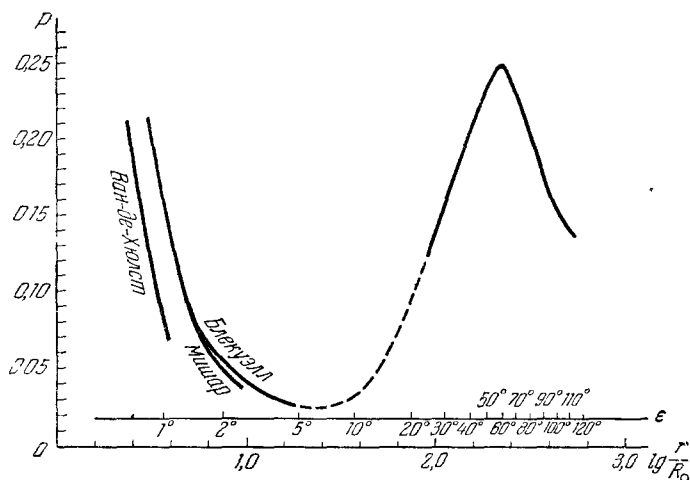


Рис. 4. ¹

ее при этом для максимума солнечной деятельности, хотя кривая Блекуэлла получена в период минимума солнечной деятельности, так как минимальная модель короны Ван-де-Хюлста менее соответствует наблюдениям Блекуэлла, чем максимальная.

Экстраполяция кривой Ван-де-Хюлста в область зодиакального света дает заметно меньшие яркости, чем яркость зодиакального света. С другой стороны, при экстраполяции кривой яркости зодиакального света в сторону к Солнцу получаются значения яркости, заметно превосходящие яркость как F -, так и $K + F$ -корон. (При экстраполяции кривой зодиакального света мы проводили ее так, чтобы она была конгруэнтна кривой для F -и соответственно для $K + F$ -корон в областях, близких к Солнцу.) Учитывая, что классические наблюдения короны распространяются приблизительно до 3° , а уверенные наблюдения зодиакального света начинаются с расстояния в 30° от центра солнечного диска, ясно, что соединение кривых яркости зодиакального света и короны не могут быть сделаны достаточно надежно. Из трех опубликованных измерений только данные Блекуэлла могут служить хорошим мостом между короной и зодиакальным светом. Однако учитывая трудности освобождения от влияния атмосферы, окончательные надежные заключения о связи между короной и зодиакальным светом едва ли могут быть получены до тех пор, пока не будут проведены наблюдения за пределами земной атмосферы при помощи ракет и спутников, на что указывалось в работе⁷⁰.

На рис. 4 в полулогарифмической шкале представлен ход поляризации в зависимости от расстояния от центра солнечного диска для внешней

короны по данным Ван-де-Хюлста⁶⁷, Мишара с соавторами⁶⁸ и Блекуэлла⁶⁹; а для зодиакального света согласно средним значениям табл. VI. Кривые Ван-де-Хюлста и Блекуэлла не совпадают на всем рассматриваемом интервале элонгаций. Кривые Блекуэлла и Мишара расходятся при элонгациях, больших $1^{\circ},5$. Кривая Блекуэлла для внешней короны может быть соединена с кривой для зодиакального света (пунктирный участок на рис. 4). При этом при элонгации около 6° получается глубокий минимум. Рассматривая кривую зависимости степени поляризации от элонгации на всем интервале, представленном на рис. 4, можно заключить, что при элонгациях, меньших 6° , наблюдаемая поляризация почти полностью обусловлена *K*-коронной, так как поляризация *F*-коронной при столь малых элонгациях должна быть весьма низкой. Таким образом, соединение кривых зависимости степени поляризации от элонгации для внешней короны и зодиакального света может рассматриваться только как иллюстрация наблюдаемой картины, но оно не дает повода считать зодиакальный свет продолжением солнечной короны.

VIII. КОЛЕБАНИЯ ЯРКОСТИ ЗОДИАКАЛЬНОГО СВЕТА

Многие исследователи, наблюдавшие зодиакальный свет визуально, сообщают о флуктуациях яркости зодиакального света. Так, например, опытный наблюдатель Джонс⁶ неоднократно отмечал быстро происходящие пульсации яркости. В дневнике за 30 января 1854 г. он писал: «Не может быть сомнения, что существуют пульсации зодиакального света» (цитируется по⁷¹). Шёнберг и Пих¹¹ указывают, что в Виндгукке наблюдатели весьма редко фиксировали пульсации, причем во всех случаях пульсации замечались только одним наблюдателем, и не было случаев, когда одна и та же пульсация яркости была бы замечена сразу несколькими наблюдателями.

Наблюдая зодиакальный свет визуально, я также иногда замечал пульсации его яркости. Однако точно такая же картина могла быть отмечена не только в зодиакальном свете, но и в любом месте ночного неба. Таким образом, это явление не имеет отношения непосредственно к зодиакальному свету. Возможно, что оно имеет физиологический характер, хотя вполне естественно ожидать, что свечение ночного неба не представляет собой спокойного свечения и сопровождается небольшими флуктуациями такого же характера, как колебания яркости полярных сияний⁷².

Хэлберт⁷³ сопоставил визуальные наблюдения Джонса⁶ за двухлетний период с 1853 по 1855 г. с геомагнитной активностью по гринвичским измерениям. При этом были выделены так называемые «ненормальные периоды» зодиакального света, характеризующиеся наличием флуктуаций зодиакального света и его повышенной яркостью. Отмечено 23 таких периода, 16 из которых имели место через трое суток после магнитной бури. Остальные семь случаев повышенной яркости зодиакального света не связаны с магнитными бурями. В период с 1911 по 1929 г. Хэлберт нашел пять случаев ненормально яркого зодиакального света, четырем из которых предшествовали магнитные бури. Совершенно очевидно, что поскольку здесь речь идет о яркостях зодиакального света, не освобожденных от других составляющих, описанная картина может быть обусловлена колебаниями атмосферной составляющей свечения.

Значительно больший интерес представляет изучение систематических колебаний яркости зодиакального света, освобожденного от влияния других составляющих свечения. Такого рода колебания, имеющие сезонный характер и достигающие 20%, были обнаружены Эльви и Рочем¹⁴ при помощи фотоэлектрических наблюдений. Согласно этим наблюдениям

вечерний зодиакальный свет имеет максимальную яркость в апреле — мае, минимальную в январе — феврале. Утренний зодиакальный свет дает обратную сезонную зависимость. Полученная авторами зависимость согласуется с аналогичной зависимостью, найденной Эльви⁷⁴ в результате обработки визуальных наблюдений японских наблюдателей.

Фурухата²⁸ по фотоэлектрическим наблюдениям 1945—1949 гг. обнаружил колебания яркости зодиакального света с периодом в несколько дней, а также весьма значительные годовые изменения, при которых яркость зодиакального света меняется в несколько раз.

Анализ фотометрических наблюдений зодиакального света в визуальной области спектра за период с 1946 по 1950 г. позволил нам¹⁶ обнаружить существование сезонных колебаний яркости зодиакального света. Оказалось, что яркость конуса утреннего зодиакального света возрастала в период с сентября по ноябрь, а яркость вечернего зодиакального света убывала с января по середину марта. Таким образом, результаты Эльви и Роча¹⁴ и Дивари¹⁶, хотя и устанавливают существование сезонных колебаний яркости, однако дают отличающиеся друг от друга зависимости. Возможное объяснение такого расхождения, данное в работе¹⁶, заключается в том, что кривая Эльви и Роча обусловлена возмущающим действием на зодиакальный свет так называемого избыточного свечения, ответственного за расширение изофот зодиакального света вблизи горизонта. С другой стороны, Регенер¹⁷, анализируя карты изофот за периоды с 14 сентября по 31 января 1954 г. (9 карт), с 1 февраля по 4 февраля 1954 г. (11 карт) и с 21 февраля по 26 мая 1954 г. (14 карт), не обнаружил систематических изменений яркости сезонного характера. В своей работе Регенер не приводит численного материала, подтверждающего это заключение, однако указывает, что имелись значительные случайные колебания. Средние квадратичные индивидуальных колебаний яркости составляли 11, 12 и 14% для каждого из указанных выше периодов наблюдений соответственно, т. е. колебания яркости имели место и достигали заметной величины.

Барье³⁰ сравнил отношение интенсивностей зодиакального света для двух дней 1953 г. по своим наблюдениям и по наблюдениям Роча с соавторами²⁹. По Рочу с соавторами оказалось, что для точки в эклиптике с элонгацией 40° в зеленых лучах

$$\frac{I(14 \text{ апреля})}{I(14 \text{ января})} = 0,66,$$

а по Барье³⁰ для точки в эклиптике с элонгацией 39° в синих лучах

$$\frac{I(14 \text{ апреля})}{I(14 \text{ января})} = 1,25.$$

Автор считает, что это сравнение показывает, что вариации яркости зодиакального света от ночи к ночи, по крайней мере для небольшого промежутка, не реальны. Относительно этого заключения нужно заметить, что нельзя делать какой-либо вывод относительно реальности вариаций яркости только по результатам двух ночей наблюдений, поскольку здесь могут быть значительные случайные погрешности, связанные с учетом прозрачности, что может быть особенно чувствительно в синих лучах.

Таким образом, заключения некоторых авторов относительно постоянства яркости зодиакального света во времени неубедительны.

Имеются также указания на то, что яркость зодиакального света меняется от года к году. Так, Дюфе⁷⁵ нашел основания утверждать, что в 20-м столетии наиболее яркий зодиакальный свет наблюдался в 1900,

1911 и 1923 гг. Согласно его фотометрическим наблюдениям яркость зодиакального света в 1923 г. на 15% превышала яркость зодиакального света в 1925 г. Дюфе пришел к заключению, что зодиакальный свет имеет повышенную яркость за два года до минимума солнечной активности. Он указывает, что результаты регулярных фотоэлектрических наблюдений, проводящихся на Пике дю-Миди начиная с 1941 г., подтверждают это заключение.

Блекуэлл и Ингэм⁷⁶, наблюдая зодиакальный свет после солнечной вспышки 7 июля 1958 г. и последовавшей за ней 8—9 июля грандиозной магнитной бури, обнаружили усиление яркости зодиакального света.

Авторы установили, что имеется корреляция между яркостью зодиакального света во всех использованных спектральных интервалах и солнечной активностью, что соответствует результату Хэлберта⁷³.

Большой интерес имеет исследование связи зодиакального света с Луной. Согласно анализу Дивари⁷⁷ имеется зависимость яркости зодиакального света от возраста Луны. При этом зодиакальный свет оказывается более ярким вблизи новолуния, чем в другие периоды времени. Увеличение яркости зодиакального света в новолунии по отношению к яркости при возрасте Луны, равном 10 дням, в среднем составляет 30%. Этот результат после дальнейшей проверки может иметь очень важное значение для теории зодиакального света.

Говоря о вариациях яркости зодиакального света, нужно иметь в виду, что используемая авторами методика выделения яркости зодиакального света из общего потока излучения ночного неба далека от совершенства. Как уже указывалось выше, эта процедура обычно основывается на различных предположениях относительно распределения яркости ночного неба, влияния тропосферы и пр. Поэтому нужно очень осторожно относиться к заключению относительно колебаний яркости зодиакального света. Возможно, что отмеченные некоторыми наблюдателями колебания обусловлены не зодиакальным светом, а другими составляющими свечения ночного неба, не точно учитываемыми при редукции наблюдений.

Тем не менее изложенные результаты не дают основания считать, что яркость зодиакального света постоянна. Обнаруженные колебания яркости, по-видимому, не носят сезонного характера, а обусловлены временными вариациями, природа которых не установлена.

IX. ЭЛЕКТРОННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ЗОДИАКАЛЬНОГО СВЕТА

Уилл и Госснер⁵⁷ обратили внимание на то, что наблюдения зодиакального света могут быть использованы для определения электронной концентрации в межпланетном пространстве. Ими был найден верхний предел электронной плотности на расстоянии 1 а. е., равный 1000 см^{-3} .

Бер и Зидентопф²², предполагая, что вся наблюдаемая поляризация зодиакального света обусловлена рассеянием на свободных электронах, нашли, что электронная плотность на расстоянии 1 а. е. от Солнца равна 600 см^{-3} . При этом авторы исходили из недоказанного предположения о том, что свет, рассеянный пылинками, не поляризован.

Однако, как было показано Фесенковым⁷⁸, использовавшим наблюдения, проведенные в Египте осенью 1957 г., нельзя пренебрегать поляризацией света, рассеянного пылинками. К этому же приводят также измерения поляризации в комете Аренда — Ролланда, где, согласно Блекуэллу⁷⁹, степень поляризации света, отраженного пылевыми частицами, достигала 25%. Если считать, что наблюдаемая поляризация в комете Аренда — Ролланда обусловлена только электронным рассеянием, то, как показали Блекуэлл и Уилстроп⁸⁰, необходимо принять очень большие электронные

плотности, в 10^5 раз превосходящие плотность, получающуюся по исследованию молекулярного спектра.

Прямые расчеты степени поляризации, выполненные Гизе ⁸¹, подтвердили заключение о том, что свет, рассеянный на смеси твердых пылинок, должен быть частично поляризован. Вычисленные Гизе степени поляризации не согласуются с результатами измерений Эльзессера ³¹, что дает Гизе повод считать, что поляризация зодиакального света не может быть объяснена без привлечения электронной составляющей. Используя те же данные, Гизе и Зидентофф ⁸² пришли к заключению, что для объяснения зодиакального света необходимо предположить, что вблизи земной орбиты плотность электронов должна составлять 300 см^{-3} , что в два раза меньше плотности, найденной Бером и Зидентоффом ²². Однако с таким заключением нельзя согласиться, поскольку вычисленные Гизе значения степени поляризации для некоторых смесей частиц прекрасно согласуются с результатами измерений степени поляризации, выполненных другими наблюдателями. Например, вычисленные Гизе значения степени поляризации для смеси из 75% железных частиц и 25% H_2O в предположении, что пространственное распределение частиц подчиняется закону $1/r$, где r — расстояние от Солнца, а распределение частиц по радиусам a — закону a^{-2} , хорошо согласуются со значениями степени поляризации, измеренными Дивари и Асаадом, что видно из табл. VII.

Т а б л и ц а VII

Элонгация	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Гизе ⁸¹	14,8	16,6	18,6	20,1	20,6	20,3	19,6
Дивари и Асаад ²⁴ . .	15	17	20	22	21	18	13

Таким образом, заключение Бера и Зидентоффа ²², Гизе ⁸¹ и Гизе и Зидентоффа ⁸² о том, что для объяснения поляризации зодиакального света необходимо предполагать существование электронной составляющей, нельзя считать обоснованным.

Используя спектрографические наблюдения, проведенные в Боливийских Андах (Чакалтайя), Блекуэлл и Ингэм ⁵¹ получили, что электронная плотность вблизи земной орбиты не может превышать 116 электр/см^3 , в предположении, что кинетическая температура электронов не превышает $2 \cdot 10^4 \text{ град}$. Однако Шмидт и Эльзассер ⁵² считают, что Блекуэлл и Ингэм без надлежащего обоснования произвольно приняли для распределения электронной плотности зависимость $1/r^2$ вместо более медленного падения электронной плотности, например, обычно принимаемой зависимости $1/r$. Приняв для закона изменения плотности зависимость $1/r$ и несколько изменив средние результаты Блекуэлла и Ингэма ⁵¹ (см. выше), Шмидт и Эльзассер ⁵² получили, что электронная плотность вблизи земной орбиты не превосходит 400 см^{-3} .

Учитывая, что электроны межпланетного пространства должны принадлежать солнечным корпускулярным потокам и обладать скоростями $500\text{—}2000 \text{ км/сек}$, Джонсон ⁸³ считает, что наблюдатели должны были бы обнаружить доплеровское расширение фраунгоферовых линий зодиакального света, если бы электроны играли существенную роль в образовании зодиакального света. Отсутствие такого расширения Джонсон рассматривает как доказательство того, что в зодиакальном свете электронная составляющая не имеет заметного значения. Здесь же следует указать

на упоминавшийся выше результат Блекуэлла и Ингэма⁵¹ об отсутствии замыкания френгоферовых линий спектра зодиакального света.

Таким образом, наблюдательные факты показывают, что нет необходимости привлекать электроны для объяснения зодиакального света.

Х. О МЕСТОНАХОЖДЕНИИ МАТЕРИИ ЗОДИАКАЛЬНОГО СВЕТА

Рассмотренные данные наблюдений позволяют считать, что в зодиакальном свете отсутствует электронная составляющая. Все известные особенности зодиакального света могут быть объяснены рассеянием солнечного излучения на твердых пылинках. Однако из рассмотренного материала не вытекает как необходимое следствие, что пылевые частицы, ответственные за явление зодиакального света, концентрируются в межпланетном пространстве в виде облака эллипсоидальной или иной формы с центром в Солнце. Следовательно, планетарная гипотеза зодиакального

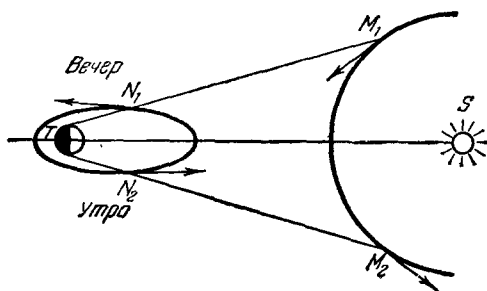


Рис. 5. Возможные орбиты пылинки.

света с точки зрения наблюдательных фактов не является необходимой и очевидной. Большинство теоретических моделей межпланетного облака вычисляется при ряде предположений относительно распределения плотности пыли в межпланетном пространстве, альбедо отражающих частиц, их индикатрисы рассеяния, распределения по размерам и пр. При этом все зависимости подбирались таким образом, чтобы, не входя в противоречие с другими известными фактами, можно было бы получить ход яркости и поляризации зодиакального света вдоль эклиптики, близкий к наблюдаемому. Как правило, это всегда удавалось сделать, так как имеются большие возможности варьирования указанных выше параметров, поскольку они фактически точно не известны. Однако при этом всегда оставалось неясным, насколько полученная тем или другим автором модель зодиакального облака соответствует действительности. В настоящее время известно много моделей зодиакального облака, которые существенно друг от друга отличаются, но достаточно удовлетворительно представляют наблюдаемые яркости и поляризацию вдоль эклиптики. Некоторые из них сейчас должны быть полностью отвергнуты, однако в свое время они могли считаться в некотором смысле приемлемыми. Так, например, модель электронно-пылевого облака, полученная Эльзессером⁵⁴, в настоящее время не может быть принята, поскольку сейчас можно считать установленным, что роль электронов в зодиакальном свете несущественна. Учитывая все изложенное выше, нельзя считать основанием для принятия той или иной модели зодиакального облака согласие вычисленных и наблюдаемых яркостей и степени поляризации зодиакального света вдоль эклиптики.

Джеймс⁵⁵ сообщил о том, что френгоферова линия H_{β} в спектре вечернего зодиакального света обнаруживает синее смещение, что он интерпретирует как результат того, что частицы, рассеивающие солнечный свет, вращаются вокруг Солнца по внутриземным орбитам. Однако такое объяснение не является единственно возможным. Например, тот же эффект может иметь место, если частицы пыли вращаются вокруг Земли по очень вытянутым орбитам с большой осью, направленной на Солнце, как это иллюстрируется рис. 5.

Таким образом, наблюдательные факты не исключают возможности того, что зодиакальный свет обусловлен пылевым облаком, окружающим Землю. Если будет подтвержден наш результат ⁷⁷ о связи между яркостью зодиакального света и возрастом Луны, это явится прямым доказательством того, что конусы зодиакального света обусловлены рассеянием солнечного излучения на околоземном пылевом облаке. В связи с этим нельзя просто отвергать результаты наблюдений Шмида ^{12,85}, который обнаружил путем визуальных наблюдений суточное смещение границ конуса зодиакального света относительно звезд. Необходимо также обратить внимание на неисследованное явление так называемого «лунного зодиакального света», которое наблюдалось Джонсом ⁶ и Шмидом ¹². Возможность того, что зодиакальный свет обусловлен рассеянием солнечного излучения частицами околоземного пылевого облака, кажется более вероятным также в связи с последними результатами исследования межпланетного пространства при помощи космических ракет и спутников (см., например, ⁸⁶), согласно которым плотность пыли вблизи Земли значительно выше, чем в межпланетном пространстве.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. J. D. Cassini, Mém. Acad. Sci. (Paris) 8, 121 (1730).
2. В. Г. Фесенков, Метеорная материя в междупланетном пространстве, М., Изд-во АН СССР, 1947.
3. В. Г. Фесенков, Астрон. ж. 35 (3), 323 (1958).
4. W. John, Kosmos 50 (3), 140 (1954).
5. D. E. Blackwell, Scient. Amer. 203 (1), 54 (1960).
6. G. Jones, United State Japan Expedition, vol. 3, Washington, 1856.
7. E. Marchand, Compt. rend. 121, 1134 (1895).
8. Г. П. Захаров, Изв. Русского о-ва любителей мироведения 3, № 10 (2), 112 (1914); 6, № 3 (27), 166 (1917); 4, № 2 (14), 92 (1915).
9. C. Hoffmeister, Veröff. d. Univer. Sternwarte zu Berlin-Babelsberg 10, 1 (1932).
10. C. Hoffmeister, Astron. Nachr. 271 (2), 49 (1940).
11. E. Schönberg, R. Pich, Mitt. d. Univ. Sternwarte zu Breslau 5, 1 (1939).
12. F. Schmid, Astron. Nachr. 270, 220 (1940).
13. В. Г. Фесенков, La lumière zodiacal (Докторская диссертация, Париж, 1914).
14. C. T. Elvey, F. E. Roach, Astrophys. J. 85, 213 (1937).
15. W. Brunner, Publ. d. Eidgenössischen Sternwarte in Zürich 6, 1 (1935).
16. Н. Б. Дивария, Астрон. ж. 32 (1), 79 (1955).
17. V. H. Regener, Astrophys. J. 122 (3), 520 (1955).
18. D. E. Blackwell, Month. Not. 116, (4), 365 (1956).
19. D. E. Blackwell, M. F. Ingham, Month. Not. 122 (2), 113 (1961).
20. M. N. Donitch, Bull. Astron. 17, 95 (1953).
21. M. N. Donitch, Bull. Astron. 20, 15 (1955).
22. A. Behr, H. Siedentopf, Zs. Astrophys. 32 (1), 19 (1953).
23. A. W. Peterson, Astrophys. J. 133 (2), 668 (1961).
24. Н. Б. Дивария и А. С. Асаад, Астрон. ж. 36 (5), 856 (1959).
25. Н. Б. Дивария и С. Н. Крылова, Астрон. ж. 40 (3), 514 (1963).
26. M. Huruha, Publ. Astron. Soc. Japan 2, 156 (1951).
27. Д. Я. Мартынов, Астрон. ж. 36 (4), 648 (1959).
28. J. Stebbins, G. E. Kron, Astrophys. J. 126, 266 (1957).
29. F. E. Roach, H. B. Pettit, E. Tanberg-Hansen, D. Davis, Astrophys. J. 119 (1), 253 (1954).
30. D. Barbier, Mem. Soc. Sci., Liège, Quatr. Ser. 15, 55 (1954).
31. H. Elsässer, Sterne 34 (9/10), 166 (1958).
32. M. F. Ingham, Month. Not. 122 (2), 157 (1961).
33. R. Robley, Ann. Geophys. 18 (4), 341 (1962).
34. Н. Б. Дивария, С. Н. Крылова и В. И. Мороз, Геомагнетизм и аэронавтика 4 (5), 882 (1964).
35. Г. М. Никольский, Геомагнетизм и аэронавтика 1, 3, 354 (1961).
36. Н. Б. Дивария, Астрон. ж. 28 (3), 163 (1951).
37. Bun-Ichi-Saito, Repts. Ionosph. and Space Res. Japan 14 (2), 180 (1960).
38. Van Rhijn, Groningen Publ., № 43, 1 (1929).

39. В. Г. Фесенков, Астрон. ж. **40** (1), 71 (1963).
40. E. A. Fath, Lick Obs. Bull. **5**, 141 (1909).
41. Д. Я. Еропки и Н. А. Козырев, Цирк. ГАО (Пулково), № 13, 21 (1935).
42. C. Hoffmeister, Zs. Astrophys. **19**, 116 (1936).
43. K. R. Ramapathan, Nature **129**, 280 (1932).
44. М. Г. Каримов, Астрон. ж. **27**, 97 (1950).
45. М. Г. Каримов, Изв. Астрофиз. ин-та АН Каз. ССР **5**, 120 (1957).
46. Г. А. Тихов, ДАН СССР **73**, 53 (1950).
47. З. В. Карягина, Изв. Астрофиз. ин-та АН Каз. ССР **5**, 110 (1957).
48. Н. Б. Дивари и А. С. Асаад, Астрон. ж. **36** (2), 327 (1959).
49. J. Sabannes, J. Dufay, Compt. Rend. **201**, 696 (1935).
50. J. M. Beckers, Proc. Koninkl. Nederl. Akad. wet. **B62** (4), 248 (1959).
51. D. E. Blackwell, M. F. Ingham, Month. Not. **122** (2), 129 (1961).
52. Th. Schmidt, H. Elsässer, Zs. Astrophys. **56** (1), 31 (1962).
53. Н. Б. Дивари, ДАН СССР **122** (5), 795 (1958).
54. П. В. Щеглов, Природа **8**, 85 (1963).
55. J. F. James, New Scientist **17**, 135 (1963).
56. З. В. Карягина, Астрон. ж. **37** (5), 882 (1960).
57. F. Whipple, J. Gossner, Astrophys. J. **109** (3), 380 (1949).
58. К. К. Чуваев, Изв. Крымской астрофиз. обсерв. **10**, 54 (1953).
59. J. Dufay, Compt. rend. **181**, 399 (1925).
60. В. Г. Фесенков, Астрон. ж. **37** (5), 794 (1960).
61. J. L. Weinberg, Nature **198**, 842 (1963).
62. В. Г. Фесенков, Изв. Астрофиз. ин-та АН Каз. ССР **12**, 3 (1961).
63. C. Allen, Month. Not. **106**, 137 (1946) или в «Астрофиз. сборнике», под ред. Н. П. Парийского, М., ИЛ, 1949, стр. 44.
64. H. C. Van de Hulst, Astrophys. J. **105**, 471 (1947) или в «Астрофиз. сборник», под ред. Н. Н. Парийского, М., ИЛ, 1949, стр. 68.
65. A. Wm. Rense, J. M. Jackson, B. Todd, Geophys. Res. **58**, 368 (1953).
66. F. E. Roach, G. von Biesbroeck, Sky and Tel. **13** (5), 144 (1954).
67. H. C. Van de Hulst, Bull. Astron. Inst. Netherlands **11**, 410, 135 (1950).
68. R. Michard, A. Dollfus, J. C. Pecker, M. Laffinuer, M. d'Azambuja, Ann d'astrophys. **17**, 320 (1954).
69. D. E. Blackwell, Month. Not. **115** (6), 629 (1955).
70. В. Г. Фесенков и Н. Б. Дивари, Астрон. ж. **33** (3), 391 (1956).
71. W. E. Glanvill, Popular Astron. **38**, 541 (1930).
72. Н. Б. Дивари, Изв. АН Каз. ССР, сер. астрон. **4**, 3 (1961).
73. E. O. Hulburt, Popular Astron. **38**, 215 (1930).
74. C. T. Elvey, Astrophys. J. **86**, 84 (1937).
75. J. Dufay, Publ. de l'Observ. de Lyon **5**, 8 (1947).
76. D. E. Blackwell, M. F. Ingham, Month. Not. **122** (2), 143 (1961).
77. Н. Б. Дивари, Астрон. ж. **40** (4), 717 (1963).
78. В. Г. Фесенков, Метеоритика **17**, 107 (1959).
79. D. E. Blackwell, Observatory **77**, 900, 187 (1957).
80. D. E. Blackwell, R. V. Willstrop, Month. Not. **117** (6), 590 (1957).
81. R. H. Giese, Zs. Astrophys. **51** (2), 119 (1961).
82. R. H. Giese, H. Siedentopf, Zs. Astrophys. **54** (3), 200 (1962).
83. H. M. Johnson, Observatory **78**, 904, 125 (1958).
84. H. Elsässer, Zs. Astrophys. **33**, 274 (1954).
85. F. Schmidt, Beitr. Geophys. **9** (2), 13 (1908).
86. W. A. Alexander, Trans. Amer. Geophys. Union **44** (2), 464 (1963).