

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ОБЗОР РАБОТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ КОРОТКОВОЛНОВОЙ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ РАДИАЦИИ СОЛНЦА

С. Л. Мандельштам

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящем обзоре излагаются результаты выполненных в последние годы исследований по изучению коротковолновой ультрафиолетовой радиации Солнца с помощью ракет типа V-2. Эти результаты неполны и несистематичны и частично заслуживают серьёзной критики однако в некоторой своей части они представляют несомненный интерес.

Как известно, исследование ультрафиолетовой радиации Солнца привлекает в последние годы всё большее внимание физиков и астрофизиков. Это обусловлено многообразными причинами.

Получение спектра Солнца во всей ультрафиолетовой области позволит, прежде всего, дополнить наши сведения о химическом составе солнечной атмосферы. В настоящее время на Солнце надёжно установлено присутствие 63 химических элементов¹, из которых присутствие Au и Th установлено лишь недавно²; присутствие трёх элементов (Sn, Tb, Ta) находится под сомнением. Не обнаружены Ne, A*), Kr, X, Cl, Br, J, As, Se, Te, Cs, Hg, Re, Tl, Bi, Po, Ra, Rn, Al, Pa, U. Большинство этих элементов имеет трудно возбуждаемые спектры; их резонансные линии лежат в далёкой ультрафиолетовой области спектра. В ближней ультрафиолетовой и видимой областях спектра лежат линии, требующие для своего возбуждения больших энергий.

Однако не эта сторона дела является наиболее важной. Значительно больший теоретический и практический интерес представляет исследование ультрафиолетовой радиации потому, что она тесно связана с физической природой процессов в атмосфере Солнца, солнечной активностью и процессами в земной атмосфере. Усиление деятельности активных образований — пятен, в особен-

^{*)} Линии высокоионизованного аргона обнаружены недавно в спектре солнечной короны.

ности хромосферных вспышек, факелов, флоккул, волокон, протурберанцев — тесно связано с усилением солнечной радиации в ультрафиолетовой области спектра. С солнечной же активностью, в свою очередь, связаны процессы, происходящие в земной атмосфере — ионосфере и тропосфере. Понимание этих явлений требует детального знания величины ультрафиолетовой радиации, её распределения по спектру и процессов её поглощения в земной атмосфере. Между тем эти знания ещё в значительной степени неполны, несистематичны и зачастую противоречивы. Даже в отношении столь детально изучаемой сейчас области, как ионосфера, по существу известно ещё сравнительно мало. Мнения различных исследователей о длине волны ультрафиолетовой радиации, вызывающей ионизацию различных слоёв ионосферы, а также о глубине проникновения различных областей радиации, расходятся весьма сильно.

Есть все основания полагать, что эти явления связаны в основном с коротковолновой ультрафиолетовой радиацией, начиная с $\lambda = 1215 \text{ \AA}$ (L_α) и главным образом лежащей за пределами лаймановской серии ($\lambda = 912 \text{ \AA}$)³; в частности, только эта радиация способна ионизовать земную атмосферу.

Фундаментальным обстоятельством является то, что для объяснения процессов, протекающих в атмосфере Солнца и земной атмосфере, необходимо принять существование значительного избытка (в $10-10^3$ раз) коротковолновой радиации по сравнению с радиацией Солнца, рассматриваемого как чёрное тело. В объяснении этого явления в последние годы произошли существенные изменения. С одной стороны, на основании ряда соображений, повидимому, температуру Солнца в ультрафиолетовой области спектра правильнее оценивать не величиной $T = 5700^\circ$, как это принято для видимой области спектра, а $T = 4800^\circ$, что понижает примерно в 400 раз поток радиации с $\lambda < 912 \text{ \AA}$. С другой стороны, на основании радиоизмерений и спектроскопических данных повышена оценка электронной температуры хромосферы до $T \approx 20\,000-25\,000^\circ$, и, наконец, установлено, что солнечная корона имеет электронную температуру порядка 10^6 градусов. Детальный анализ коротковолнового ультрафиолетового излучения Солнца в свете этих данных произведён И. С. Шкловским³. По теоретическим расчётам Шкловского, суммарное излучение в области $\lambda < 912 \text{ \AA}$, приходящее за 1 сек. на 1 см^2 поверхности, за пределами земной атмосферы составляет: 1) от фотосферы Солнца $1,49 \cdot 10^{-5} \text{ эрг}$, если принять $T = 4800^\circ$, и $6,0 \cdot 10^{-3} \text{ эрг}$, если принять $T = 5700^\circ$; 2) от хромосферы — $0,1 \text{ эрг}$; 3) от непрерывного излучения короны — $5,6 \cdot 10^{-2} \text{ эрг}$; 4) от наиболее интенсивных эмиссионных линий короны ($\text{Ne VIII } \lambda = 768/776 \text{ \AA}$ и $\text{Mg XI } \lambda = 610/625 \text{ \AA}$) — $1,15 \text{ эрг}$. По расчётам Шкловского, излучение в области $\lambda < 400 \text{ \AA}$ определяется короной (без учёта монохроматического излучения) и в области $\lambda > 400 \text{ \AA}$ — хромосферой.

Кроме того, спектрофотометрический анализ спектров хромосферных вспышек, произведённый Э. Р. Мустелем и А. Б. Северным, показал, что излучение в линии L_α во вспышках не только достаточно для больших возмущений ионосферы (эффект Делинджера), но и для выбрасывания водородных атомов с поверхности Солнца⁸.

Сказанного достаточно, чтобы пояснить первостепенную важность исследования коротковолновой радиации Солнца как для физики Солнца, так и для физики Земли.

Как известно, земная атмосфера поглощает ультрафиолетовую радиацию. Спектр Солнца, получаемый на Земле, резко обрывается со стороны коротких длин волн вблизи $\lambda = 2900 \text{ \AA}$. Гётц⁴, работая на высоте 1300 м над уровнем моря, достиг $\lambda = 2863 \text{ \AA}$, Фабри и Бюиссон⁵ — $\lambda = 2885 \text{ \AA}$; однако до настоящего времени спектр Солнца хорошо изучен⁶ лишь до $\lambda > 2949 \text{ \AA}$.

Поглощение ультрафиолетовой радиации земной атмосферой в основном обусловлено поглощением молекул. В интервале от $\lambda \approx 2900 \text{ \AA}$ до $\lambda \approx 2100 \text{ \AA}$ расположена сильно поглощающая полоса озона с максимумом около $\lambda = 2500 \text{ \AA}$. К этой полосе примыкает полоса O_2 , простирающаяся от $\lambda \approx 1950 \text{ \AA}$ до $\lambda \approx 1760 \text{ \AA}$; $\lambda = 1760 \text{ \AA}$ соответствует диссоциации молекулы O_2 . К этой границе примыкает область непрерывного поглощения, простирающаяся до $\lambda \approx 1300 \text{ \AA}$ с максимумом при $1450 \text{ \AA}$. От $\lambda \approx 1300 \text{ \AA}$ до $\lambda \approx 740 \text{ \AA}$ расположены сильно поглощающие полосы O_2 , переходящие при $\lambda = 740 \text{ \AA}$ в область сильного непрерывного поглощения O_2^+ с максимумом при $\lambda \approx 450 \text{ \AA}$. N_2 прозрачен до $\lambda \approx 1450 \text{ \AA}$. В области $\lambda \approx 1450\text{--}1000 \text{ \AA}$ поглощение не очень сильно; к $\lambda \approx 1000 \text{ \AA}$ примыкает очень интенсивная серия полос, простирающаяся до $\lambda \approx 674 \text{ \AA}$, и т. д.

На рис. 1 показана общая качественная картина поглощения воздуха в области $\lambda \approx 2000\text{--}600 \text{ \AA}$ при разных давлениях, полученная в лабораторных условиях, и приведены вычисленные высоты H , над которыми расположена соответствующая эквивалентная толщина атмосферы в предположении о неизменном составе атмосферы⁷. В области $2200\text{--}2000 \text{ \AA}$ имеется «окно», соответствующее смыканию полос поглощения озона и O_2 . Второе «окно» находится в области $1300\text{--}1000 \text{ \AA}$ и в него попадает линия L_α водорода.

Пользуясь имеющимися лабораторными данными о коэффициентах поглощения озона, O_2 , O и N_2 , можно вычислить эффективные толщины слоя воздуха для разных λ , при которых атмосфера имеет ещё заданную величину пропускания. Зная, далее, распределение давления по высоте, можно вычислить глубину проникновения радиации различной длины волны.

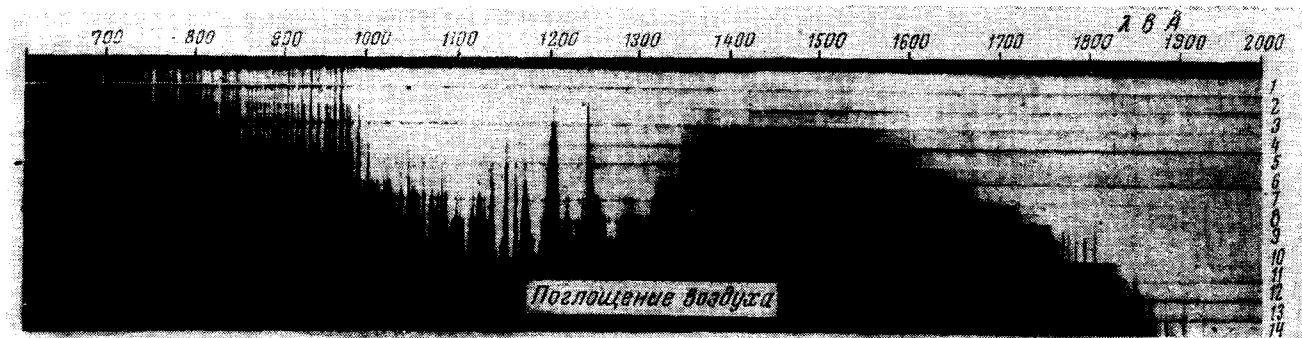


Рис. 1. Спектр поглощения воздуха в коротковолновой ультрафиолетовой области⁷. Спектры получены при толщине поглощающего столба в 100 см. Давление воздуха — P в см рт. ст., L — эквивалентная толщина слоя воздуха в см при давлении в 76 см рт. ст. и H — вычисленная высота (в км), над которой расположена эта эквивалентная толщина слоя воздуха, имеют следующие значения:

№ спектра	P	L	H	№ спектра	P	L	H	№ спектра	P	L	H
1	0,0015	0,0019	—	6	0,1	0,131	128	11	10,0	13,16	86
2	0,0035	0,0046	—	7	0,4	0,526	115	12	20,0	26,3	81
3	0,016	0,021	—	8	0,8	1,05	109	13	76,0	100	72
4	0,03	0,039	—	9	1,6	2,11	103	14	76 см O ₂	—	—
5	0,06	0,079	—	10	3,2	4,21	96				

На рис. 2 приведены результаты таких вычислений для пропускания атмосферой, соответственно, 10% и 1% падающей на неё энергии различной длины волны⁸. Следует, однако, иметь в виду, что подобные вычисления имеют, по существу, качественный характер. Обусловлено это, прежде всего, недостаточно точным знанием коэффициентов поглощения — данные различных исследователей расходятся между собой в несколько раз. Далее, результаты лабораторных измерений относятся к не очень малым давлениям; для вычисления поглощения верхних слоёв атмосферы

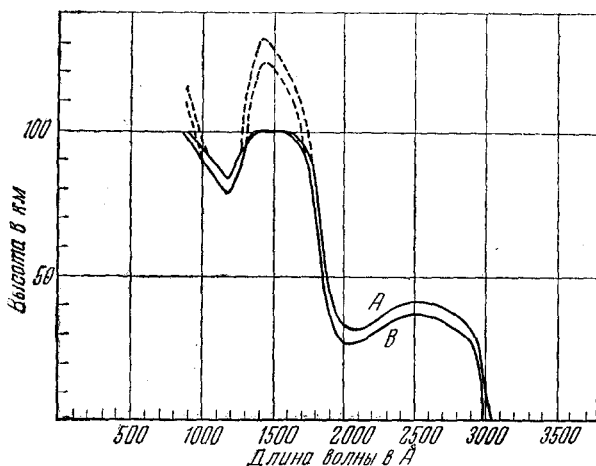


Рис. 2. Вычисленные высоты, до которых проникает солнечная радиация в ультрафиолетовой области спектра⁸. Кривая *A* — для пропускания 10%, кривая *B* — для пропускания 1%. Сплошная линия — в предположении полной диссоциации кислорода на высоте > 100 км, пунктирная — в предположении отсутствия диссоциации кислорода.

эти данные приходится экстраполировать. При этом остаётся неизвестным, выполняется ли закон Бугера-Бера относительно постоянства удельного коэффициента поглощения, и если этот закон не выполняется, то величина отступлений от него. В частности, в отношении O_2 , по измерениям Варбурга и Гайлперна, закон Бугера-Бера не выполняется⁹, Вейслер же этих отступлений не обнаружил¹⁰ *). Наконец, неизвестно, сохраняется ли состав атмосферы неизменным на различных высотах, в частности нет достаточно точных сведений о том, на каких высотах начинается

*) Непосредственное измерение поглощения атмосферы при очень малых давлениях невозможно, так как для достижения измеримого поглощения необходима огромная толщина поглощающего слоя.

диссоциация O_2 и в особенности N_2 . Неопределённость всех этих данных, учитывая чрезвычайно большую эффективную толщину атмосферы, приводит к тому, что различия в величине пропускания атмосферы в вычислениях различных авторов достигают нескольких порядков¹¹.

Несмотря на значительную неопределённость всех этих данных, они свидетельствуют о том, что для достижения заметной пропускания атмосферы в области спектра короче $2900 \text{ \AA}$ измерительная аппаратура должна быть поднята на несколько десятков километров над уровнем моря*). Эти исследования были выполнены в последние годы в США путём подъёма оптической аппаратуры на ракетных снарядах типа V-2; при этом была достигнута высота в 150 км .

Были выполнены две группы исследований. В первой группе спектр Солнца изучался с помощью спектрографов в области

$3000\text{—}2000 \text{ \AA}$. Во второй группе работ измерялся поток коротковолновой радиации, лежащей в области $2000\text{—}0 \text{ \AA}$ без спектрального разложения, путём выделения узких спектральных интервалов.

Примерная траектория полёта ракеты изображена на рис. 3¹⁵. Ось ракеты при старте вертикальна и ракета сохраняет это положение в полёте во время работы двигателя. После прекращения работы двигателя ракета приобретает более или менее случайное вращение вокруг своей оси с угловой скоростью, достигающей 50 об/мин . Кроме того, ракета совершает прецессию с угловой скоростью, достигающей 10 об/мин , вокруг оси, отклонение которой от вертикали может достигать 20° . Это сильно затрудняет регистрацию солнечного излучения; эффективная экспозиция регистрации оказывается весьма небольшой. Оптическая аппаратура располагалась в головной части ракеты или в оконечной её части и в известной точке нисходящей ветви траектории отделялась от ракеты и спускалась на парашюте.

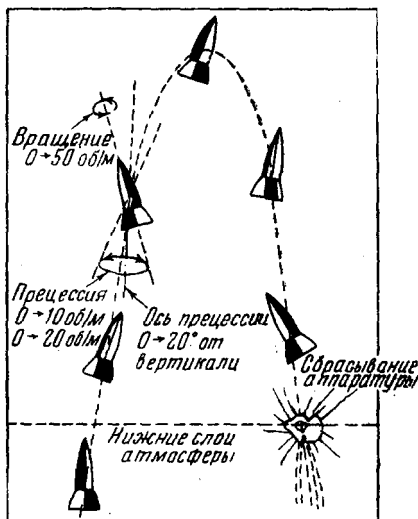


Рис. 3. Примерная траектория ракеты¹⁵.

негативно влияет на регистрацию солнечного излучения; эффективная экспозиция регистрации оказывается весьма небольшой. Оптическая аппаратура располагалась в головной части ракеты или в оконечной её части и в известной точке нисходящей ветви траектории отделялась от ракеты и спускалась на парашюте.

*) Неоднократно делались попытки использовать «окно» вблизи $\lambda \approx 2100 \text{ \AA}$ для измерений на высотах в несколько километров (горы, шары-зонды), однако, повидимому, эти попытки не дали положительных результатов. К их рассмотрению мы вернёмся в конце обзора.

II. СПЕКТРОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работах Баум, Джонсон, Оберли, Роквуд, Стрен и Тусей¹³ и Дюранд, Оберли и Тусей^{13, 14} приводятся результаты, полученные в трёх полётах 10.X 1946 г., 7.III 1947 г. и 9.X 1947 г. Первые два сообщения носят предварительный характер, третье — наиболее подробно.

Во все трёх полётах использовался спектрограф с дифракционной решёткой, схематический чертёж которого изображён на рис. 4. Спектрограф помещался в хвостовой части ракеты.

Чтобы увеличить апертуру пучка, в пределах которой свет ещё попадал в спектрограф, был использован бесщелевой спектрограф. Источником служило изображение Солнца диаметром в 0,03 мм, получаемое от шарика из LiF диаметром в 2 мм.

Для обеспечения попадания света в спектрограф при вращении ракеты были использованы два таких шарика. Оптические оси осветительных систем были при старте направлены на юг и север и наклонены под углом в 45° к зениту. Это устрой-

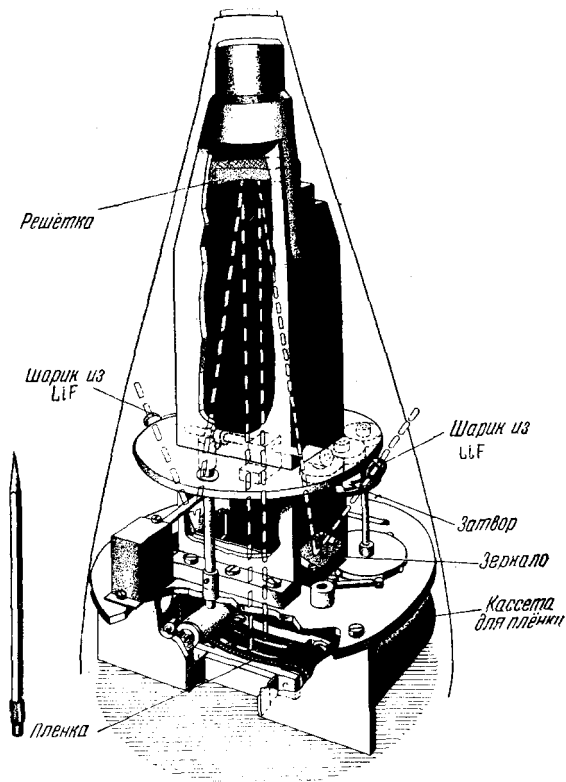


Рис. 4. Схематический рисунок спектрографа ¹⁴.

ство обеспечивало получение спектра для углов между каждой оптической осью и линией, направленной на Солнце, лежащих в пределах до 70° . При этом, однако, для больших углов наблюдалось некоторое ухудшение фокусировки спектра и при перемещении изображения Солнца во время экспозиции — размазывание спектра. Однако выигрыш в свете, по сравнению с использованием щели

и рассеивающей пластинки перед щелью, оказывался весьма большим.

Световой пучок, прошедший через каждый шарик, направлялся с помощью поворотных зеркал на вогнутую дифракционную решётку с радиусом кривизны в 40 см, имевшую 6000 штрихов на сантиметр. Спектр фотографировался на плёнку шириной в 35 мм, расположенную по роуландовскому кругу. Спектры от обеих осветительных систем смещались друг относительно друга по высоте небольшим поворотом зеркал. При использовании плоских зеркал вследствие астигматизма, вносимого решёткой, высота линий составляла 1 мм; в случае применения цилиндрических зеркал, астигматизм можно было достаточно полно скомпенсировать для одной длины волны и сильно уменьшить для всего спектра.

Получающееся при этом уменьшение высоты спектра давало увеличение почернения линий, однако фотометрирование спектра было затруднено из-за различной длины линий в различных областях спектра. Автоматически действующий затвор обеспечивал получение повторяющегося цикла экспозиций, состоявшего из экспозиции в 0,1, 0,6 и 3,0 сек. Перемотка плёнки также осуществлялась автоматически. Использовалась плёнка Истман 103—0, сенсibilизированная для ультрафиолетовой области спектра.

Вследствие вращения ракеты большая часть спектров оказалась недоэкспонированной или сильно размазанной. На фотографии I (см. вклейку к стр. 156) изображены некоторые спектры, полученные во время полёта 10.X 1946 г. на высотах до 88 км¹². Ракета после этого повернулась так, что свет перестал попадать в спектрограф; при следующем повороте (на высоте 107 км) вся плёнка уже оказалась исчерпанной.

Вплоть до высоты 44 км ракета была стабилизирована. После этого она вращалась, и спектры *F* и *G* получены при направлении оптической оси, не проходящей через Солнце. Спектры при воспроизведении ретушированы.

Спектрограммы показывают всё большее распространение в ультрафиолетовую область с увеличением высоты. Спектр *D* (соответствующий высоте в 25 км) простирается до $\lambda \approx 2925 \text{ \AA}$, спектр *E* (34 км) — до $\lambda \approx 2650 \text{ \AA}$ и показывает заметное почернение в области 2100—2260 $\text{\AA}$. В спектре *F* (55 км) наблюдается полная проработка в области полосы поглощения озона.

Последующие полёты дали более удачные спектрограммы. В частности, на одной из спектрограмм, полученных 7.III 1947 г. на высоте 75 км, разрешающая сила не уступала наилучшей разрешающей силе, полученной в лаборатории. Эта спектрограмма, изображённая на фотографии II (см. вклейку), и была положена в основу тщательного анализа спектра¹⁴. Микрофотограмма этого спектра приведена на рис. 5. На рис. 6,а приведена микрофо-

тограмма спектра, полученного 10.X 1946 г. на высоте 35 км, показывающая существование «окна» пропускемости вблизи 2100—2200 Å. Для анализа спектра в области короче 2415 Å использована спектрограмма, полученная 10.X 1946 г. на высоте 55 км, давшая в этой области спектра лучшее разрешение благо-

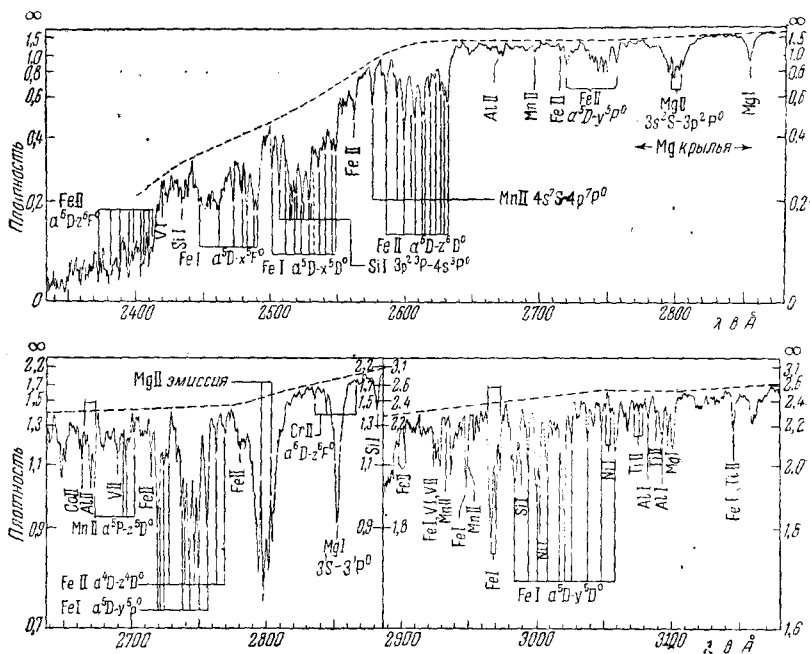


Рис. 5. Микрофотограммы спектра, изображённого на фотографии II 14;
* отмечены места повреждения плёнки.

даря меньшей плотности. Соответствующая микрофотограмма приведена на рис. 6,б.

Анализ спектров произведён следующим образом:

1. Определены длины волн линий, имеющихс в спектре. Эти определения для большинства линий основаны на визуальных измерениях на компараторе несколькими наблюдателями. Для небольшого числа слабых и неразрешённых линий использованы данные микрофотометрической записи. Постоянные, входящие в интерполяционные формулы, определены так, чтобы наилучшим образом удовлетворить измерениям 14 интенсивных линий Fe I и Fe II, расположенных по всему спектру. Возможная ошибка в определении длины волны других линий лежит между 0,2—1,0 Å, в зависимости от резкости линий и свободы от «бленда».

2. Визуально определены интенсивности линий по шкале, аналогичной роуландовской шкале, т. е. с оценкой центральной интенсивности линии и её ширины, причём самым слабым наблюдаемым линиям соответствует интенсивность 3 в шкале Роуланда, а самым сильным — интенсивность 1000.

3. Произведена идентификация линий. Для этой цели на основе таблиц мультиплетов Мур⁶ был составлен список из 1200 линий, относительно которых можно было предполагать, что они могут быть обнаружены при данной разрешающей силе. Этот список был сопоставлен с данными измерения спектров и для каждой линии указаны возможные элементы, спектрам которых эта линия

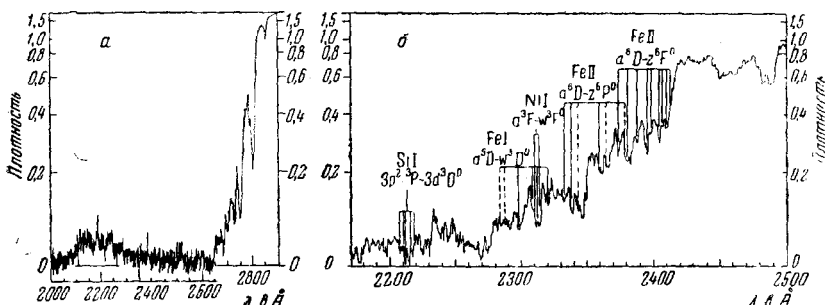


Рис. 6. Микрофотограммы двух спектров¹⁴:

a — на высоте 35 км, *б* — на высоте 55 км.

может принадлежать. На основе анализа соответствующих мультиплетов и лабораторных интенсивностей для многих линий указан наиболее вероятный элемент. Результаты этих исследований представлены в подробной таблице и охватывают около 300 линий. Рассмотрение этой таблицы показывает, что основное число линий в области 3000—2200 Å принадлежит Fe I и Fe II, аналогично ранее доступным областям солнечного спектра. В областях 2750, 2630, 2550 и 2490 Å имеет место очень большое скопление линий железа. Найдены развитые мультиплеты, отождествленные как принадлежащие Si I, VI, VII, Cr II, Co I, Mn II, и линии, отождествленные как принадлежащие Al II, Mg I, Mg II. Далее, возможна принадлежность линий Mn I, Cl I, Ti I, P I, Al I, Cu I, Ni I. Наконец, слабая линия $\lambda \approx 2456,1 \text{ Å}$, по мнению Росселя, могла бы принадлежать As I (лабораторное значение $\lambda = 2456,53 \text{ Å}$).

Линии, расположенные в области спектра 2280—2200 Å, не смогли быть отождествлены как атомные линии, и делается предположение, что они принадлежат молекулярному спектру. В частности, это может быть NO, имеющий полосу вблизи 2264 Å, поглощение которой при толщине слоя 0,5 мм очень велико.

Весьма интересной оказалась структура линий $\text{Mg II } \lambda = 2803$ и $\lambda = 2796 \text{ \AA}$. Крылья этих линий простираются на $25 \text{ \AA}$ в обе стороны и в их центре имеются яркие эмиссионные линии (см. рис. 7), наблюдавшиеся до этого в линиях H и K Ca II . Большая ширина линий Mg II , вероятно, свидетельствует о том, что поглощение осуществляется в глубоких слоях обращающегося слоя, где велик эффект уширения линий вследствие давления. Появление эмиссионных линий толкуется Менцелем как результат сильного извержения водорода, имевшего место за час до полёта.

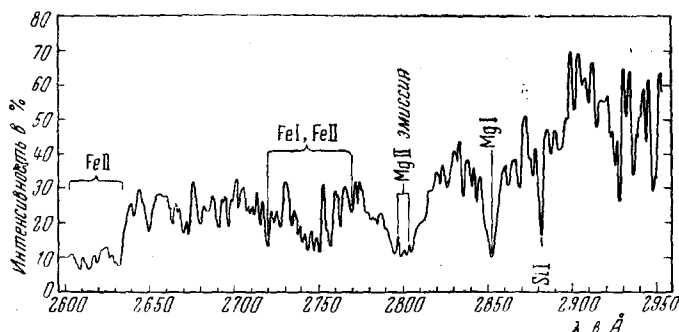


Рис. 7. Распределение энергии в спектре Солнца в ультрафиолетовой области, выраженное в процентах от излучения чёрного тела при $T=6000^\circ \text{ K}$.

Наконец, с помощью марок интенсивностей, нанесённых на плёнки до полёта, было измерено распределение энергии в спектре. Это распределение, изображённое на рис. 7, выражено в процентах от интенсивности чёрного тела при $T=6000^\circ \text{ K}$.

В работе Хопфильда и Клермана¹⁶ приводятся результаты двух полётов 1.IV 1947 г. в 13 ч. 10 м. и 29.VII 1947 г. в 5 ч. 55 м. В обоих полётах использовались одинаковые спектрографы; несколько отличались лишь осветительные системы. Схематический чертёж спектрографа приведён на рис. 8. Спектрограф помещался в головной части ракеты. Спектрограф имеет две щели, расположенные по обе стороны от нормали к решётке. Обе щели несколько смещены по высоте в разные стороны от центральной плоскости, так что спектры также смещены по вертикали. Решётка — вогнутая, 6000 штрихов на сантиметр с радиусом кривизны в 50 см. Ширина щели 0,025 мм, высота 2 мм.

В первом полёте с целью захвата солнечного света в возможно большом телесном угле освещение щели производилось светом, рассеянным на матированном стекле и направляемым на

щель плоским зеркалом. Во втором полёте использовались вогнутые цилиндрические зеркала с небольшим рифлением, растягивающие изображение Солнца в полоски шириной в 5 мм и длиной в 60° в плоскости чертежа. Зеркала поворачивались вокруг оси, лежащей в плоскости чертежа, и следящая система, управляемая двумя фотоэлементами, обеспечивала удержание изображения Солнца на щели спектрального аппарата при изменении положения ракеты относительно Солнца.

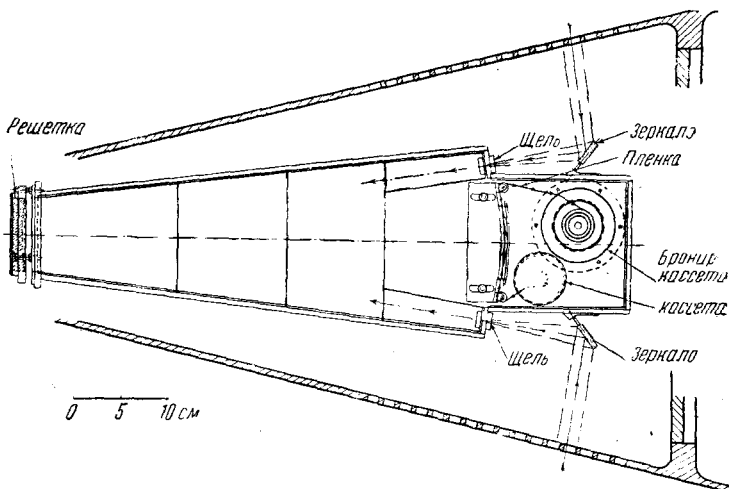
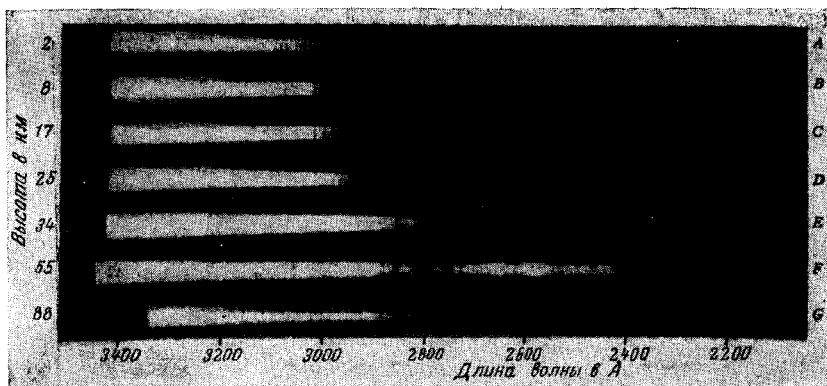


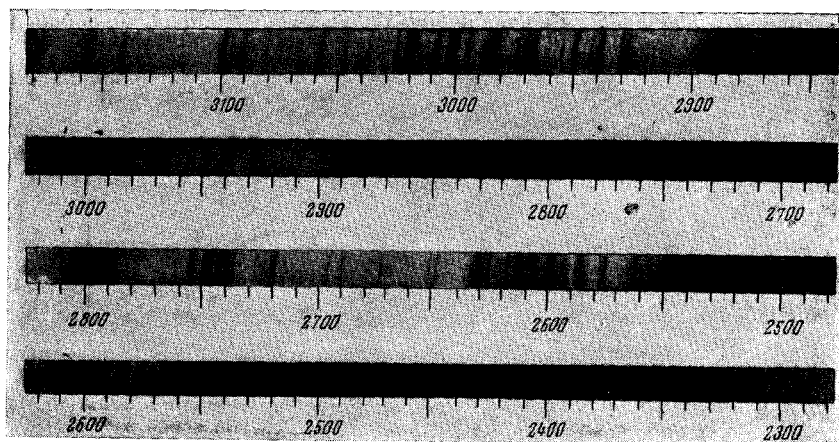
Рис. 8. Схематический чертёж спектрографа ¹⁶.

Съёмка спектра производилась на 35-мм плёнку Истман 103а 0, — чувствительную к ультрафиолетовой области спектра. Экспозиция регулировалась автоматически действующим затвором, который обеспечивал получение 14 снимков с экспозицией в 5 сек. каждый во время подъёма ракеты в стабилизированном положении и 5 снимков с экспозицией по 55 сек. в остальное время полёта ракеты. Плёнка автоматически перематывалась в бронированную кассету. Расположенные вблизи щели дополнительные фотоэлементы, а также перематывающий плёнку механизм давали электрические импульсы, передававшиеся на Землю, по которым можно было определить эффективную экспозицию каждого снимка.

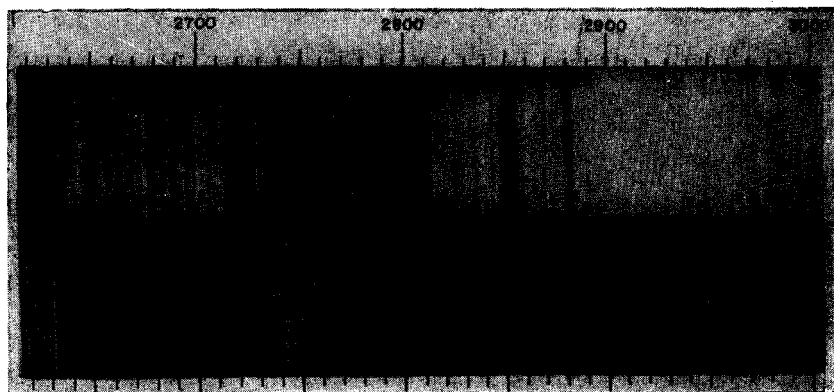
С помощью этой аппаратуры был получен ряд спектрограмм на разных высотах. На фотографии III приведён в качестве примера участок спектра (вместе со спектром сравнения), полученный на средней высоте 135 км; на фотографии IV приведена микрофотограмма этого спектра.



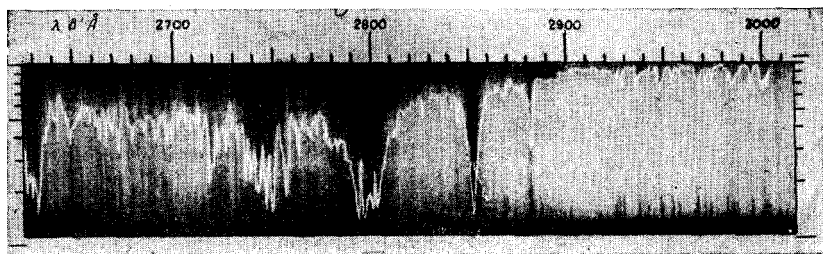
I. Общий вид спектра Солнца, полученного на разных высотах¹².



II. Спектрограмма солнечного спектра, полученная на высоте в 75 км¹⁴.



III. Участок спектра Солнца, полученного на высоте 135 км¹⁶.



IV. Микрофотограмма спектра, изображённого на фотографии III¹⁶.

Для предварительной обработки спектрограмм с помощью того же спектрографа перед его установкой в ракету был получен спектр железа. Увеличенные изображения исследуемого спектра и спектра железа затем совмещались. Более точная обработка производилась с использованием в качестве репер нескольких, наименее блендированных, линий железа в спектре Солнца.

Вследствие блендирования рассеяние результатов оказалось довольно сильным; длина волны линий поэтому даётся с точностью только 0,1 Å.

Для фотометрической обработки спектрограмм были нанесены марки почернения на три отрезка той же плёнки. Один из этих отрезков помещался в кассету спектрографа, второй (в прочном цилиндре) помещался внутри головной части ракеты и третий сохранялся в лаборатории. Таким образом, первые два отрезка испытали все те же термические, механические и химические воздействия, что и плёнка, на которой получался спектр. Все три отрезка плёнки дали одинаковые результаты.

В работе приводится предварительная таблица отождествлённых линий. Все неотожествлённые линии и линии, отождествлённые как бленды слабых линий, опущены. Таблица охватывает область спектра 3000—2500 Å. Основная часть линий, принадлежит Fe I и Fe II. Далее имеются линии, принадлежащие Si I, P I, Na I, V I, V II, Mg I, Mg II, Mn II, Ti II, Cr I.

Как и в предыдущей работе, отмечается большая ширина линий Mg II 2796 и 2803 Å во всех спектрах, приводящая к их частичному перекрыванию, и наличие в центре этих линий линии эмиссии, интенсивность которой достигает около 10% от интенсивности окружающего непрерывного спектра.

Определение кривой распределения энергии по спектру весьма затруднено из-за сильного уменьшения интенсивности в местах скопления железных линий. Обращается внимание на два ярких «окна»: $\lambda \approx 2638$ и $\lambda \approx 2643$ Å. Наиболее естественным является предположение, что это есть истинная интенсивность непрерывного спектра Солнца, не искажённая линиями поглощения. Однако интенсивность в этих «окнах» меньше, чем это следует для $T = 5500^\circ \text{K}$. Авторы считают возможным, что это есть излучение железа, кальция и других элементов, существующих в высокоионизованном состоянии в солнечной короне.

III. ИССЛЕДОВАНИЯ БЕЗ СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

Основная трудность таких исследований заключается в нахождении приёмов достаточно крутого обрезывания длинноволновой стороны спектра. Создание для коротковолновой ультрафиолетовой области жидких или твёрдых фильтров с узкой полосой пропускания не удаётся, ибо все известные материалы, прозрач-

ные для этой области спектра, имеют поглощение с коротковолновой стороны.

В работе Тусей, Ватанабе и Пурселл¹⁷ в качестве приёмника излучения использовался фосфор CaSO_4 , активированный MnSO_4 .

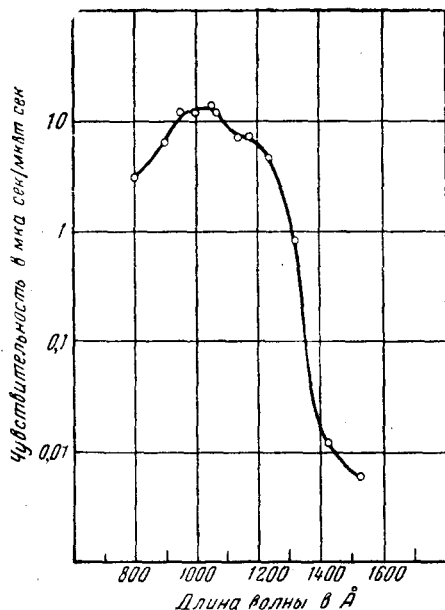


Рис. 9. Спектральная чувствительность фосфора $\text{CaSO}_4 : \text{MnSO}_4$ ¹⁸.

Этот фосфор обладает тем замечательным свойством, что область его чувствительности довольно резко ограничена с длинноволновой стороны спектра вблизи $\lambda = 1350 \text{ Å}$. Если его облучить ультрафиолетовой радиацией $\lambda < 1350 \text{ Å}$ и затем нагреть, то он излучает запасённую световую энергию в области $4480—5790 \text{ Å}$. Этот фосфор, основные свойства которого наблюдали ещё Видеманн и Шмидт в 1895 г., был обстоятельно изучен в работе Ватанабе¹⁸.

Фосфор приготовлялся путём смешивания сульфатов Са и Мп в слабой серной кислоте*); после нескольких часов стояния раствор насухо выпаривался и осадок нагревался до

красного каления. Порошок затем впрессовывался в никелевую сетку 100 меш и закреплялся 5% раствором цемента в ацетоне, который ослаблял чувствительность фосфора к области $1100—1300 \text{ Å}$ на 10%.

Энергия, запасаемая в фосфоре при освещении соответствующим ультрафиолетовым излучением, выделялась путём нагревания фосфора пропусканием тока через никелевую сетку. Люминесценция измерялась фотоумножителем, фототок которого усиливался и подавался на самописец. Световая сумма получалась интегрированием кривой записи по времени.

Основные свойства фосфора таковы: спектральная чувствительность фосфора (рис. 9) имеет максимум вблизи 1030 Å ; в области коротких волн фосфор чувствителен к γ -лучам; в области длинных волн он имеет ещё небольшую чувствительность вблизи

*) Изменение количества MnSO_4 в пределах от 0,2 до 17% не влияло на свойства фосфора.

1600 Å (чувствительность в этой области составляет около 10^{-3} чувствительности в области 1100—1300 Å). Квантовый выход в области максимума чувствительности составляет около 5—10%. Различие в чувствительности в области 1050 Å для пяти образцов фосфора лежало в пределах 13%. Спектр люминесценции фосфора при нагревании изображён на рис. 10. Световая сумма люминесценции оказалась в широких пределах не зависящей от режима нагревания фосфора и линейно связанной с величиной экспозиции освещения фосфора (энергия·время) в пределах изменения экспозиции в 10^4 раз.

Таблица I

Фильтр	Область спектра
CaF ₂ (1—3,4 мм)	1230—1340 Å
LiF (1—2 мм)	1040—1340 Å
Be (0,1 мм)	0—8 Å
без фильтра	0—1340 Å
LiF минус CaF ₂	1040—1230 Å
без фильтра минус (Be + LiF)	8—1040 Å

Величина световой суммы не зависит от температуры фосфора, при которой он находится во время экспозиции ультрафиолетовым излучением, в пределах изменения температуры от -30°C до $+70^\circ\text{C}$.

Закон спада люминесценции хорошо аппроксимируется выражением $I = \frac{E_0 F(T)}{a + t}$, где I — интенсивность люминесценции, E_0 — полная световая сумма, $F(T)$ — неизвестная функция температуры во время излучения, t — время в минутах, a — константа порядка 0,22 мин. Скорость высвечивания существенно зависит от температуры нагревания фосфора. При 0°C высвечивания практически нет, при 20°C заметно, а при 280°C высвечивание практически завершается в 2—3 мин. Далее, было обнаружено, что высвечивание стимулируется ближней ультрафиолетовой областью спектра $\lambda > 2200$ Å. Наконец, установлено, что наличие примесей в фосфоре (Mg, щелочные элементы) смещает максимум чувствительности и длинноволновую границу в сторону длинных волн.

Для получения интенсивности ультрафиолетового излучения в различных областях спектра фосфоры указанного типа соединялись с фильтрами, обрезавшими коротковолновую часть спектра. В качестве фильтров использовались пластинки из CaF₂ и LiF и бериллиевая фольга. Регистрируемые участки спектра с различными

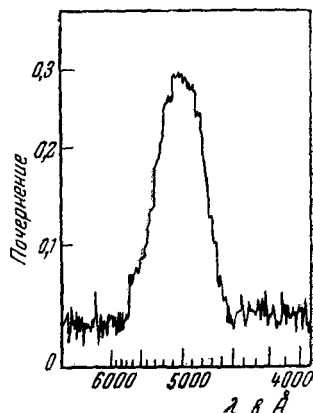


Рис. 10. Микрофотограмма спектра люминесценции фосфора CaSO₄:MnSO₄ после возбуждения ультрафиолетовым излучением ¹⁸.

комбинациями фильтров приведены в табл. I и изображены для CaF_2 и LiF на рис. 11; пропускание Be -фильтра при $10 \text{ \AA}$ очень мало, поэтому, вероятно, фильтр фактически пропускает излучение короче $8 \text{ \AA}$.

Значения кривой A без фильтра получены промером образцов фосфора, участвовавших в полётах. Значения для двух последних областей спектра, приведённых в табл. I, получались вычитанием энергии, полученной при разных фильтрах. Этот приём требует знания распределения энергии в спектре излучения. Данные для этих областей спектра являются поэтому ориентировочными. Основное

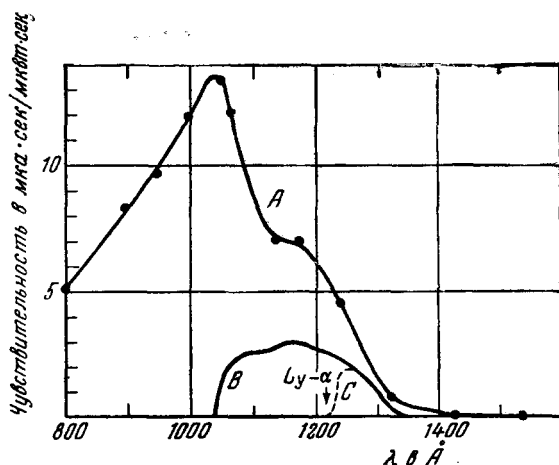


Рис. 11. Области спектра, регистрируемые фосфором с различными фильтрами¹⁷: A — без фильтра, B — фильтр LiF , C — фильтр CaF_2 .

затруднение состояло в исключении неконтролируемого нагревания измерительных образцов фосфора между экспозицией и измерениями. Эксперименты поэтому производились только в зимние месяцы и транспортировка экспонированных образцов фосфоров в лабораторию для измерений производилась в термостатах со льдом. Для контроля отсутствия нагревания в каждом полёте использовались контрольные образцы фосфора, которые облучались за 4—12 часов до полёта стандартной экспозицией от водородной трубки с окном из LiF и во время полёта уже не экспонировались. Часть этих контрольных образцов не участвовала в полёте и после полёта сопоставлялась световая сумма этих образцов и контрольных образцов, участвовавших в полёте. Такое сопоставление давало возможность в некоторых случаях вносить поправки в результаты измерений. Всего было произведено в период 1948 — 1950 гг. шесть полётов ракет V-2, снабжённых фосфорами.

Два полёта оказались неудачными; данные о четырёх удачных полётах приведены в таблицах II и III.

Таблица II

Номер полёта	1	2	3
Дата и время полёта	18. XI 1948 г. 15 ч. 34 м.	17. II 1949 г. 10 ч. 00 м.	11. IV 1949 г. 15 ч. 05 м.
Максимальная достигнутая высота над уровнем моря (в км) .	146	128	88
Высота во время экспозиции (в км)	1—146—1	49—128—86	54—88—17
Эффективное время экспозиции в минутах	1,5	1	0,5
Площадь фосфора в см ²	1,61	1,61	0,65
Солнечная активность во время полёта	нормальная	внезапное ионосферное возмущение	нормальная
Световая сумма фосфора мка·сек с Be-фильтром ($<8 \text{ \AA}$)	сомнительно	0,10	0,000
с LiF-фильтром (1040—1340 $\text{\AA}$) .	0,01	0,52	0,008
с CaF ₂ -фильтром (1230—1340 $\text{\AA}$)	0,005	0,29	0,000
без фильтра ($<1340 \text{ \AA}$)	0,05	1,14	0,034
Контрольный фосфор, участвовавший в полёте ÷ не участвовавший в полёте	0,014	0,19	0,23

Таблица III

Полёт № 4, 17. II 1950 г. 11 ч. 00 м. Максимальная высота 150 км над уровнем моря. Солнечная активность: во время полёта не замечено всплеск или внезапных ионосферных возмущений.

Площадь фосфора 0,65 см².

Экспозиции	№ 1	№ 2	№ 3
Высота во время экспозиции в км	19—82	82—127	127—148
Эффективное время экспозиции в сек	1,5	3	3
Световая сумма в мка·сек с Be-фильтром 0,1 мм ($<8 \text{ \AA}$)	0,040	0,024	повреждён
с LiF-фильтром 1,5 мм (1040—1340 $\text{\AA}$)	0,012	0,126	»
с CaF ₂ -фильтром 1,6 мм (1230—1340 $\text{\AA}$)	повреждён	0,019	»
без фильтра ($<1340 \text{ \AA}$)	0,073	5,84	8,87
Контрольный фосфор, участвовавший в полёте ÷ не участвовавший в полёте	повреждён	0,79	0,91

В первом полёте участвовало четыре набора, каждый из которых состоял из шести образцов фосфора и фильтра, помещённых в стальной кожух, расположенный на глубине около 12 мм от поверхности оболочки ракет. Это давало лишь частичную защиту от нагревания при прохождении снаряда через нижние слои атмосферы. Контрольные образцы показали наличие существенного нагревания во время полёта, вследствие чего результаты этого полёта являются только качественными.

Во втором и третьем полётах фосфоры были защищены от нагревания воздушным потоком. Они были помещены на цилиндр, который поворачивался внутри цилиндрической кассеты, так что освещение фосфоров начиналось сразу после прекращения работы двигателя ракеты (60 сек.) и продолжалось до момента, предшествующего сбрасыванию головной части ракеты. Общее время экспозиции составляло 200 сек.

В четвёртом полёте был использован фосфор с примерно пятикратно повышенной чувствительностью, что позволило использовать пять наборов фосфоров, последовательно экспонированных на различных высотах, начиная с 19 км, в течение 50 сек. Вследствие сильного удара аппаратуры об землю уцелело только 10 проб из 50.

Реальное время экспозиции в каждом полёте зависело от вращения ракеты во время полёта. В полёте № 1 это время было оценено, а в полётах № 2 и № 3 оно измерялось по почернению фотографической плёнки, прикрытой фильтром с малым пропусканием. В четвёртом полёте время экспозиции определялось из данных о положении ракеты с точностью около 30%.

Как показывает рассмотрение таблиц, в полёте № 2, при котором была достигнута высота 128 км, зарегистрировано существование рентгеновского излучения. При этом во время полёта наблюдалось внезапное ионосферное возмущение. В полёте № 1, хотя была достигнута большая высота, а также в полёте № 3 рентгеновское излучение зарегистрировано не было.

Некоторое указание на существование рентгеновского излучения было получено в полёте № 4, однако здесь, как отмечают авторы, результаты противоречивы в том смысле, что интенсивность излучения больше для интервала высот 19—82 км, чем для 82—127 км. Авторы считают возможным, что это объясняется тем, что излучение в рентгеновской области имеет характер всплесков.

Излучение в области 1050—1340 Å зарегистрировано, начиная с высот 80—90 км, что доказывается регистрацией этого излучения в полёте № 3 (достигнутая высота 88 км) и в полёте № 4 во время экспозиции № 1.

Излучение в области 1240—1340 Å со значительной интенсивностью зарегистрировано в полёте № 2 в интервале высот

49 — 128 — 86 км и в полёте № 4 в интервале 82 — 127 км. Для высот меньших 88 км (полёт № 3) излучение в этой области не зарегистрировано.

Интенсивность излучения в области 795 — 1050 Å может быть, как указывалось выше, грубо оценена путём вычитания из интенсивности, полученной для фосфора без фильтра (0 — 1350 Å), интенсивности, прошедшей через Ве-фильтр (0 — 10 Å) и LiF (1050 — 1350 Å), при внесении соответствующих поправок на величину пропускания фильтров. Излучение короче 795 Å, вероятно, при этом можно считать полностью поглощённым N₂. В полёте № 4 экспозиция № 2, энергия, измеренная фосфором без фильтра, была примерно в 50 раз больше энергии, измеренной фосфором с фильтром LiF, а излучение, зарегистрированное в области 0 — 10 Å, очень малым. Это позволяет говорить, что излучение в области 795 — 1050 Å с заметной интенсивностью достигает интервала высот 88 — 127 км. Экспозиция № I этого полёта даёт некоторые указания на то, что это излучение проникает глубже 82 км. Однако здесь интенсивность излучения, зарегистрированная без фильтра, лишь в 6 раз превышает интенсивность, зарегистрированную фосфором с фильтром LiF, что очень близко к трёхкратному превышению, обусловленному поглощением самого фильтра. Поэтому проникновение радиации 795 — 1050 Å глубже 82 км, по мнению авторов, нельзя считать доказанным.

Интенсивность этого излучения на высоте 127 — 148 км на 50% больше, чем на высоте 88 — 127 км; это заставляет полагать, что излучение 795 — 1050 Å до высоты 127 км проходит без заметного ослабления и поглощается в интервале высот 127 — 88 км.

Полёт № 4 позволил получить некоторые количественные оценки величины излучения. Полное излучение, полученное фосфором в интервале 1050 — 1240 Å, оценивается авторами величиной 0,04 мкватт/см² для высоты 82 — 127 км, с возможной ошибкой до двух раз. Значение полного излучения для высот, расположенных над поглощающей областью атмосферы, вероятно, не намного больше. Полное излучение для области 1230 — 1340 Å оценивается величиной 0,02 мкватт/см². Точность этой оценки значительно ниже. Анализируя эти результаты, авторы приходят к выводу, что экспериментальные данные лучше всего согласуются с предположением, что в области 1040 — 1340 Å имеет место излучение, соответствующее излучению чёрного тела, на которое накладывается интенсивная и широкая линия поглощения L_{α} с узкой и интенсивной линией эмиссии в её центре.

Оценка потока излучения для областей 795 — 1050 Å была получена описанным выше способом при учёте того, что квантовая эффективность фосфора составляла от 5 до 10% для

$\lambda \approx 1050 \text{ \AA}$ и примерно половину этой величины для $\lambda \approx 800 \text{ \AA}$. По данным экспозиции № 2 четвертого полёта эта оценка даёт величину порядка $5 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{12}$ квант/см² сек.

В работе Фридмана, Лихтмана и Байрама¹⁹ в качестве приёмника излучения использованы счётчики фотонов. Счётчики регистрировали излучение в областях спектра $0 - 10 \text{ \AA}$, $1100 - 1350 \text{ \AA}$, $1425 - 1650 \text{ \AA}$ и $1725 - 2100 \text{ \AA}$. Полёт был осуществлён 29 сентября 1949 г. в 10 ч. 00 м. Высота Солнца была 43° . Во время полёта не наблюдалось каких-либо существенных изменений в солнечной активности. Показания счётчиков непрерывно в течение всего полёта (336 сек.) передавались на Землю. Ракета достигла высоты 150 км. Работа двигателя прекратилась через 64 сек. после старта. В течение первых 60 сек. положение ракеты было стабильно, после чего ракета начала медленно вращаться примерно, в среднем, с 12-секундным периодом.

Два набора из шести счётчиков были заключены в двух кассетах, которые помещались на противоположных сторонах головной части ракеты, окошки счётчиков были параллельны поверхности оболочки. В каждой кассете был помещён также счётчик, чувствительный только к космическим лучам, и фотоэлемент для определения положения ракеты относительно Солнца при её вращении.

Каждый счётчик состоял из круглой оболочки (из хромистой стали) диаметром в 18 мм, длиной в 50 мм, служившей катодом, и анода — нити диаметром 0,1 мм. Стекланные вводы для анода были приварены к оболочке с обоих концов. Вдоль катода было сделано уплотнение, в котором было просверлено отверстие диаметром в 4,7 мм. Отверстие закрывалось соответствующим фильтром, скрепляемым с оболочкой при помощи цемента.

Счётчик для рентгеновских лучей имел в качестве фильтра бериллиевую фольгу толщиной 0,125 мм. Прозрачность фильтра была практически полной для $\lambda = 2 \text{ \AA}$, 10% — для $\lambda = 6,5 \text{ \AA}$, 1% — для $\lambda = 8,5 \text{ \AA}$ и 0,1% — для $\lambda = 9,5 \text{ \AA}$; для $\lambda > 10 \text{ \AA}$ фильтр был практически непрозрачен. Примерно $\frac{1}{6}$ фотонов, проходящих через фильтр, вызывала отсчёт.

Счётчики для ультрафиолетовых лучей имели в качестве фильтров, обрезающих коротковолновую часть радиации, LiF ($1100 \text{ \AA}$), корунд ($1425 \text{ \AA}$) и кристаллический кварц ($1725 \text{ \AA}$). Для обрезаживания длинноволновой радиации был использован обнаруженный авторами интересный эффект, заключающийся в том, что при прибавлении к благородному газу, заполняющему счётчик, небольших количеств Cl_2 , Br_2 или галоидных соединений углеродов длинноволновый порог чувствительности счётчиков перемещается в сторону коротких длин волн. Счётчик с окном из LiF

был наполнен смесью неона при давлении 300 мм рт. ст. и 15 мм Cl_2 , что дало порог при 1350 Å. Счётчик с корундовым окном был заполнен смесью неона при давлении 300 мм рт. ст. с 0,5 мм Br_2 и счётчик с кварцевым окном — смесью аргона при давлении 10 мм рт. ст. и этилена при том же давлении. Кривые спектральной чувствительности счётчиков изображены на рис. 12. Эффективность счётчиков в максимуме чувствительности при наличии фильтра составляла 10^{-6} — 10^{-8} отсчётов на квант. Абсолютная чувствительность счётчиков, а также область спектральной чувствительности изменялись с течением времени и при употреблении счётчиков. Счётчики для области 1150 — 1350 Å обладали

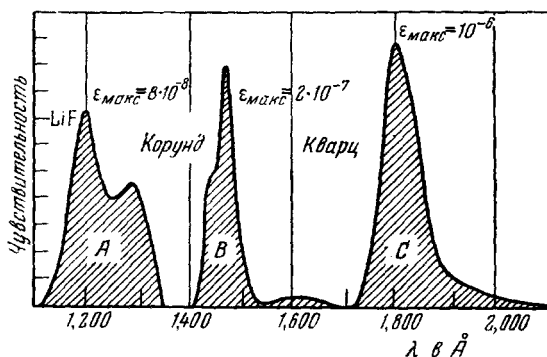


Рис. 12. Спектральная чувствительность счётчиков¹⁹. Масштаб по оси ординат для всех трёх счётчиков различен. Чувствительность в максимуме выражена в числе отсчётов на один квант.

стабильностью в течение нескольких месяцев. Однако для большинства счётчиков длинноволновый порог имел тенденцию смещаться в длинноволновую сторону спектра. Между моментом исследования счётчиков и полётом прошло около месяца. Хотя контрольные опыты не показали существенных изменений счётчиков, чувствительность счётчиков, участвовавших в полёте, можно оценивать лишь по порядку величины.

Скорость счёта каждого счётчика определялась по интегральной величине заряда, протекающего через счётчик, с помощью RC-контура с постоянной времени 2 сек. Средняя величина напряжения, пропорциональная скорости счёта, с помощью катодного повторителя подавалась на телеметрическую систему без дополнительного усиления. Данные от всех счётчиков передавались по четырём каналам с помощью соответствующих коммутаторов. На рис. 13 приведён в качестве примера образец телеметрической записи. При каждом обороте ракеты получается соответствующий

пик. Скорость коммутации сигналов обеспечивала получение восьми точек для каждого пика.

Основной фактор, сказавшийся на точности измерений, состоял в наступлении «насыщения» каждого пика на больших высотах.

Для определения истинного максимума «насыщенных» пиков делалось предположение, что форма каждого пика определяется только взаимным положением окна счётчика и Солнца. Определив форму пика (соотношение между максимальной амплитудой и амплитудой в заданный момент перед и после максимума) по пикам,

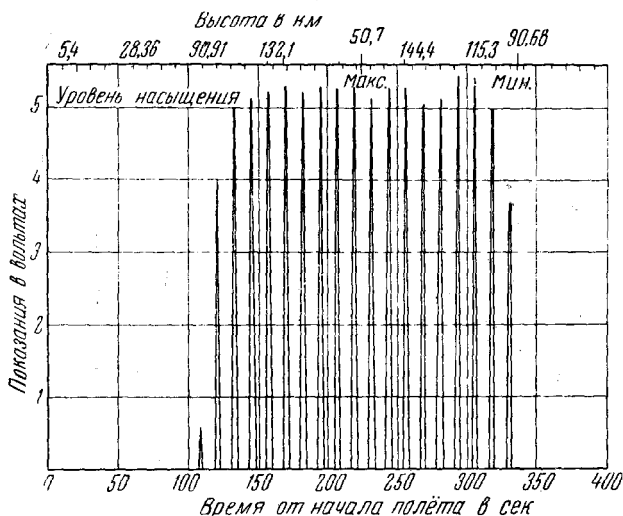


Рис. 13. Телеметрическая запись сигналов счётчика для рентгеновской радиации¹⁹. Кривые проведены по экспериментальным точкам.

не достигшим насыщения, авторы экстраполировали начальные и конечные участки «насыщающихся» пиков. Эта поправка иногда давала удвоение «насыщенного» отсчёта. Вторая поправка вводилась для компенсации искажений, вносимых большой постоянной времени интегрирующего контура. Наконец, вводилась поправка на прецессию ракеты вокруг оси. На рис. 14 приведены в качестве примера отсчёты двух одинаковых счётчиков, расположенных по диаметру головной части ракеты при подъёме и спуске ракеты. Разброс точек, в основном, обусловлен ошибкой в экстраполяции «насыщенных» максимумов и неточным знанием положения ракеты. В целом авторы оценивают ошибку измерений величиной порядка $\pm 50\%$. Несмотря на рассеивание точек, авторы считают, что для трёх более коротких областей спектра достаточно точно установлены высоты, соответствующие максимальной скорости изменения поглощения, и область максимального проникновения

радиации. Счётчик, регистрировавший область $\sim 2000 \text{ \AA}$, достиг насыщения уже на высоте в 7 км , что делало невозможным дальнейшую экстраполяцию «насыщенных» пиков.

Были получены следующие результаты: рентгеновское излучение было зарегистрировано, начиная с высот 87 км ; найденный ход изменения прозрачности атмосферы для рентгеновского излучения с высотой показан на рис. 15. Вычисленный по экспериментальным данным поток излучения за пределами земной атмосферы составляет $10^{-4} \text{ эрг/см}^2 \text{ сек}$. При этом поток, вероятно, следует отнести к небольшому спектральному интервалу вблизи

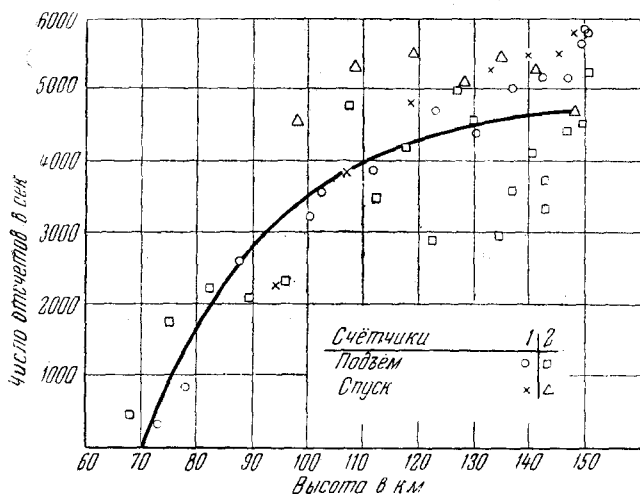


Рис. 14. Отсчёты, полученные с помощью двух примерно одинаковых счётчиков для области $1100-1350 \text{ \AA}$ при подъёме и спуске ракеты¹⁹. Внесена поправка на «насыщение» и постоянную времени контура.

$\lambda=8 \text{ \AA}$. На рис. 15 изображено также изменение прозрачности атмосферы для рентгеновских лучей различной длины, вычисленное по данным Комптона и Аллисона²⁰ о величине поглощения рентгеновских лучей и данным Хавенса о распределении давления по высоте²¹. Кроме того, изображена вычисленная прозрачность атмосферы в специальном предположении о распределении непрерывного излучения в солнечной короне, находящейся при температуре 10^6 градусов²².

Ультрафиолетовое излучение в области $1100-1350 \text{ \AA}$ было зарегистрировано, начиная с высоты в $70 \text{ км} \pm 5 \text{ км}$; найденный ход изменения прозрачности атмосферы для этой области спектра изображён на рис. 16. На этом же рисунке нанесена вычисленная

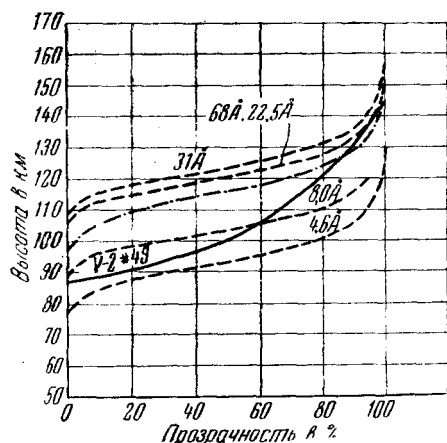


Рис. 15. Изменение прозрачности атмосферы с высотой для рентгеновского излучения λ : — экспериментальные результаты; — — расчётные данные для разных длин волн; — — расчётные данные для излучения короны при $T = 10^6$ градусов.

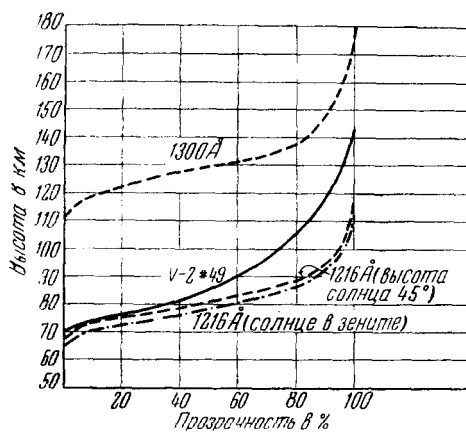


Рис. 16. Изменение прозрачности атмосферы с высотой для ультрафиолетового излучения в области $\lambda \sim 1200 \text{ Å}$: — экспериментальные результаты; — — расчётные данные.

прозрачность атмосферы для $\lambda = 1216$ (L_α) и $\lambda = 1300$ Å по данным Престона²³ и Ладенбурга²⁴ в предположении, что кислород не диссоциирован. Экспериментальная кривая находится в хорошем согласии с кривой поглощения для L_α .

Излучение в области $\lambda \approx 1500$ Å зарегистрировано начиная с высоты примерно в 50 км, однако авторы считают возможным, что отсчёты счётчиков на этой высоте были обусловлены электрическими помехами. Поэтому авторы указывают высоту в 95 км. На рис. 17 изображено измеренное для этой области спектра изменение прозрачности атмосферы с высотой и приведены вычисленные кривые в предположении, что кислород не диссоциирован.

Для области спектра 1750—2100 Å авторы ограничиваются лишь указанием, что излучение было зарегистрировано на высоте 7 км.

Вычисление по данным эксперимента абсолютных потоков излучения ввиду сравнительно большой ширины использованных спектральных участков требует знания закона распределения энергии в спектре Солнца. В предположении, что это распределение соответствует излучению чёрного тела, авторы считают,

что интенсивность излучения в области спектра вблизи 1200 Å соответствует температуре Солнца 6000° К и в области 1500 Å температуре 4500° К. Общий поток излучения в области 1150—1350 Å авторы оценивают в 1—10 эрг/см² сек.

В небольшой заметке Бурнайта²⁵ очень кратко излагаются результаты, полученные при фотографической регистрации рентгеновского излучения. Фотоплёнка закладывалась в кассету с окнами из алюминиевой и бериллиевой фольги.

В полёте 5.VIII 1948 г. плёнка, закрытая бериллиевым окном толщиной 0,076 см, зарегистрировала неожиданно большую интенсивность радиации с $\lambda < 4$ Å. В полёте 18.XI 1948 г. плёнки, закрытые алюминиевыми окнами толщиной 0,00076 см и 0,00153 см и бериллиевым окном 0,0254 см, излучения не зарегистрировали.

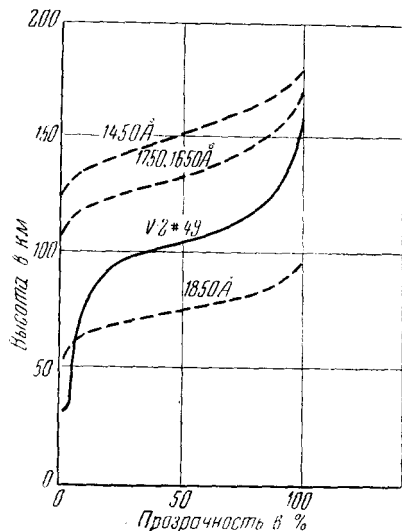


Рис. 17. Изменение прозрачности атмосферы с высотой для ультрафиолетового излучения в области $\lambda \sim 1500$ Å¹⁹: — экспериментальные результаты; — расчётные данные.

В аналогичном опыте 9.XII 1948 г. было обнаружено заметное почернение за алюминиевым окном толщиной 0,00076 см; для бериллиевого окна 0,0254 см почернения обнаружено не было. Высота полётов не указывается.

IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим сначала результаты спектрографических измерений. Применение щели в спектрографе Хопфильда и Клермана обеспечило получение лучшего качества спектра по сравнению со спектрами, полученными Дюрандом, Оберли и Тусей. Это делает более надёжным определение положений линий Хопфильдом и Клерманом. Измерения длин волн линий, однако, повидимому, выполнены в этой работе менее тщательно, что несколько снижает качество полученных результатов. В работе Хопфильда и Клермана также, как уже указывалось выше, приведён не полный список наблюдавшихся авторами линий и, в частности, не приведены длины волн не отождествлённых линий, что представляет наибольший интерес. Детальное сопоставление обеих работ представляется поэтому затруднительным.

В отношении установления присутствия в спектре Солнца линий Fe I, Fe II, Si I, VI, VII, Mg I, Mg II данные обеих работ сходятся и опираются на достаточно большое число линий. Таким образом, присутствие линий этих атомов и ионов в ультрафиолетовой области спектра Солнца можно считать надёжно установленным (присутствие этих атомов и ионов в атмосфере Солнца, как указывалось выше, не вызывает сомнений). Аналогично обстоит дело, повидимому, с линиями P I, хотя здесь речь идёт всего о двух линиях.

В отношении линий остальных атомов и ионов данные обеих работ расходятся. Так, линия, имеющая по измерениям Дюранда и других длину волны 2835,5 Å и отождествлённая ими как наиболее сильная линия Cr II ($\lambda = 2835,64$ Å), по измерениям Хопфильда и Клермана имеет длину волны 2836,0 Å и отождествлена ими как линия Fe II ($\lambda = 2835,72$ Å). Линия, имеющая по измерениям Хопфильда и Клермана длину волны 2985,8 Å, может по данным таблицы этих авторов принадлежать Cr I (2985,86—86,00—86,47 Å) или Fe II (2985,55 Å); в таблице Дюранда и других соответствующая линия отсутствует. Сопоставление этих данных заставляет считать установление присутствия линий Cr I и Cr II в ультрафиолетовой области спектра ненадёжным.

Линия, имеющая по измерениям Дюранда и других длину волны $\lambda = 2669,4$ Å и отождествляемая ими как линия Al II (2669,116 Å), и линии $\lambda = 2661,5$ Å и $\lambda = 2650,7$ Å, отождествляемые как возможно принадлежащие Al II, в таблице Хопфильда и Клермана отсутствуют, повидимому, как слабые линии. Поэтому вопрос о линиях Al остаётся открытым.

Линия $\lambda = 2928,8 \text{ \AA}$, отождествляемая Дюрандом и другими как наиболее сильная линия Co I ($\lambda = 2928,812 \text{ \AA}$), находится в плохо разрешённой полосе. По измерениям Хопфильда эта линия имеет длину волны $2428,7 \text{ \AA}$ и отождествлена как линия Mg II или Fe II, что представляется наиболее вероятным. Аналогичным образом обстоит дело с линиями Ti. Линия $\lambda = 2825,8 \text{ \AA}$, отождествляемая Дюрандом и другими, возможно, как линия Si ($\lambda = 2824,7 \text{ \AA}$), лежит в плохо разрешённой области; в таблице Хопфильда линия с близкой длиной волны отсутствует. Линии $\lambda = 2593,7 \text{ \AA}$ и $\lambda = 2680,7 \text{ \AA}$ отождествляются Хопфильдом как линии Na ($\lambda = 2593,82/92$ и $2680,33/43 \text{ \AA}$); в таблице Дюранда и других первая линия имеет длину волны $2593,6 \text{ \AA}$ и отождествляется как линия Mn II ($2593,73 \text{ \AA}$), а вторая линия отсутствует. Присутствие линий Na является поэтому сомнительным. Наконец, линии, фигурирующие в таблице Дюранда и других как линия Si, и линии, возможно принадлежащие Ni I и As I, имеют длину волны, меньшую $2500 \text{ \AA}$, и выпадают за пределы, охватываемые таблицей Хопфильда. Особый интерес представляет при этом вопрос о As I, присутствие которого в спектре Солнца, как указывалось выше, до настоящего времени не установлено. Против высказанного Ресселем предположения о принадлежности линии $2456,1 \text{ \AA}$ As говорит то обстоятельство, что потенциал возбуждения этой линии составляет $6,37$ вольт, тогда как наивысший наблюденный до сих пор в спектре обрабатываемого слоя Солнца потенциал возбуждения составляет $5,75$ в. Остальные линии As, лежащие в исследованной области спектра, имеют также потенциал возбуждения $6,6$ — $6,7$ в, однако сильно блендированы.

Наконец, необходимо отметить, что в исследованной области спектра лежат резонансные линии Hg ($2536,5 \text{ \AA}$), Au ($2427,95$ и $2675,95 \text{ \AA}$) и интенсивные линии Bi ($2897,975 \text{ \AA}$), Te ($2385,76$ и $2383,25 \text{ \AA}$). Вопрос о поисках этих линий, однако, в обеих работах не дискутируется. В таблице Хопфильда и Клермана имеется линия $\lambda = 2536,2 \text{ \AA}$, отождествляемая как принадлежащая Fe I ($2535,60 \text{ \AA}$) или Fe II ($2536,67 \text{ \AA}$); в таблице Дюранда ближайшая линия $\lambda = 2535,5 \text{ \AA}$. Линии, близкой к линии Au $2675,95 \text{ \AA}$, в обеих таблицах нет. В таблице Дюранда также отсутствует линия, близкая к Au $2427,95 \text{ \AA}$. Линии Te и Bi попадают в очень блендированную область спектра. Поэтому имеющийся материал не позволяет сделать каких-нибудь определённых выводов о присутствии или отсутствии линий Hg, Au, Bi и Te в спектре.

Таким образом, можно констатировать, что эти исследования ничего не прибавили к знаниям о качественном химическом составе солнечной атмосферы. Для получения надёжных результатов в этой области спектра необходимо использование спектральных аппаратов со значительно большей дисперсией.

Весьма интересны согласные результаты обеих работ относительно большой ширины линий Mg II и о существовании линий эмиссии в центре этих линий. Последнее, как уже отмечалось, было известно только для линии Ca II — линий очень интенсивных в абсорбции и, в то же время, сильных в эмиссии в верхних частях солнечной атмосферы. Возможность такого явления и для линий Mg II отмечалась Мензелем.

Наконец, должно быть отмечено спадание в ультрафиолетовой области спектра общей энергии излучения Солнца по сравнению с излучением чёрного тела при 6000° , что обусловлено значительной большей плотностью линий спектра, чем в видимой области, и хорошо подтверждает теоретические ожидания.

Перейдём теперь к рассмотрению результатов, полученных в коротковолновой ультрафиолетовой области без спектрального разложения.

Наибольший интерес представляют измерения рентгеновского излучения. Сопоставление данных работы Тусей, Ватанабе и Пурселля и данных работы Фридмана, Лихтмана и Байрама даёт довольно согласованный результат о проникновении рентгеновской радиации с длиной волны, лежащей в интервале $0-8 \text{ \AA}$, до глубины $80-90 \text{ км}$. Верхняя граница этого интервала ($8 \text{ \AA}$) определяется пропускаемостью использованной бериллиевой фольги.

Следует отметить, что, по подсчётам Шкловского³, до высоты примерно в 90 км проникается вся область рентгеновской радиации с $\lambda < 75 \text{ \AA}$. Эта высота как раз соответствует высоте E -слоя атмосферы. Таким образом, теоретическое предсказание, что основной агент, вызывающий образование E -слоя, есть рентгеновская радиация, находит хорошее экспериментальное подтверждение.

С другой стороны, экспериментально обнаруженная глубина проникновения рентгеновской радиации $\sim 80-90 \text{ км}$ приводит к заключению, что рентгеновская радиация Солнца, повидимому, довольно резко ограничена со стороны коротких волн. Действительно, эффективное сечение для поглощения рентгеновской радиации быстро уменьшается с уменьшением длины волны. На рис. 18 приведена глубина проникновения рентгеновской радиации, лежащей в области $10-1 \text{ \AA}$, рассчитанная по данным Шклов-

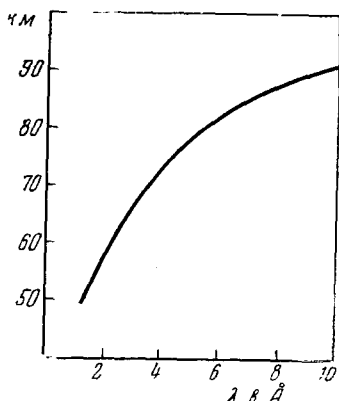


Рис. 18. Вычисленные высоты, до которых проникает рентгеновская радиация в области $1-10 \text{ \AA}$ (пропускание в 1%).

ского для эффективных сечений и Хавенса для давлений (расчёт выполнен для величины пропускания в 1%).

Как следует из этого рисунка, глубина проникновения радиации в этом интервале длин волн быстро увеличивается с уменьшением λ . Обнаружение рентгеновской радиации на высоте, большей 80 км, таким образом, приводит к заключению, что нижняя граница длин волн, при которой это излучение имеет ещё заметную интенсивность, лежит вблизи 5—6 Å. Этот результат является в значительной мере неожиданным, однако попытки его истолкования преждевременны — необходима тщательная проверка экспериментальных результатов.

Что касается количественных данных об интенсивности рентгеновской радиации, то здесь, прежде всего, надо отметить, что на основании результатов рассмотренных работ представляется весьма вероятным, что имеются кратковременные вспышки этого излучения, возможно связанные с хорошо известными вспышками радиоизлучения короны.

Количественные данные о потоке радиации имеются только в¹⁹; поток радиации за пределами земной атмосферы оценивается авторами величиной порядка 10^{-4} эрг/см³ сек. В соответствии со сказанным этот поток надо отнести к интервалу длин волн $\Delta\lambda \sim 2$ Å вблизи $\lambda \sim 8$ Å.

Согласно расчёту Шкловского при температуре короны $T \sim 10^6$ градусов поток радиации с $\lambda < 75$ Å составляет 15% от непрерывного излучения короны за границей серии Лаймана, т. е. $0,15 \cdot 5,6 \cdot 10^{-2}$ эрг/см²сек = $8,5 \cdot 10^{-3}$ эрг/см²сек, причём интенсивность этого излучения в интересующей нас области длин волн мало зависит от длины волны. Отсюда следует, что поток излучения, приходящийся на интервал $\Delta\lambda \sim 2$ Å, составит около $2 \cdot \frac{8,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2 \text{сек}}{75} \approx 2 \cdot 10^{-4}$ эрг/см²сек. Совпадение между экспериментальными и теоретическими данными оказывается весьма хорошим, хотя возможно, что оно является случайным.

Перейдём теперь к результатам для собственно ультрафиолетового излучения. В табл. IV сведены экспериментальные данные¹⁷ и ¹⁹ для глубины проникновения радиации в различных спектральных интервалах, а также данные, рассчитанные по рис. 2, в предположении, что кислород на высоте 100 км и выше диссоциирован. В таблице приведены также экспериментальные данные о величине потока излучения и данные, рассчитанные по излучению чёрного тела при $T = 5700^\circ$ и $T = 4800^\circ$.

Сопоставление экспериментальных данных обеих работ возможно только для спектрального участка 1050—1350 Å. Для этого участка имеется достаточно хорошее совпадение как в отношении глубины проникновения, так и в отношении величины потока радиации. В отношении остальных участков спектра экспе-

Таблица IV

Область спектра в Å	Высота проникновения в км		Энергия в эрг/см ² сек		
	эксперим.	теоретич.	экспе- рим.	чёрное тело $T=5700^\circ$	чёрное тело $T=4800^\circ$
¹⁷ 795—1050	88—127	90—100	10—60	0,1	0,001
¹⁷ 1050—1240	80—90	80—90	0,4	3	0,06
¹⁹ 1100—1350	70±5		1—10		
¹⁷ 1240—1340	90—125	80—100	0,2	6	0,2
¹⁹ 1400—1550	95 (50)	100	—		2,5
¹⁹ 1750—2100	7	25	—		200

риментальные данные о глубине проникновения радиации хорошо сходятся с теоретическими данными. Подтверждается существование «окна» вблизи $\lambda \sim 1200$ Å и второго окна вблизи $\lambda \sim 2100$ Å. Таким образом, весьма существенное для теории ионосферы предположение о проникновении радиации L_α (1215 Å) глубже E -слоя находит себе экспериментальное подтверждение*). Следует также отметить, что найденное экспериментально в¹⁹, начиная с высоты ~ 95 км, резкое увеличение прозрачности атмосферы для $\lambda \sim 1500$ Å (что соответствует максимуму поглощения молекулярного кислорода) свидетельствует о том, что на этой высоте начинается полная диссоциация кислорода. Если бы кислород был не диссоциирован, то эта радиация проникала бы только до высоты около 130 км.

В отношении величины потока радиации обе работы дают для спектрального интервала 1100—1350 Å данные, в общем, (если учесть приводимые авторами возможные ошибки измерений) удовлетворительно совпадающие по порядку величины. Эти данные также удовлетворительно согласуются с теоретическим ожиданием, что основное излучение в этой области обусловлено фотосферой Солнца, причём более удовлетворительное согласие экспериментальных и теоретических данных получается, если принять температуру Солнца $T = 4800^\circ$.

Для области 795—1050 Å экспериментально найденная величина на несколько порядков выше соответствующего излучения фотосферы. Таким образом, для этой области спектра необходимо, в согласии с существующими представлениями, принять, что основное излучение определяется хромосферой и короной. Расчёты Шкловского, однако, дают значительно меньший поток, нежели экспериментально наблюдаемый, даже если принять, что в этот интервал попадает монохроматическое излучение Ne VIII с $\lambda = 768/776$ Å.

*) По новым данным Вайслера¹⁰, коэффициент поглощения молекулярного кислорода вблизи $\lambda \sim 1300$ Å меньше 10 см^{-1} . Лайман отмечает, что в этой области спектра воздух при нормальном давлении пропускает радиацию ещё при толщине слоя в несколько сантиметров²⁶.

Следует, однако, отметить, что авторами рассмотренных работ не учтена одна весьма возможная причина существенных погрешностей экспериментальных результатов. Дело в том, что как фосфоры, так и счётчики, использованные для регистрации излучения, имеют со стороны длинных волн не резко ограниченную чувствительность, а лишь тот или иной спад чувствительности. Поток же излучения Солнца, рассматриваемого как чёрное тело, возрастает в сторону длинных волн чрезвычайно быстро. Поэтому не исключено, что фосфоры и счётчики регистрировали не только излучение в ожидаемом коротковолновом интервале спектра, но и значительно более длинноволновое излучение.

Для иллюстрации сказанного, на рис. 19 приведены: S_λ — спектральная чувствительность фосфора по данным рис. 9, экстраполяция этой кривой от 1400 до 2400 Å изображена пунктиром; I_λ — распределение энергии в излучении чёрного тела при $T = 4800^\circ$ (излучение при $\lambda = 4600$ Å принято за 1); $S_\lambda I_\lambda$ — произведение обеих кривых. Как видно из этого рисунка, если экстраполяция кривой чувствительности фосфора верна, энергия, регистрируемая фосфором в области длин волн $\lambda > 1400$ Å, одного порядка с энергией, регистрируемой в области $\lambda < 1400$ Å. К этому ещё надо прибавить, что так как излучение в области 1500—2500 Å проникает значительно глубже области $\lambda < 1400$ Å, то эффективное время экспозиции этой более длинноволновой области спектра значительно больше, нежели

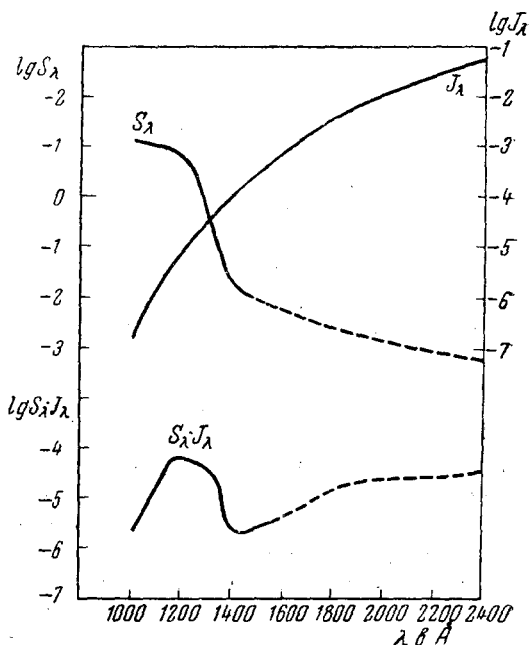


Рис. 19. S_λ — спектральная чувствительность фосфора по данным рис. 9; пунктиром изображена экстраполированная часть кривой. I_λ — распределение энергии в спектре чёрного тела при $T = 4800^\circ$ (излучение для $\lambda = 4600$ Å принято за 1). $E_\lambda = S_\lambda I_\lambda$ — энергия, регистрируемая фосфором в различных длинах волн.

Как видно из этого рисунка, если экстраполяция кривой чувствительности фосфора верна, энергия, регистрируемая фосфором в области длин волн $\lambda > 1400$ Å, одного порядка с энергией, регистрируемой в области $\lambda < 1400$ Å. К этому ещё надо прибавить, что так как излучение в области 1500—2500 Å проникает значительно глубже области $\lambda < 1400$ Å, то эффективное время экспозиции этой более длинноволновой области спектра значительно больше, нежели

коротковолновой. Аналогичный «хвост» чувствительности имеют, судя по рис. 12, и счётчики, причём, как указывалось выше, длинноволновая граница имеет тенденцию перемещаться в сторону длинных волн. Это положение дел заставляет с осторожностью отнестись к изложенным выше результатам как в отношении величины зарегистрированной энергии, так и в отношении глубины проникновения радиации различной длины волн. Возможно, что именно этим обстоятельством, в частности, объясняется расхождение результатов, приведённых в таблицах II и III, а также регистрация излучения счётчиками в области $\lambda \sim 1500 \text{ \AA}$, начиная с высоты ниже 50 км, и в области $\lambda \sim 1900 \text{ \AA}$, начиная с высоты 7 км.

Несомненно, что значительно более полные и надёжные результаты могут быть получены при использовании спектрального разложения излучения Солнца. Однако здесь возникают две серьёзные трудности. Первая из них заключается в необходимости устранения рассеянного света в приборе. В силу изложенного выше, рассеянный свет от длинноволновой части спектра должен быть сведён к величине $10^{-4} - 10^{-5}$ от падающего света, что представляется исключительно трудной задачей. Во-вторых, должна быть значительно повышена длительность экспозиции.

Недавно появилось¹⁵ подробное описание следящей системы, обеспечивающей направление оптической оси спектрографа на Солнце в двух измерениях при вращении и прецессии ракеты, что должно было сделать экспозицию достаточной для съёмки спектров до $\lambda \sim 500 \text{ \AA}$.

В статье указывается, что первый образец прибора был уничтожен при аварии ракеты и что ведётся изготовление упрощённого прибора. Однако дальнейших сообщений по этому вопросу ещё опубликовано не было.

В заключение — несколько слов о возможности земных наблюдений. Несомненно, что повседневные наблюдения ультрафиолетового излучения Солнца на стационарной установке имели бы исключительно большую ценность. Как уже указывалось во введении, единственной областью спектра, где такие измерения в настоящее время мыслимы, является область вблизи $\lambda \sim 2100 \text{ \AA}$. Хотя эта область спектра и не даёт возможности наблюдать наиболее сейчас интересное излучение короны и хромосферы, систематические наблюдения ультрафиолетового излучения фотосферы, несомненно, были бы также полезны. Вопрос о возможности наблюдений с небольших высот в «окне» вблизи $2100 \text{ \AA}$ неоднократно дискутировался¹¹. Было и несколько экспериментальных попыток таких наблюдений. Так, в сообщении Мейера, Шейна и Штолля²⁷ указывалось на наблюдение положительного эффекта при работе на высоте 3500 м (седловина Юнгфрау) с использованием монохроматора и счётчиков фотонов. Положи-

тельный эффект наблюдал и Молер²⁸. Кипенхейер сначала не получил положительного результата при использовании двойного монохроматора, затем, один раз, обнаружил следы эффекта и, наконец, при работе с одинарным монохроматором получил, по его мнению, несомненный эффект²⁹. Мейер, Штолль и Мюллер³⁰ отрицают существование эффекта в результатах Кипенхейера, в то же время считают наличие эффекта в своих опытах установленным надёжно. В части этих исследований делались контрольные опыты по исключению влияния более длинноволновой радиации, однако эти опыты не вполне убедительны, и весьма вероятно, что наблюдаемый эффект был вызван именно этой радиацией. Регенер³¹ (при тщательной фильтрации длинноволнового излучения) на высоте 25 км (шары-зонды) излучения вблизи $\lambda \approx 2100 \text{ \AA}$ не обнаружил. Регенер, однако, работал со спектральным разложением и фотографической регистрацией, т. е. с чувствительностью, значительно меньшей, чем в работе Фридмана, Лихтмана и Байрама. Если результаты этой работы для $\lambda = 2100 \text{ \AA}$ не искажены длинноволновой радиацией, то использование конденсорной системы позволило бы измерять эту радиацию на высоте 3—4 км.

Автор приносит свою благодарность А. Б. Северному и И. С. Шкловскому за ценные советы и замечания при составлении настоящего обзора.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. М. Вальдмайер, Результаты и проблемы исследования Солнца, ИЛ, Москва, 1950.
2. С. Moore, A. King, Pub. ASP **55**, 36 (1943); H. Babcock, A. King, Pub. ASP **55**, 111 (1943).
3. И. С. Шкловский, Известия Крымской астрофизической обсерватории **4**, 80 (1949).
4. Götz, Strahlentherapie **40**, 630 (1931).
5. Fabry et Buisson, Gerlands Beitr. **24**, 1 (1929).
6. C. Moore, A. Multiplet Table of Astrophysical Interest, Princeton, New Jersey (1945).
7. I. Hopfield, Astrophys. J. **104**, 208 (1946).
8. Э. Р. Мустель и А. Б. Северный, ДАН **80**, 867 (1951).
9. E. Warburg, Berliner Sitz. Ber. **230** (1915); W. Heilpern, Helv. Phys. Acta **19**, 245 (1946).
10. G. Weisslerg and P. O., Phys. Rev. **83**, 888 (1951).
11. E. Meyer, Helv. Phys. Acta **14**, 625 (1941); E. Vassy, Rev. d'Optique **15**, 81 (1936).
12. W. Baum, F. Johnson, J. Oberly, C. Rockwood, C. Strain and R. Tousey, Phys. Rev. **70**, 781 (1946).
13. E. Durand, J. Oberly and R. Tousey, Phys. Rev. **71**, 827 (1947).
14. E. Durand, J. Oberly and R. Tousey, Astrophys. J. **109**, 1 (1949).
15. H. Clark, Electronics, октябрь 1950, стр. 71.
16. J. Hopfield and H. Clearman, Phys. Rev. **73**, 877 (1948).

17. R. Tousey, K. Watanabe and J. Purcell, *Phys. Rev.* **83**, 792 (1951).
 18. K. Watanabe, *Phys. Rev.* **83**, 785 (1951).
 19. H. Friedman, S. Lichtmann and E. Byram, *Phys. Rev.* **83**, 1025 (1951).
 20. A. Compton and S. Allison, *X-Rays in Theory and Experiment*, N. Y., 1947.
 21. Best, Durand and Havens, *Phys. Rev.* **70**, 985 (1946).
 22. F. Hoyle, *Some Recent Research in Solar Physics*, Cambridge, Massachusetts, 1949.
 23. W. Preston, *Phys. Rev.* **57**, 887 (1940).
 24. R. Ladenburg and C. Van Voorhis, *Phys. Rev.* **43**, 315 (1933).
 25. T. Burnigt, *Phys. Rev.* **76**, 165 (1949).
 26. T. Laymann, *Phys. Rev.* **48**, 149 (1935).
 27. E. Meyer, M. Schein, B. Stoll, *Nature* **134**, 535 (1934); *Helv. Phys. Acta* **7**, 670 (1934).
 28. O. Mohler, *Astronom. J.* **46**, 33 (1937).
 29. K. Kiepenheuer, *Naturwiss.* **26**, 678 (1933).
 30. E. Meyer, B. Stoll und Müller, *Helv. Phys. Acta* **12**, 415 (1939).
 31. V. Regener, *Naturwiss.* **26**, 141 (1938).
-