

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 12.

### УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ НОЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

*Б. А. Хренов, Г. К. Гарипов, В. И. Тулупов*  
([khrenov@eas.sinp.msu.ru](mailto:khrenov@eas.sinp.msu.ru))

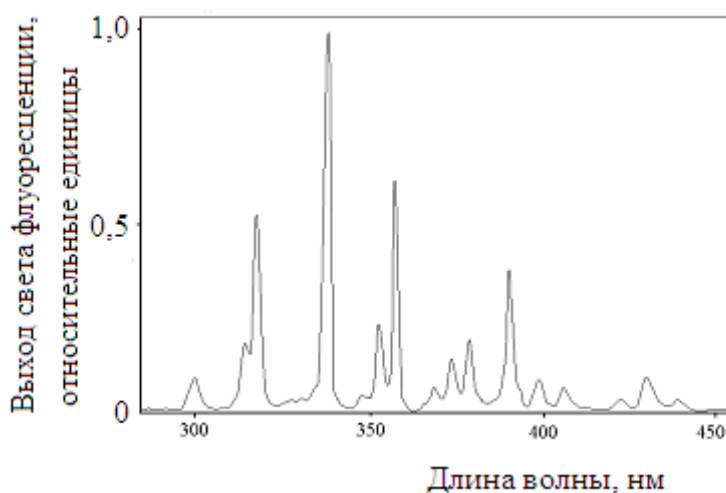
Цель задачи – знакомство с методикой измерений ультрафиолетового излучения (УФ) с помощью специального прибора, установленного на ИСЗ. Изучаются следующие физические эффекты: флуоресценция атмосферы, рассеяние света в атмосфере, обратный поток УФ из атмосферы. Задача основана на данных ИСЗ «*Университетский-Татьяна*». Она относится к курсам общей физики (“Оптика” и “Атомная физика”), а также к спецкурсам по физике плазмы, астрофизике и геофизике. Может использоваться также для факультативных занятий учащихся старших классов средней школы.

#### Введение

Кроме детекторов частиц, на ИСЗ «*Университетский-Татьяна*» установлен также детектор «ближнего», примыкающего к диапазону видимого света, УФ излучения (в диапазоне длин волн 300÷400 нм) – ДУФ. Этот прибор имеет узкую диаграмму направленности и «смотрит» вертикально вниз (на Землю). На дневной стороне прибор регистрирует рассеянный свет Солнца, на ночной – Луны и звёзд.

Кроме того, на ночной стороне наш прибор регистрирует излучение молекул и атомов атмосферы, возбуждённое энергичными заряженными частицами (флуоресценция). Наблюдая флуоресценцию атмосферы в УФ диапазоне длин волн можно получить сведения о потоках быстрых заряженных частиц (в основном – электронов) в околоземном космическом пространстве. В спектре флуоресценции проявляются характерные линии. Для примера, на рис. 1 показан спектр из-

лучения молекул азота  $N_2^+$ , основного источника флуоресцентного света на высотах менее 100 км.



*Рис. 1. Спектр флуоресценции атмосферы, вызываемый прохождением через неё быстрых заряженных частиц*

Отдельные частицы вызывают очень слабую флуоресценцию атмосферы, и регистрация этого излучения на орбите нашего спутника (на расстоянии 1000 км от источника излучения) возможна только тогда, когда поток заряженных частиц, проходящих через атмосферу в поле зрения прибора, достаточно велик. Такому условию удовлетворяет явление полярных сияний (см. задачу 2.9).

Свечение атмосферы в рассматриваемом диапазоне электромагнитных волн вызывается также грозowymi электрическими разрядами в атмосфере – молниями, которые сопровождаются огромными потоками быстрых электронов. Наблюдение грозowych облаков с высоты 1000 км имеет свои особенности: в этих условиях хорошо видны разряды между верхними облаками.

В последние годы особый интерес вызвали новые типы разрядов – между грозowymi облаками и ионосферой, наблюдение которых сверху особенно благоприятно. В отличие от полярных сияний, интенсивность которых изменяется с характерными временами от

нескольких минут до нескольких часов, электрический разряд даёт быструю ( $1 \div 100$  мс) вспышку УФ. По длительности УФ вспышки можно идентифицировать тип наблюдаемого электрического разряда.

Массивные тела (метеоры), влетающие в атмосферу Земли со скоростями более 10 км/с, также могут создать УФ вспышку достаточной интенсивности. Ожидаемая длительность таких вспышек составляет  $\sim 0.1 \div 1$  с.

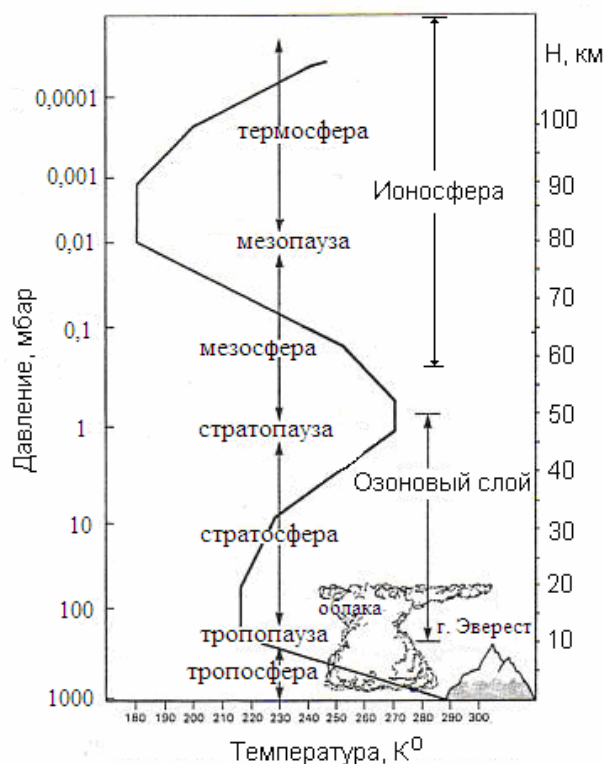
Перечисленные выше сигналы от интересующих нас источников УФ обладают столь малой интенсивностью, что их наблюдение возможно только на ночной стороне Земли. Их регистрация происходит на фоне рассеянного света звезд и Луны [2]. Этот фон определяет энергетический порог ожидаемых физических явлений. Поэтому прежде чем начать изучение явлений, представляющих интерес для физики ближнего космоса, необходимо изучить фон УФ в ночной атмосфере. Отметим, что этот фон представляет самостоятельный интерес, характеризуя состояние атмосферы, а контроль состояния атмосферы – важнейшая экологическая задача.

## **Строение атмосферы**

Состав атмосферы довольно стабилен до высот  $\sim 150$  км: это смесь азота (78%) и кислорода (21%) с небольшими примесями других газов (прежде всего, аргона, составляющего  $\sim 1\%$ ), паров воды и частиц пыли (аэрозоли). Полная толщина вещества атмосферы составляет  $1000 \text{ г/см}^2$  (давление на уровне моря 1000 мбар). С ростом высоты плотность атмосферы экспоненциально уменьшается. Принято разбивать атмосферу на несколько областей с характерными особенностями. На рис. 2 представлена структура атмосферы (зависимость давления и температуры атмосферы от высоты).

В тропосфере ( $H < 8 \div 9$  км) сосредоточена примерно половина масса атмосферы, включая пары воды и большинство аэрозолей, свя-

занных с выветриванием почвы и человеческой деятельностью. Температура тропосферы быстро падает с высотой. Поглощение электромагнитного излучения, особенно в диапазоне УФ, в тропосфере сравнительно сильное.



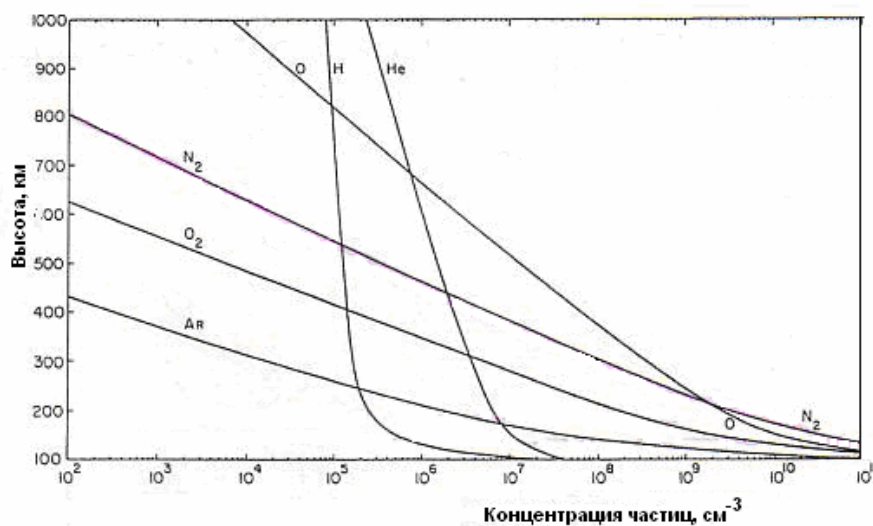
**Рис. 2.** Строение атмосферы

В стратосфере ( $H = 10 \div 45$  км) давление на 1÷2 порядка ниже, чем в тропосфере, что позволяет использовать её для полётов высокоскоростных самолетов. Важную роль в поглощении УФ с  $\lambda < 300$  нм в стратосфере играет озон (молекулы кислорода  $O_3$ ). Благодаря поглощению солнечного УФ молекулами озона температура стратосферы повышается с высотой. Отметим, что УФ с  $\lambda = 300 \div 400$  нм слабо поглощается в стратосфере (количественные данные см. ниже).

Выше стратосферы располагаются мезосфера и термосфера. В этих слоях присутствуют ионы, возникающих под действием УФ излучения Солнца, но доля ионов составляет здесь малую часть ( $\sim 10^{-5}$ ) неионизированных молекул.

В области термосферы ( $H = 80 \div 200$  км) и экзосферы ( $H > 200$  км) происходит существенное изменение состава атмосферы (см. рис. 3): на  $H = 200 \div 700$  км доминирует атомарный кислород, на  $H = 700 \div 850$  км – гелий и на  $H > 850$  км – гелий и водород.

Изучение верхней атмосферы – важный раздел солнечно-земной физики. Поток УФ и рентгеновского излучения, а также потоки заряженных солнечных частиц, поглощаемые верхней атмосферой, приводят к её нагреванию и ионизации, что сопровождается кардинальными изменениями молекулярного и ионного состава этой области.



**Рис. 3.** Состав атмосферы на  $H > 100$  км

Свойства верхней атмосферы и ионосферы имеют важное практическое значение:

- на высотах  $200 \div 400$  км происходит достаточно сильное торможение КА и знание свойств атмосферы позволяет предсказать сроки их существования на орбите (см. задачу 2.10);
- ионосфера обеспечивает отражение радиоволн и позволяет осуществлять дальний приём радиосигналов;
- возмущения ионосферы на геомагнитных широтах  $\lambda > 65^\circ$  (ионосферные бури) под действием потоков СКЛ во время солнеч-

ных вспышек и частиц, высыпаящихся из РП и КТ во время магнитных бурь (см. раздел 1.1), приводят к сильным радиопомехам;

–большие потоки УФ и рентгеновского излучения во время солнечных вспышек разогревают верхнюю атмосферу, что приводит к увеличению её плотности на орбите КА выше допустимых значений и к непредусмотренному торможению КА; это может погубить КА (как в случае с американской станцией Skylab).

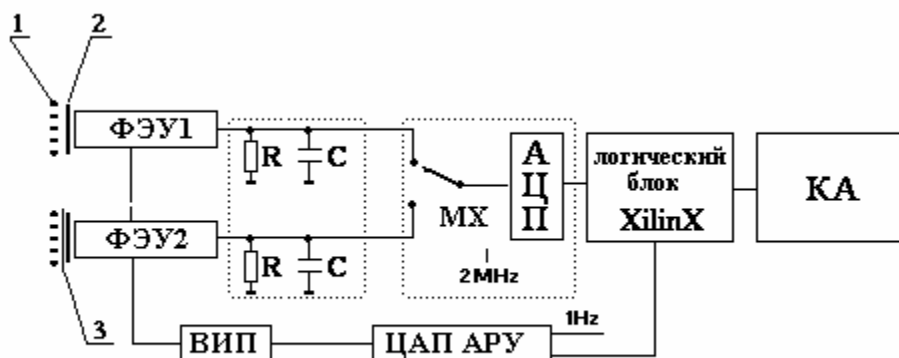
### **Устройство детектора ультрафиолетового излучения**

Детектором ультрафиолетового излучения на борту ИСЗ «*Университетский-Татьяна*» служит фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Благодаря высокой квантовой эффективности (числу фотоэлектронов на один фотон с заданной длиной волны), большому усилению при широком динамическом диапазоне и высокому быстродействию, ФЭУ имеет преимущество перед другими типами детекторов УФ. Выбран ФЭУ с мультищелочным катодом типа R1463 на увиолевом стекле, который стабильно работает в широком диапазоне температур и удовлетворяет требованиям космического эксперимента (о выборе типа ФЭУ см. [3]). Излучение с  $\lambda > 400$  нм обрезается фильтром УФС-1 (толщиной 2 мм) на входном окне ФЭУ. ФЭУ R1463 обладает высоким энергетическим разрешением и позволяет выделять сигнал даже от одного фотоэлектрона. Перед началом работы у каждого ФЭУ измеряется величина сигнала от одного фотоэлектрона как функция напряжения на делителе ФЭУ. Это позволяет переводить амплитуду сигнала в число фотонов с заданной длиной волны (с учётом квантовой эффективности катода).

Блок-схема детектора УФ излучения (ДУФ) показана на рис. 4. Коллиматор на входе основного ФЭУ, выполненный в виде набора отверстий диаметром 0.5 мм в пластине толщиной 2 мм, ограничивает

поле зрения углом  $\Psi = 14^\circ$ , что соответствует телесному углу обзора  $\Omega = 0.05$  стер. Ось поля зрения направлена на Землю (в надир). Эффективная площадь фотокатода  $S = 0.4 \text{ см}^2$  и, следовательно, геометрический фактор прибора  $S\Omega = 0.02 \text{ см}^2$  стер.

Следует отметить важную роль второго, закрытого от света ФЭУ, полностью идентичного первому и расположенного параллельно ему. Второй ФЭУ регистрирует фон, связанный с прохождением заряженных космических частиц через стекло ФЭУ; эти частицы генерируют черенковское излучение и вызывают флуоресценцию стекла. Поток заряженных частиц сильно меняется вдоль траектории ИСЗ, и такой фон может стать существенным дополнением к фоновому свечению атмосферы. Реальный световой фон есть разность показаний первого и второго ФЭУ.



**Рис. 4.** Блок-схема детектора ультрафиолетового излучения. 1 – многоканальный коллиматор, 2 – ультрафиолетовый фильтр типа УФС-1, 3 – светозащитный экран, МХ – аналоговый мультиплексор, ВИП – высоковольтный источник питания ФЭУ, КА – борт космического аппарата

Сигналы с ФЭУ поступают на два входа четырехканального аналогового мультиплексора и далее – на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), динамический диапазон которого составляет  $\sim 10^3$ . Тактовая частота мультиплексора равна 2 МГц, а время интегрирования может изменяться, в зависимости от решаемой задачи, от 30 мкс до 64 мс. Цифровой код с АЦП поступает в логический блок, содер-

жащий программируемые элементы, на которых организована система отбора событий, и в оперативную память. Там же находится система управления работой детектора и система связи с бортовым компьютером. Два других входа используются для служебной информации, контроля высокого напряжения и предельного тока ФЭУ.

Коэффициент усиления ФЭУ определяется высоким напряжением на его делителях, которое управляется сигналом, отвечающим средней величине (за 1 с) анодного тока открытого ФЭУ: при повышении среднего уровня освещённости напряжение на ФЭУ и его усиление автоматически снижаются. При этом в каждый 1-секундный интервал средний анодный ток ФЭУ привязан к середине диапазона АЦП. Благодаря такому режиму работы, достигается расширение динамического диапазона до  $\sim 10^6$  и прибор может измерять интенсивность УФ от минимального уровня на ночной стороне Земли в безлунные ночи ( $\sim 2 \div 5 \cdot 10^7$  фотонов/см<sup>2</sup> с стер) до максимальных значений интенсивности УФ на дневном участке витка ( $\sim 10^{14}$  фотонов/см<sup>2</sup> с·стер). В районе терминатора, когда интенсивность УФ быстро изменяется, такая система дает сбой, но в нашей задаче этот район не представляет особого интереса. Поскольку для обоих ФЭУ напряжение одинаково, контрольный ФЭУ имеет усиление, достаточное для регистрации сигнала от частиц, только в безлунные ночи.

Интенсивность УФ излучения определяется по записи кода  $M$ , задающего коэффициент усиления ФЭУ, и кода  $N$ , поступающего с выхода АЦП. Зависимость коэффициента усиления  $G$  от кода  $M$  измерена экспериментально при калибровке ФЭУ и может быть аппроксимирована выражением:

$$G(M) = 3 \cdot 10^6 (M / 255)^{6.45}, \quad (1)$$

где  $3 \cdot 10^6$  – максимальный коэффициент усиления и 6.45 – наклон вольт-амперной логарифмической характеристики ФЭУ.

Число фотоэлектронов  $n_q$ , зарегистрированных за время  $\tau$  интегрирования  $RC$ -цепочки (30 мкс), в зависимости от значений кодов  $M$  и  $N$  определяется из следующего выражения:

$$n_q(N, M) = \frac{3 \cdot 10^{-3} N \cdot C}{1.6 \cdot 10^{-19} G(M)}, \quad (2)$$

где  $C$  – емкость анодной цепи ФЭУ (10 пФ),  $1.6 \cdot 10^{-19}$  – заряд электрона в Кулонах,  $3 \cdot 10^{-3}$  – шаг квантования по коду  $M$  в Вольтах.

Число фотонов, зарегистрированных за время  $\Delta t$ , определяется из следующего выражения:

$$i(M, N) = \frac{n_q(N, M)}{Q \tau} \Delta t, \quad (3)$$

где  $Q$  – квантовая эффективность фотокатода (0.19 для выбранных ФЭУ) и  $\tau$  – время интегрирования на аноде ФЭУ ( $\tau = RC = 30$  мкс).

Если число фотонов (3) разделить на геометрический фактор детектора  $S\Omega = 0.05$  стер, то для  $\Delta t = 1$  с получим интенсивность УФ излучения  $I_{\text{УФ}}(N, M)$ , регистрируемого прибором ДУФ:

$$I_{\text{УФ}} = 5 \cdot 10^7 \frac{N/128}{(M/255)^{6.45}} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}. \quad (4)$$

Электроника прибора позволяет регистрировать поток излучения в двух типах измерений. В первом типе измерений проводится мониторинг УФ фонового свечения атмосферы через каждые 4 секунды при времени интегрирования 64 мс. Во втором типе измерений запись показаний ФЭУ начинается по команде управляющей системы, отбирающей световые сигналы выше заданного порогового значения, и проводится с более высоким временным разрешением ( $< 1$  мс). Такой

тип измерений позволяет получить подробный временной профиль интересного события.

К сожалению, ограниченные возможности телеметрии не позволяют в полной мере использовать записи осциллограмм каждой вспышки УФ: на Землю передаются лишь данные о самой большой вспышке, зарегистрированной на одном витке спутника.

### **Научные задачи исследования УФ излучения**

**Задача 1.** Измерение интенсивности УФ вдоль трассы полета спутника (данные под шифром D3)

Эта задача решается путем измерения сигнала с временем интегрирования 64 мс через каждые 4 с полета (через каждые 30 км траектории спутника). Число фотоэлектронов на катоде ФЭУ за время одного измерения велико (даже при минимальных значениях фона это число  $\sim 10^4$ ) и статистические флуктуации в каждом измерении малы. Интегрирование сигнала по времени и полю зрения ДУФ приводит к сглаживанию эффектов возможного быстрого изменения фона.

**Задача 2.** Наблюдение УФ излучения полярных сияний (данные под шифром D3)

Эта задача решается аналогично задаче 1, и выбираются те периоды работы спутника, когда его траектория на ночной стороне Земли заходит в высокие геомагнитные широты. При этом для наблюдения слабого на общем фоне свечения полярных сияний надо, чтобы на ночной стороне не было Луны. Полярные сияния наблюдались на ИСЗ «*Университетский-Татьяна*» только в периоды самых длинных ночей (2 недели декабря-января для северного и 2 недели июня-июля для южного полушария).

**Задача 3.** Поиск вспышек УФ, связанных с электрическими разрядами в атмосфере (данные под шифром D1 и D2)

Такие вспышки ожидаются при быстрых разрядах в атмосфере, когда скорость распространения разряда достигает скорости света. За время 0.1 мс такой разряд проходит около 30 км. В экспериментах на ИСЗ «*Университетский-Татьяна*» новым шагом является возможность регистрировать временной профиль таких вспышек, искать корреляцию числа быстрых вспышек с географическими координатами Земли и районами гроз. Отбор быстрых вспышек УФ и регистрация их с помощью цифрового осциллографа помогает изучить интересное явление электрического «пробоя» промежутка между облаками и ионосферой, которое обнаружено в последнее десятилетие. Электроника детектора позволяет регистрировать осциллограммы вспышек в двух диапазонах длительности развертки: 4 и 64 мс. Шаг измерения интенсивности вспышки (деление осциллограммы) выбран равным  $1/256$  от длительности развертки. Время интегрирования при отборе вспышки равно 16 делениям на шкале осциллограммы.

**Задача 4.** Контроль измерения интенсивности УФ излучения по данным о флуктуациях сигнала в заданном интервале времени (данные под шифром D0)

Интенсивность УФ можно находить не только методом, использованным в задаче 1, но и по кратковременным контрольным измерениям временного профиля фона УФ на ночной стороне. Такие измерения проводятся с помощью осциллографа с длительностью развертки 256 мкс, шагом 1 мкс и временем интегрирования 30 мкс один раз на каждом витке спутника. По экспериментальному распределению числа фотоэлектронов на катоде ФЭУ (по среднему значению числа фотоэлектронов и его среднеквадратическому отклонению) можно получить коэффициент усиления ФЭУ и интенсивность УФ. В течение нескольких лет проведения эксперимента коэффициент усиления ФЭУ может измениться, и такая калибровка необходима. Для определения абсолютной калибровки интенсивности УФ необходимо прове-

рять и значение квантовой эффективности фотокатода ФЭУ. Сравнивая данные об интенсивности УФ излучения при полной Луне и принимая интенсивность рассеянного лунного света за эталон можно следить за изменением квантовой эффективности фотокатода.

**Задача 5.** Определение сигнала контрольного ФЭУ как функции потока заряженных частиц (данные под шифром D5)

Измерения сигнала контрольного (закрытого от света) ФЭУ проводятся с шагом 32 с и временем интегрирования 1 с (параллельно с работой основного ФЭУ). Потоки заряженных частиц на орбите ИСЗ «Университетский-Татьяна» находятся по данным соответствующих детекторов частиц (см. раздел 1.3), приведенным на сайте <http://cosmos.msu.ru> (в разделе “Данные”).

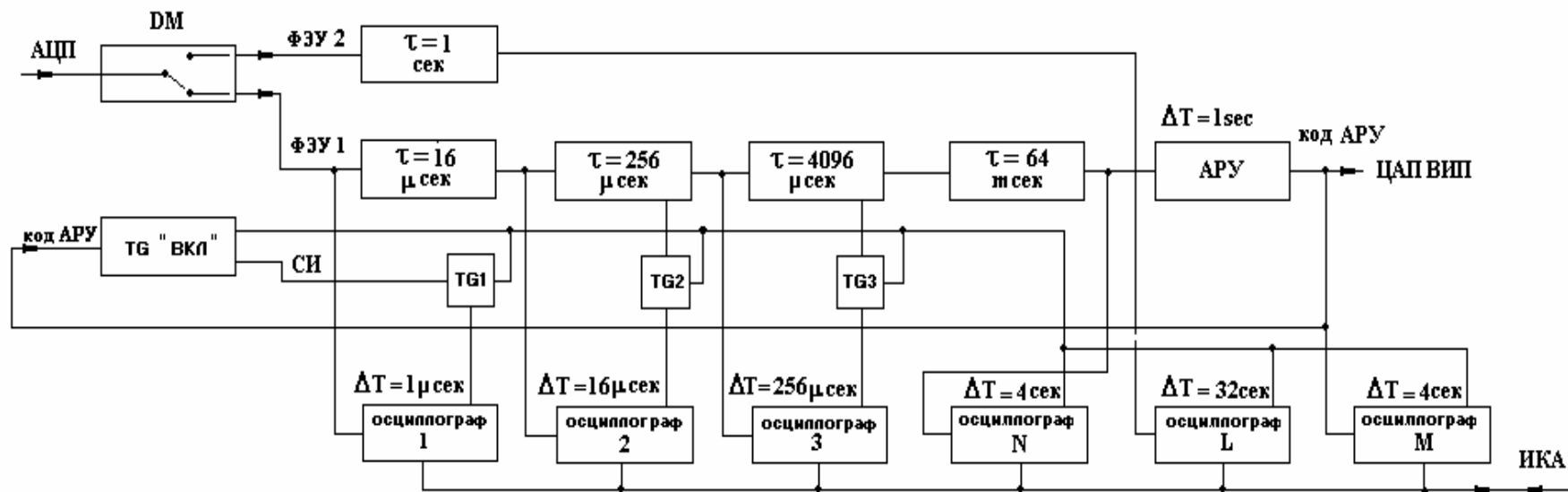
Блок-схема электроники прибора ДУФ, обеспечивающая выполнение перечисленных задач эксперимента, представлена на рис. 5.

Режим работы спутника (периоды работы научной аппаратуры и время съёма информации) задан так, что не все витки доступны для проведения измерений. Кроме того, часть времени спутник проводит в нештатных ситуациях (потеря ориентации). На <http://cosmos.msu.ru> приведены данные прибора ДУФ, полученные на тех витках, где научная аппаратура работала в штатном режиме.

**Интенсивность ультрафиолетового излучения вдоль трассы полета спутника в зависимости от фазы и высоты Луны**

Прежде, чем приступить к решению этой задачи, необходимо выяснить, как изменяется фаза Луны и на каких высотах над локальным горизонтом находится Луна в те дни, когда доступны измерения с прибором ДУФ. Этот анализ можно провести с помощью программы Orbitron, показывающей трассы спутника «Университетский-Татьяна», фазу и положение Луны на небе в момент пролёта спутника над заданной географической точкой в заданный момент времени.

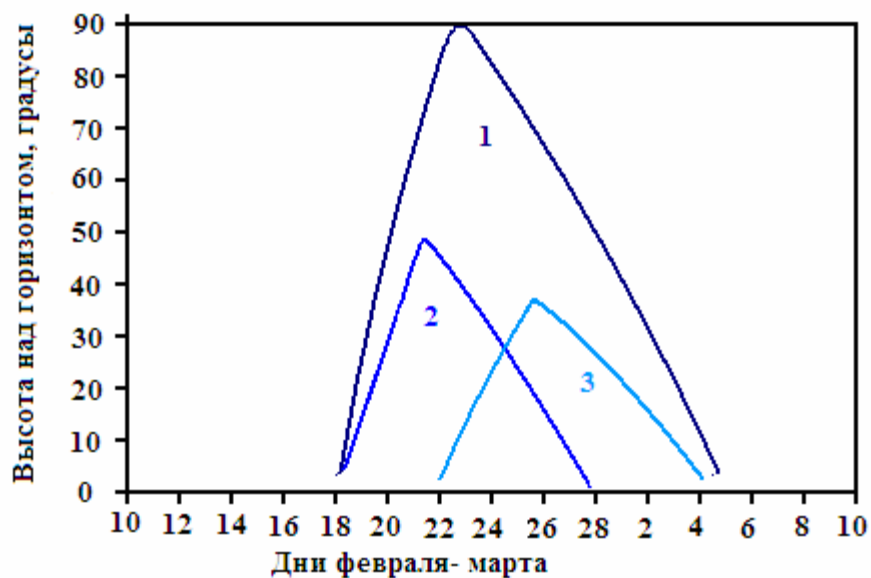




*Рис. 5. Блок-схема логического блока:  $\tau$  - цифровой интегратор сигнала, TG1–TG3 – логика обнаружения сигнала и запуска цифрового осциллографа, TG «ВКЛ» – логика включения системы регистрации, DM – демультиплексор, ИКА – интерфейс космического аппарата.*

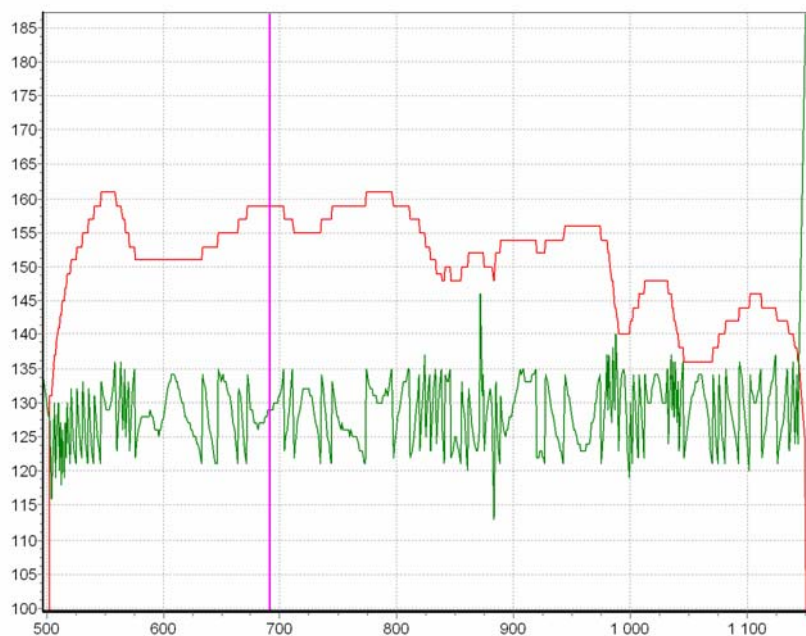
Начиная с марта 2005 г. научная аппаратура ИСЗ «*Университетский-Татьяна*» работает ежедневно с 3 до 6 часов утра московского времени (0–3 ч UT) За эти периоды центр управления полётом получает данные с трёх-четырёх витков спутника. В течение лунного месяца накапливаются данные об УФ на 42 витках для новолуния (Луна за горизонтом) и на 45 витках – для Луны с различной фазой и высотой над местным горизонтом. В апреле-мае и в октябре-ноябре спутник почти не выходит на теневую сторону Земли и прибор ДУФ не даёт полезной информации об УФ на ночной стороне.

Программа Orbitron позволяет найти высоты Луны по трассе полета спутника. Для примера, на рис. 6 представлены высоты Луны на входе и выходе ИСЗ на ночную сторону и максимальная высота Луны на витке в феврале 2005 г. Видно, что высота Луны над горизонтом превышает  $45^\circ$  лишь в течение 10 дней в месяц, что позволяет проанализировать зависимость интенсивности УФ от высоты Луны во всем диапазоне высот.

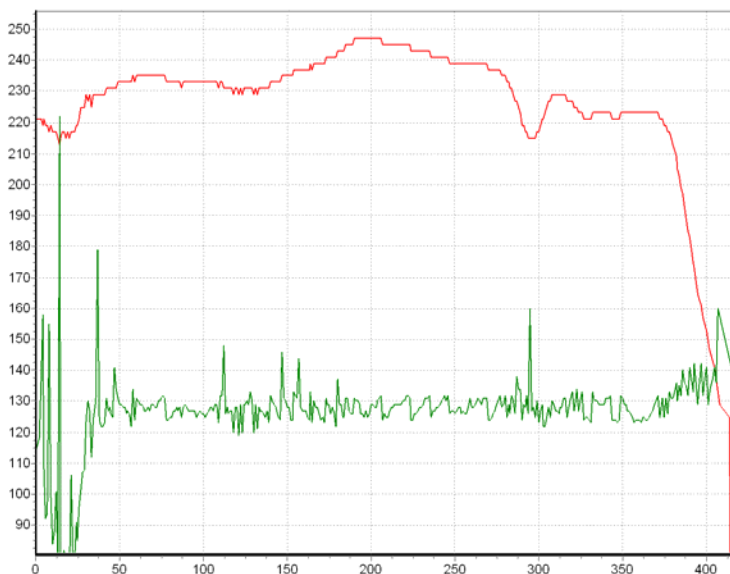


**Рис. 6.** Высота Луны на ночной части витков спутника «*Университетский-Татьяна*» в феврале-марте 2005 г. 1 – максимальная высота Луны, 2 – высота Луны в конце ночной части витка (Север), 3 – высота Луны в начале ночной части витка (Юг)

На рис. 7а и 7б показаны примеры данных прибора ДУФ (под шифром D3) на ночных участках витка ИСЗ. По оси абсцисс отложен номер измерения (с шагом 4 с), по оси ординат – коды  $M$  (верхняя гистограмма) и  $N$  (нижняя гистограмма).

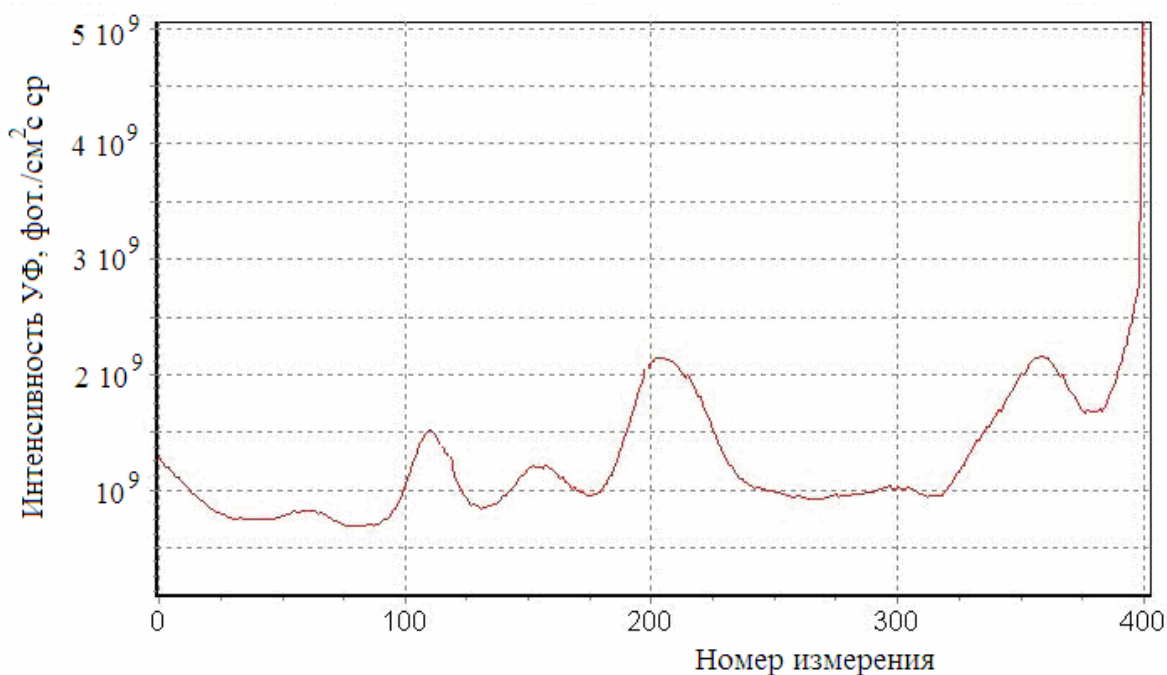


*Рис. 7а. Данные ДУФ на ночной стороне Земли 23 февраля 2005 г. (полнолуние)*

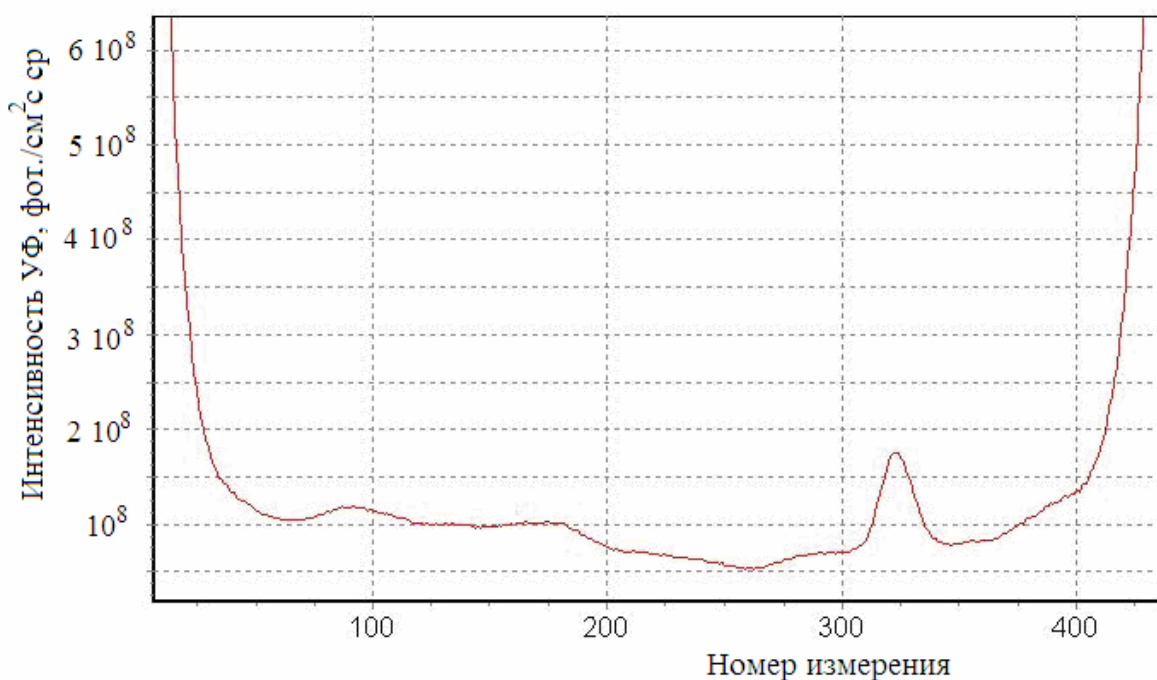


*Рис. 7б. Данные ДУФ на ночной стороне Земли (новолуние)*

По формулам (1-3) для каждого момента измерений переведем коды  $M$  и  $N$  в интенсивность УФ и получим результаты, представленные на рис. 8а и 8б (они соответствуют рис. 7а и 7б). На этих рисунках по оси абсцисс отложены номера измерений (с шагом 4 с), по оси ординат – интенсивность УФ в фотонах/см<sup>2</sup> с-стер.



**Рис. 8а.** Интенсивность УФ на трассе полета (полнолуние)

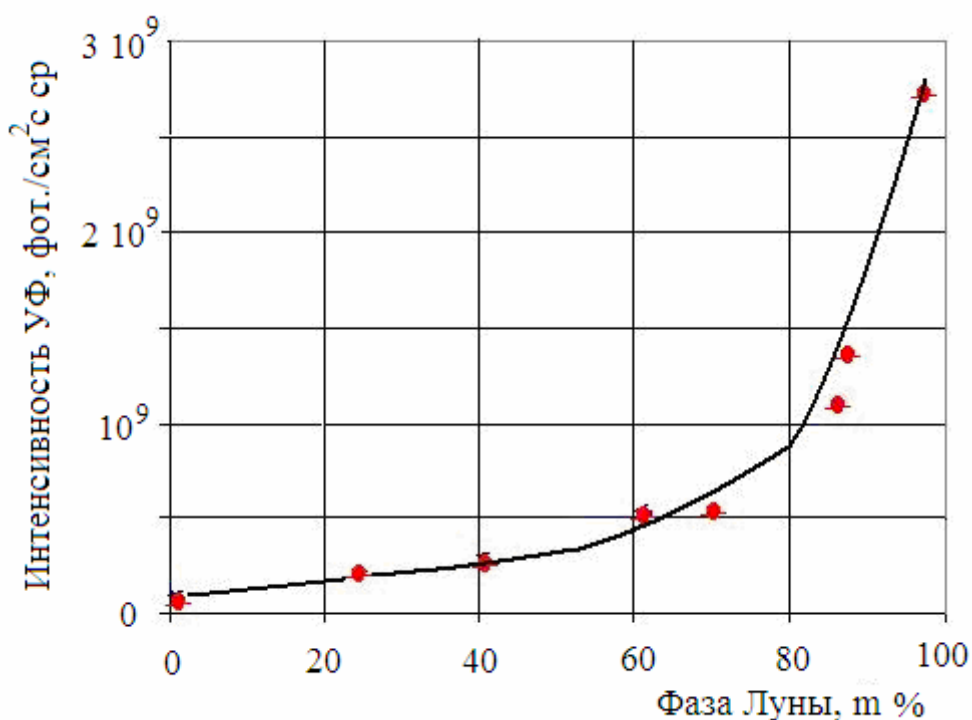


**Рис. 8б.** Интенсивность УФ на трассе полета (новолуние).

Из приведенных примеров видно, что в начале и в конце ночной части витка интенсивность УФ резко увеличивается, а на ночном участке она колеблется относительно некоторой средней величины. На рис. 8а средняя величина интенсивности УФ определяется Луной, а на рис. 8б – ночной атмосферой. Колебания интенсивности УФ связаны с изменением коэффициента рассеяния (альбедо) света Луны на облаках, на суше и на море.

В безлунную ночь на некоторых витках могут быть видны засветки от промышленных районов; так, пик в правой части рис. 8б связан с пролётом над Японией.

На рис. 9 приведена средняя интенсивность УФ на ночной стороне в зависимости от фазы Луны (по данным ИСЗ «Университетский-Татьяна» за февраль 2005 г.).



**Рис. 9.** Зависимость средней интенсивности УФ излучения от фазы Луны

Из этого рисунка видно, что средняя интенсивность УФ на витке не прямо пропорциональна фазе Луны. Это связано с тем, что при заданной фазе Луны интенсивность УФ зависит от угловой высоты

Луны над горизонтом  $\delta = 90^\circ - \theta$  ( $\theta$  – зенитный угол Луны) и от календарного дня наблюдения. Для заданной высоты Луны в районе наблюдения интенсивность УФ должна быть пропорциональна площади освещённой части Луны. При достаточно больших фазах Луны зависимость интенсивности УФ от высоты Луны можно качественно наблюдать на отдельных витках. Во время полнолуния она хорошо видна в диапазоне угловых высот  $\delta \sim 45 \div 90^\circ$ .

Для нахождения зависимости интенсивности УФ излучения от высоты Луны над горизонтом рассмотрим простую модель рассеяния света Луны в атмосфере Земли. В этой модели учитывается только рэлеевское молекулярное рассеяние (рассеяние света на аэрозолях атмосферы не учитывается) и полагается, что спектр излучения Луны идентичен спектру излучения Солнца и может быть описан формулой Планка для излучения чёрного тела (не учитываются фраунгоферовские линии поглощения в области волн с длиной 280 и 393÷397 нм).

Полный поток энергии солнечного света на орбите Земли равен  $0.13 \text{ Вт/см}^2$ . Поток энергии света полной Луны на орбите Земли равен  $0.32 \text{ мкВт/см}^2$  (меньше солнечного в  $4 \cdot 10^5$  раз). В этом потоке на интервал ближнего УФ ( $\lambda = 300 \div 400 \text{ нм}$ ) приходится лишь 9% энергии: поток лунного света с  $\lambda = 300 \div 400 \text{ нм}$   $F_n(\lambda) = 5 \cdot 10^{10}$  фотонов/см<sup>2</sup> с.

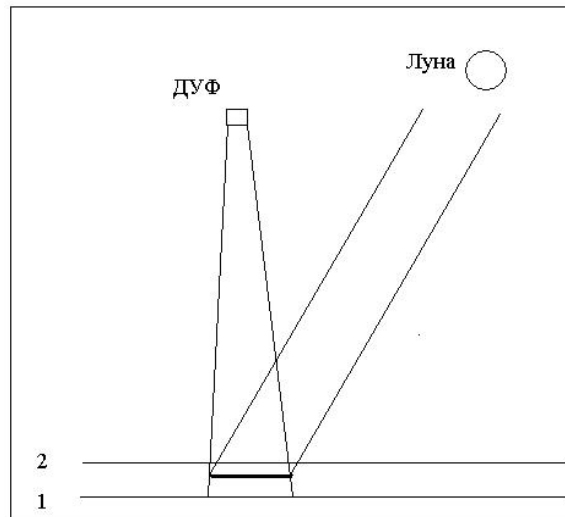
На рис. 10 представлена схема приёма рассеянного света Луны прибором ДУФ. Площадь сечения потока фотонов от Луны на участок атмосферы, обозреваемый прибором ДУФ, уменьшается с уменьшением высоты Луны над горизонтом как  $\cos\theta$ . Согласно закону Рэля, на пути от границы атмосферы (уровень 2) к поверхности Земли (уровень 1) в слое  $dX$  свет рассеивается на угол  $\theta$  с вероятностью  $(1 + \cos^2\theta) dX/X_R(\lambda)$  и на пути к ДУФ он затухает как  $\exp[-X/X_R(\lambda)]$ .

Интегрируя этот свет по  $X$  от 0 до  $X_0$  ( $X_0$  – глубина атмосферы, открытая для наблюдения из космоса), находим интенсивность излу-

чения с длиной волны  $\lambda$ , рассеянного вертикально вверх (в направлении ДУФ):

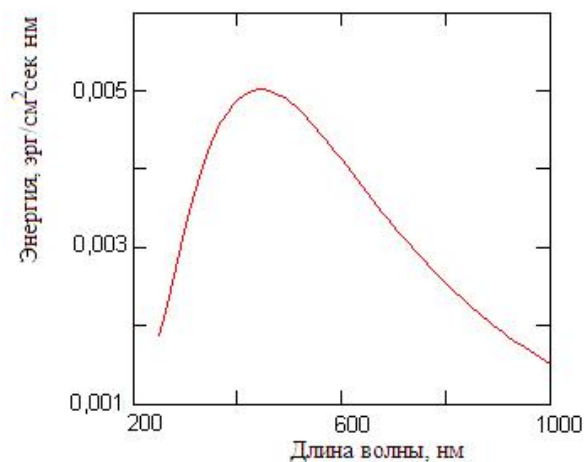
$$I_{\text{руф}}(\lambda, X_0) = F_n(\lambda) \frac{(1 + \cos^2 \theta) \cos \theta}{5.13\pi(1 + \cos \theta)} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{X_0(1 + \cos \theta)}{X_R(\lambda) \cos \theta}\right) \right], \quad (5)$$

где  $X_R(\lambda) = 2974 (\lambda(\text{нм})/400)^4 \text{ г/см}^2$  и  $X_0 = 1000 \text{ г/см}^2$  (для безоблачного района).

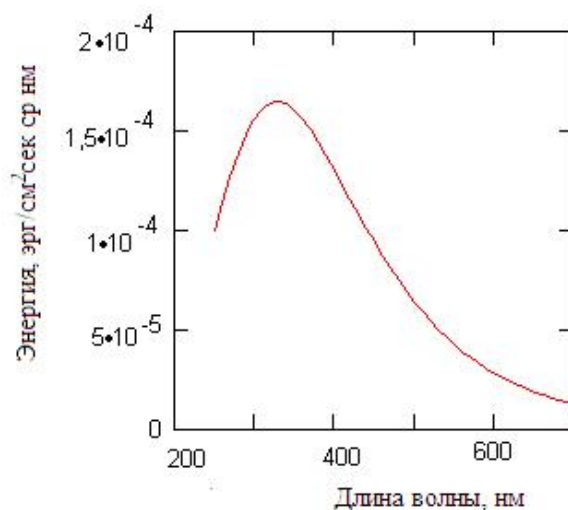


**Рис. 10.** Иллюстрация к схеме расчета рассеянного света Луны

На рис. 11а приведен спектр солнечного излучения, отраженного Луной, а на рис. 11б – расчётный спектр лунного света, рассеянного в атмосфере Земли.



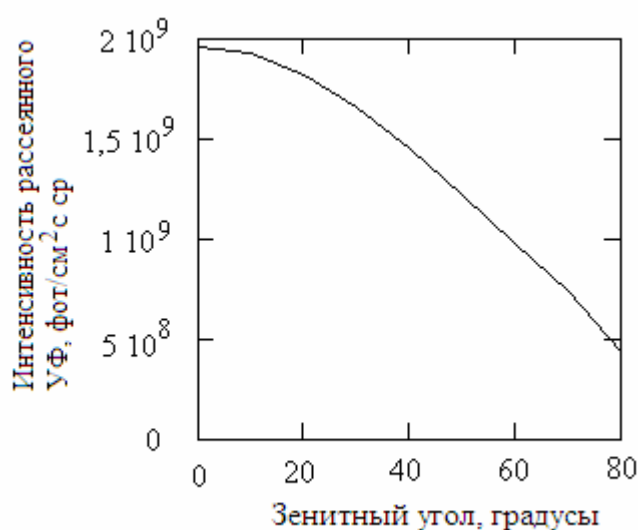
**Рис. 11а.** Спектр солнечного света, отраженного Луной (модель чёрного тела)



**Рис 11б.** Расчётный спектр рассеянного лунного света для  $\theta = 90^\circ$   
( $\delta = 0$ )

Из этих рисунков видно, что спектр рассеянного света значительно отличается от исходного: он обогащается УФ и максимум распределения по  $\lambda$  смещается в диапазон 300÷400 нм.

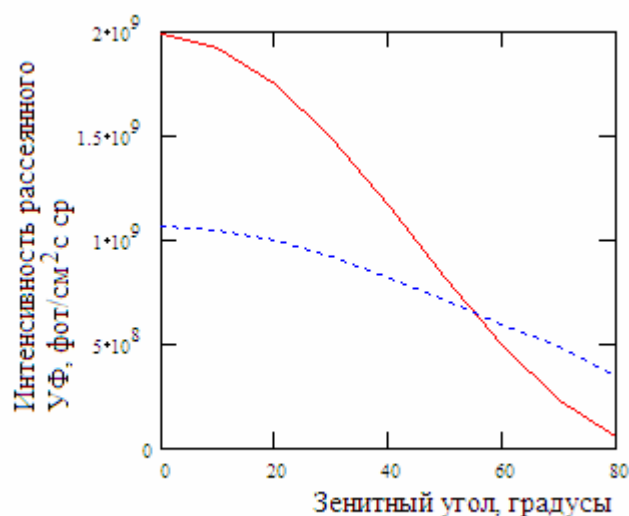
Интегрируя формулу (5) по  $\lambda$  в диапазоне 300÷400 нм, получаем интенсивность рассеянного УФ при различных фазах Луны (она пропорциональна площади Луны, освещенной Солнцем) и при разной угловой высоте Луны над горизонтом. Зависимость интенсивности УФ от зенитного угла Луны (для полной Луны) показана на рис. 12а.



**Рис. 12а.** Интенсивность УФ, рассеянного атмосферой Земли вверх как функция зенитного угла Луны в полнолуние

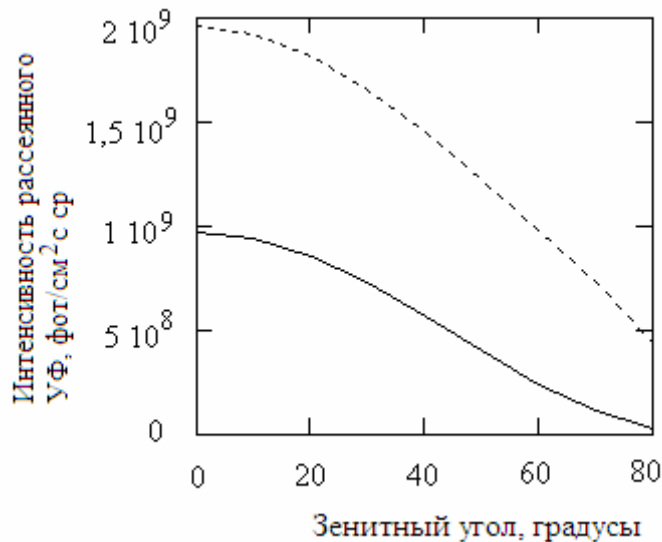
Свет Луны рассеивается также на поверхности облаков и на поверхности Земли. Рассеяние на поверхности принято характеризовать «спектральным коэффициентом альбедо»  $K(\lambda)$ , который равен интенсивности рассеянного света по отношению к интенсивности падающего пучка. Для различных поверхностей коэффициент  $K(\lambda)$  разный.

На рис. 12б приводится зависимость от зенитного угла Луны интенсивности УФ с  $\lambda = 300\div 400$  нм, рассеянного полной Луной на облаках ( $K = 0.6$ ) и в атмосфере до облаков ( $X_0 = 400$  г/см<sup>2</sup>). Видно, что интенсивность УФ, рассеянного на облаках, может быть больше интенсивности УФ, рассеянного атмосферой над облаками. В районе с облачным покровом суммарная интенсивность рассеянного УФ может в два раза превышать интенсивность УФ, рассеянного в безоблачном районе.



**Рис. 12б.** Зависимость от зенитного угла Луны интенсивности УФ, рассеянного на облаках (сплошная кривая) и в атмосфере до облаков (пунктирная кривая)

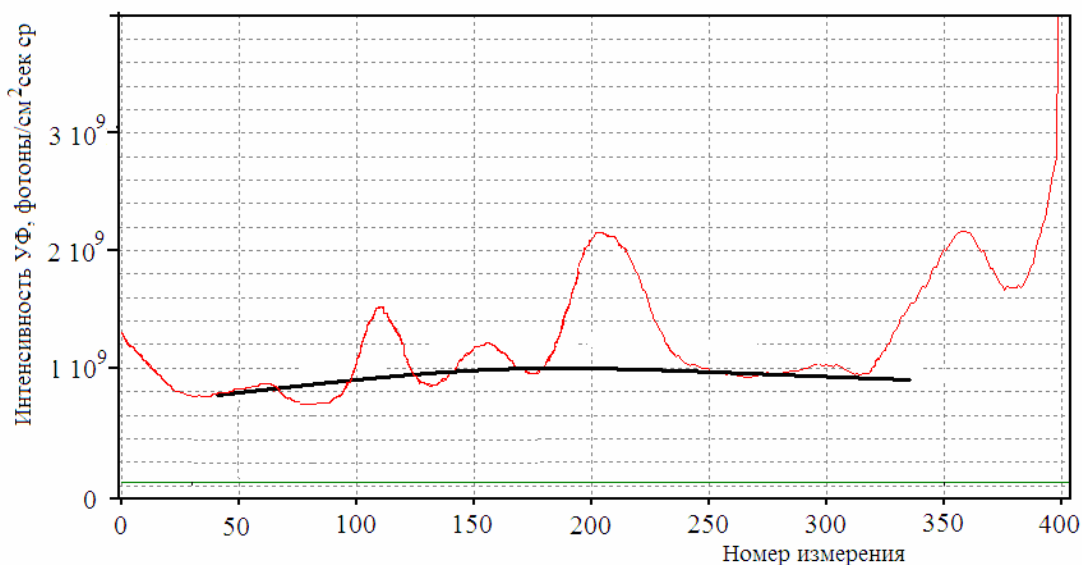
В безоблачном районе интенсивность УФ, рассеянного поверхностью Земли, меньше интенсивности УФ, рассеянного в атмосфере (рис. 12в), так как коэффициент альбедо поверхности Земли ( $K \sim 0.1\div 0.3$ ) значительно меньше альбедо облаков, и поглощение света на пути от поверхности Земли к детектору больше.



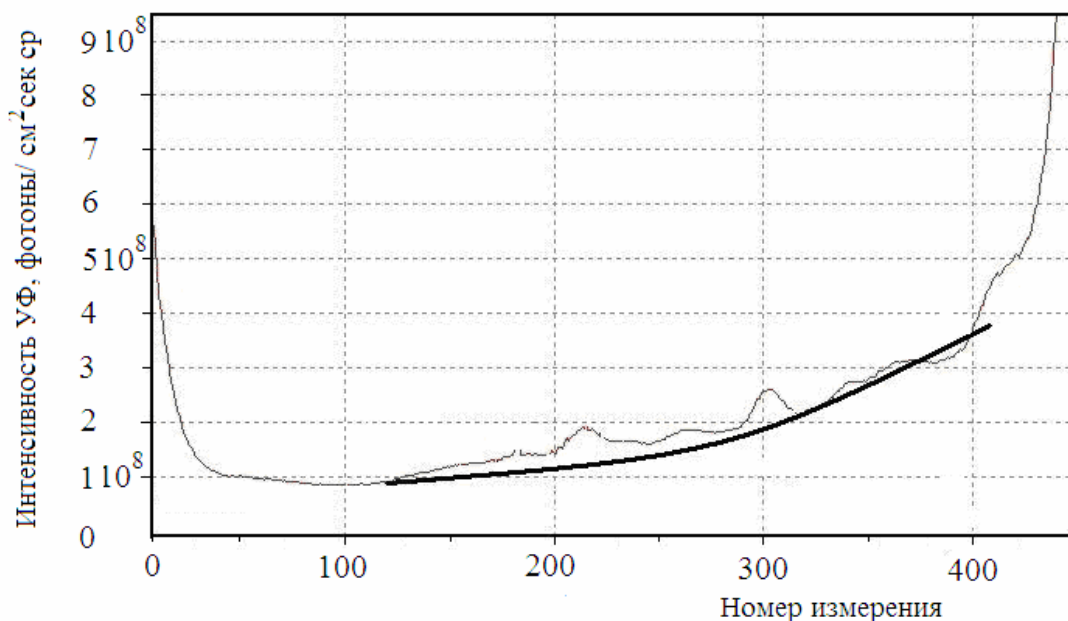
**Рис. 12в.** Зависимость от зенитного угла Луны интенсивности УФ, рассеянного поверхностью Земли (сплошная кривая) и в атмосфере (пунктирная кривая)

В безлунные ночи остаётся фон УФ от свечения ночной атмосферы, зодиакального света и рассеянного света звёзд. Предыдущие измерения на ИСЗ (например, на ИСЗ «Космос-45» в 1966 г.) и данные наземных измерений показали, что фон УФ излучения в безлунные ночи в 50÷100 раз ниже интенсивности рассеянного света полной Луны. Спектр излучения звёзд близок к спектру Солнца, и вне атмосферы его можно считать изотропным. Измерения потока УФ в межзвездном пространстве с  $\lambda = 300\div 400$  нм дают значения  $\sim 10^8$  фотонов/см<sup>2</sup> с [4]. Используя формулу (5) и интегрируя первичный изотропный поток фотонов по зенитным углам, получаем ожидаемую интенсивность рассеянного в атмосфере межзвездного УФ  $\sim 10^7$  фотонов/см<sup>2</sup> с стер. Ожидаемая интенсивность УФ от зодиакального света того же порядка. Измерения с помощью ДУФ на спутнике «Университетский-Татьяна», в согласии с предыдущими экспериментами дают значения интенсивности УФ в безлунные ночи  $\sim 5 \cdot 10^7 \div 10^8$  фотонов/см<sup>2</sup> с стер. Таким образом, в безлунные ночи основной вклад в УФ излучение вносит собственное свечение атмосферы.

Примеры сравнения ожидаемой зависимости интенсивности УФ от высоты Луны приведены на рис. 13а и 13б.



**Рис. 13а.** Интенсивность УФ на трассе полёта в период полнолуния. Толстой линией проведена ожидаемая (расчётная) зависимость рассеянного в атмосфере УФ от высоты Луны. Реальная интенсивность отличается от расчётной за счет рассеяния на облаках



**Рис. 13б.** Интенсивность УФ на трассе полёта в сравнении с ожидаемой интенсивности УФ (толстая линия) в зависимости от высоты Луны. Фаза Луны: четверть

Прежде чем приступать к выполнению заданий данной задачи, кроме данного описания необходимо ознакомиться с рекомендованной литературой, и в первую очередь – с курсом [1].

### Задание

1. Используя данные под шифром D3, с помощью программы Orbitron построить временной ход интенсивности УФ на различных витках ИСЗ «Университетский-Татьяна» и при различных фазах Луны (см. <http://www.cosmos.msu.ru>).
2. Для выбранных фаз Луны вычислить ожидаемую теоретическую зависимость интенсивности УФ от высоты Луны над горизонтом и сравнить её с экспериментальной. Обычно удаётся проследить эту зависимость только качественно, т.к. большую роль играет изменение коэффициента альбедо лунного света на облаках.
3. Выбрать витки спутника, соответствующие разным фазам Луны (от 0.1 до 0.9), и построить зависимость средней интенсивности УФ на ночной стороне Земли от фазы Луны. При этом следует исключить интервалы высокой интенсивности УФ в начале и конце витка, связанные с выходом на дневную сторону. Следует также помнить, что средняя высота Луны на витке изменяется вместе с её фазой.
4. В новолуние найти витки ИСЗ «Университетский-Татьяна», которые проходят над промышленными центрами, и оценить мощность излучения УФ такими центрами (например, мощность излучения УФ в районе г. Хьюстон, США, составляет  $\sim 1$  МВт).
5. Найти на Земле районы, в которых интенсивность УФ в новолуние минимальна.

*Авторы задачи благодарят студента физического факультета МГУ П. Климова за разработку ряда математических программ,*

*облегчивших использование цифровых данных детектора ДУФ, студента А. Саломона за выполнение первого анализа данных прибора ДУФ и аспирантку В. Шевелеву за проведение первых занятий со студентами.*

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Мультимедийный курс лекций на CD «Жизнь Земли в атмосфере Солнца». 2005.
2. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности. Под ред. К. Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеиздат. 1969.
3. *Гарипов Г. К., Хренов Б. А., Лубсандоржиев Б. К. Белянченко С. А., Смолицкий В. А., Salazar H., Fokitis E.* ФЭУ в фотоприемнике орбитального детектора флуоресцентного излучения ШАЛ // Приборы и техника эксперимента. №1. С. 108–111. 2005.
4. *Аллен К. У.* Астрофизические величины. М.: Иностранная лит. 1960.