

**ИЗМЕРЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНОЙ
УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ РАДИАЦИИ СОЛНЦА**

Канд. физ.- мат. наук А.И. Иванов
О.А. Зырянова
Л.М. Каримова
В.Н. Коровченко

Обосновывается необходимость мониторинга спектрального состава биологически активной ультрафиолетовой радиации в спектральной области 290-320 нм. Анализируются экспериментальные сложности измерения ультрафиолетовой спектральной энергетической освещенности на поверхности Земли и пути их решения. Описывается конструкция реально действующего спектрорадиометра и методика измерений. Приводятся первые результаты.

Ультрафиолетовая (УФ) радиация Солнца, контролируемая атмосферным озоном, чрезвычайно активна в биологическом отношении. В процессе эволюции животный и растительный мир адаптировался к определенному уровню УФ - радиации на поверхности Земли. Однако в результате антропогенного воздействия озоновый слой постепенно разрушается. Это может привести к экологической катастрофе. Достаточно упомянуть не только биологические эффекты (нарушение структуры молекул ДНК, влияние на иммунную систему и т.п.), но и изменение теплового режима стратосферы с дальнейшими климатическими последствиями.

Уровень ультрафиолетовой освещенности (УФО) в довольно широких спектральных участках измерялся на протяжении многих лет. Однако, как сравнительно недавно было установлено биологами, реакция живых организмов и растений сильно зависит от спектрального состава УФ- радиации. Таким образом, наибольший интерес представляют измерения УФО в абсолютных энергетических единицах с хорошим разрешением по спектру (не хуже 1 нм). Из-за их сложности подобные систематические измерения проводятся лишь в США, где создана целая широтная сеть станций мониторинга УФО от Антарктики до Аляски. Измерения УФО сложны по целому ряду причин. Среди основных следует указать следующие. Во-первых, из-за сильного поглощения озоном приходящая УФ- радиация имеет коротковолновую границу около 290 нм. Интенсивность УФ- радиации в приграничной области ничтожна. Отсюда вытекает требование очень высокой чувствительности прибора. Во-вторых, основным элементом прибора является рассеиватель, который должен быть, с од-

ной стороны, ламбертовским, а с другой, - достаточно прозрачным для УФ- радиации. Сочетать эти свойства практически невозможно. Поэтому конструкция рассеивателя и используемые материалы являются предметом прецизионной фотометрии. В- третьих, при измерениях в УФ- области спектра близ коротковолновой границы особую опасность представляет рассеянный свет. Здесь интенсивность приходящего излучения на много порядков меньше интенсивности в более длинноволновой области, и сигнал от рассеянного света может существенно превысить полезный. Существует ряд способов устранения или снижения интенсивности рассеянного света. Среди них - двойная или тройная монохроматизация (двойные, тройные монохроматоры); предварительное (до монохроматора) выделение УФ-диапазона с помощью светофильтров; использование солнечно-слепых фотоумножителей с максимальной чувствительностью в УФ-области. В-четвертых, абсолютные измерения освещенности предполагают особые требования к стабильности разных параметров измерительного прибора и его предварительную калибровку по эталонным фотометрическим стандартам.

Ниже описывается конструкция уже созданного спектро радиометра. Особое внимание обращено на перечисленные выше требования.

Устройство и принцип действия спектро радиометра. В основе спектро радиометра использован монохроматор МУМ с вогнутой дифракционной решеткой, которая позволяет свести до минимума количество элементов оптической схемы. Обратная линейная дисперсия монохроматора (3-4 нм/мм) позволяет проводить измерения со спектральным разрешением, удовлетворяющим как измерениям спектральной освещенности, так и общего содержания озона.

Принципиальная схема спектро радиометра приведена на рис. 1.

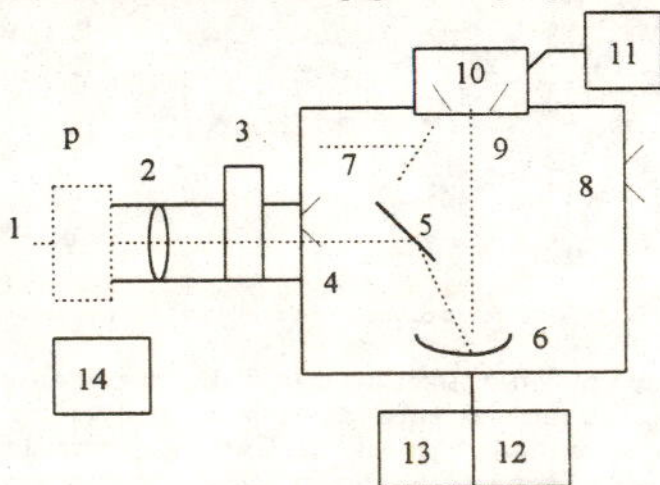


Рис. 1. Принципиальная схема спектро радиометра

Рассмотрим принцип действия прибора, следуя ходу солнечного луча. При измерениях УФО входная труба 1 прибора (с рассеивателем "р") приводится в вертикальное положение. Кварцевая линза 2 собирает лучи рассеянного света с нижнего торца светорассеивающего цилиндра на входной щели монохроматора 4. В блоке 3 размещен: затвор, срабатывающий автоматически по заданной программе; абсорбционный светофильтр, пропускающий только солнечный ультрафиолет; ослабители. С помощью плоского зеркала 5 световой пучок направляется на вогнутую дифракционную решетку 6, где раскладывается по длинам волн и фокусируется на выходной щели 9. Предусмотрена возможность вывода пучка на другую выходную щель 8, для чего используется плоское зеркало 7. После выходной щели 9 свет попадает на фотокатод фотоэлектронного умножителя 10, сигнал от которого обрабатывается системой управления и регистрации 11. Ее описание будет приведено ниже. Сканирование спектра осуществляется поворотом дифракционной решетки с помощью шагового двигателя 12. Для автоматического слежения за Солнцем используется полярная установка 13 с часовым механизмом. Для того, чтобы исключить возможную временную зависимость чувствительности прибора к измеряемой радиации, используется источник постоянной яркости 14, который насаживается на входную трубу.

На рис.2 приведена блок-схема системы регистрации и управления.

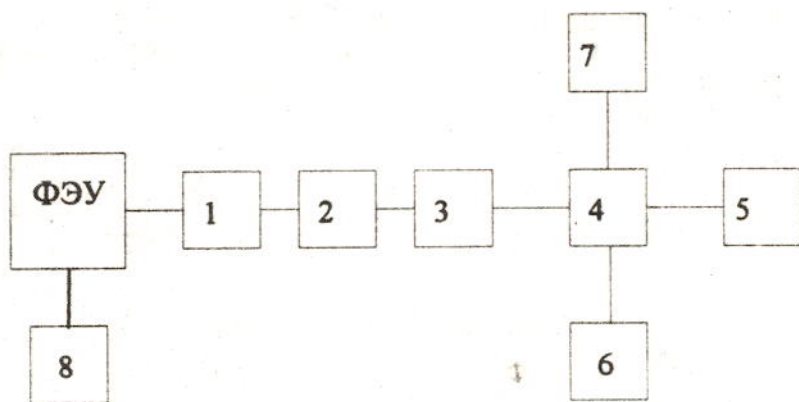


Рис.2. Блок-схема системы регистрации и управления

Фотоэлектронный умножитель ФЭУ-103 работает в режиме счета фотонов. Его питание высоким напряжением осуществляется от блока 8 с программным управлением. Импульс фототока поступает в предусилитель 1, который усиливает сигнал и формирует прямоугольный импульс. Прямоугольные импульсы разной амплитуды поступают в усилитель-дискриминатор 2, где импульсы усиливаются и, одновременно, ограничиваются по амплитуде. Окно дискриминации

задается программным путем. Использовалась дискриминация только по минимальным амплитудам, чтобы обрезать шум, связанный с отрывом электронов с динодов ФЭУ. Блок 3 представляет счетчик импульсов (10 МГц), на котором так же программным путем можно задавать разное время накопления. Контролер 4 осуществляет связь ПК ДВК-3 (5) с периферийными устройствами, в частности, блоком управления шаговым двигателем 6 и блоком управления затвором 7.

Все блоки 2-8 являются элементами системы КАМАК.

Косинусный рассеиватель. Принято описывать приходящую на земную поверхность УФ-радиацию Солнца величиной освещенности горизонтально расположенной площадки рассеивателя. Обычно экспериментально измеряется величина, пропорциональная яркости рассеивателя в каком-нибудь направлении (для отраженного или пропущенного света). Если яркость не зависит от направления, то она будет пропорциональна освещенности вне зависимости от способа освещения. Такие рассеиватели называют ламбертовскими или косинусными. Проверить косинусность рассеивателя можно, освещая его под различными углами точечным источником. Тогда, поскольку освещенность будет изменяться пропорционально косинусу угла падения светового пучка, измеряемая яркость также должна изменяться по закону косинуса. Как правило, закон косинуса выполняется только в диапазоне малых углов падения. Поэтому разрабатываются специальные конструкции рассеивателей.

Сконструированный рассеиватель выполнен в виде насадки на входную трубу спектрорадиометра. Его основная часть представляет светорассеивающий цилиндр [3]. Верхний торец и боковая стенка цилиндра изготовлены из тефлона, а нижний торец — из специального оптического пластика. В процессе измерений ось цилиндра ориентирована в вертикальном направлении. Прибором фиксируется яркость нижнего торца в направлении, нормальном к торцу. Рассмотрим принцип действия рассеивателя. Представим, что он освещается под разными углами точечным источником, например Солнцем, с постоянной силой света. Верхний торец цилиндра пропускает свет таким образом, что его яркость со стороны прибора непостоянна в разных направлениях (индикатрисный эффект). Она больше в направлении падающего светового пучка. Таким образом, при увеличении угла падения света от точечного источника на верхний торец, его яркость будет уменьшаться не только из-за уменьшения освещенности торца (по закону косинуса), но и вследствие описанного индикатрисного эффекта. Рассмотренный эффект свойственен в большей или меньшей мере любой плоской рассеивающей пластинке. Чтобы его компенсировать, нужно ликвидировать нарастающий дефицит света, падающего в регистрирующий прибор при увеличении угла падения. Для этого используется часть боковой стенки цилиндра. Когда угол падения светового пучка на торец цилиндра увеличивается и

уменьшается освещенность торца, угол падения на боковую стенку будет уменьшаться, а ее освещенность, наоборот, увеличиваться. Таким образом в светорассеивающий цилиндр будет попадать дополнительное количество света. Нижний торец цилиндра интегрирует свет, пропущенный верхним торцом и боковой стенкой. Однако при достаточно больших углах падения боковая стенка начинает добавлять избыточное количество света. Чтобы его ограничить, используется цилиндрический экран так, что при угле падения 90° он полностью экранирует боковую стенку. Описанный рассеиватель был исследован на косинусность. Полученная косинусность рассеивателя сохраняется вплоть до угла падения $i \approx 85^\circ$, что отвечает лучшим образцам, описанным в литературе.

Учет рассеянного света. Чтобы избавиться от рассеянного света за счет видимого диапазона спектра, использовался ультрафиолетовый светофильтр УФС-6, устанавливаемый на входе монохроматора. Однако такой прием не устраняет возможности попадания рассеянного света от соседних спектральных участков. Для исследования его уровня и дальнейшего учета проведен следующий эксперимент. Известно, что оптическая система монохроматора строит изображение входной щели в плоскости выходной. Если закрыть экранами, например, половину входной щели и соответствующую половину выходной, то через оставшуюся свободную часть выходной щели будет проходить только рассеянный свет. Получена спектральная зависимость отсчетов прибора от рассеянного света в исследуемом диапазоне спектра 290-320 нм. Соответствующая кривая нормировалась по среднему из отсчетов в диапазоне 286,8-290,0 нм, где полезный сигнал заведомо отсутствует. Учет рассеянного света производится теперь следующим образом. Перед каждым измерением, когда прибор находится в рабочем исходном состоянии (щели не заэкранированы, введены необходимые ослабители и т. п.), находится среднее значение из отсчетов в области 286,8-290,0 нм. Далее для каждой длины волны он умножается на соответствующее (данной длине волны) значение нормированной кривой и вычитается из суммарного отсчета (полезный сигнал + рассеянный свет). Естественно, вся эта процедура является частью программы и выполняется ПК.

Калибровка прибора для измерений УФО в энергетических единицах. Кратко опишем основные моменты калибровки прибора по Солнцу для измерения УФО в энергетических единицах. Смысл состоит в том, чтобы соотнести отсчеты прибора в той или иной длине волны соответствующим значениям энергетической освещенности рассеивателя. Поскольку существует временная изменчивость чувствительности прибора к измеряемой радиации, все отсчеты прибора, пропорциональные освещенности, делились на отсчет от стандартной лампы постоянной яркости.

Тогда

$$K_{\lambda} \frac{n_{\lambda}}{n_n} = E_{\lambda}, \quad (1)$$

где K_{λ} - калибровочный коэффициент в длине волны λ ; n_{λ} - отсчет прибора, пропорциональный освещенности E_{λ} ; n_n - отсчет прибора от стандартной лампы; E_{λ} - спектральная энергетическая освещенность горизонтальной площадки на поверхности Земли.

Чтобы найти коэффициенты K_{λ} , измеряется освещенность площадки прямыми солнечными лучами E'_{λ} (площадка ориентирована перпендикулярно к лучам и расположена на поверхности Земли). В этом случае закон Бугера будет выглядеть следующим образом:

$$E'_{\lambda} = E_{0\lambda} e^{-\tau_{\sigma} m_{\oplus}}, \quad (2)$$

где $E_{0\lambda}$ - спектральная солнечная постоянная; τ_{σ} - оптическая толщина экстинкции; m_{\oplus} - атмосферная масса в направлении Солнца.

С учетом (1) уравнение (2) можно переписать в следующем виде:

$$K_{\lambda} \frac{n'_{\lambda}}{n_n} = E_{0\lambda} e^{-\tau_{\sigma} m_{\oplus}}. \quad (3)$$

Выражение (3) использовалось для нахождения коэффициентов K_{λ} . В этом выражении $\frac{n'_{\lambda}}{n_n}$ - измеряется; m_{\oplus} - рассчитывается; $E_{0\lambda}$ - находится из литературных источников.

Что касается τ_{σ} , то она находится с помощью долгого метода Бугера (Ленгли), согласно которому

$$\lg\left(\frac{n'_{\lambda}}{n_n}\right) = (\lg E_{0\lambda} - \lg K_{\lambda}) - (\tau_{\sigma} \lg e) m_{\oplus}. \quad (4)$$

Это уравнение прямой, где $(\tau_{\sigma} \lg e)$ - тангенс угла наклона. Постоянство величины τ_{σ} в течение измерений контролировалось путем частых замеров (на других приборах) ее слагаемых (аэрозольной и поглощение озоном). В конечном итоге по формуле (3) рассчитывались мгновенные значения E'_{λ} и, далее, искомые коэффициенты K_{λ} . Остановимся более подробно на величине $E_{0\lambda}$. Она измерялась мно-

гие десятилетия как с поверхности Земли, так и с ракет, баллонов и космических аппаратов. При этом использовалась спектральная аппаратура с различным разрешением. Корректное использование литературных данных требует их обязательной редукции на спектральное разрешение данного спектрального прибора. Иными словами, величины E'_λ и $E_{0\lambda}$ из (3) должны быть получены с одним и тем же спектральным разрешением (измерены, в идеале, одним и тем же прибором). Таким образом, выбору литературного источника с экспериментальными данными о величинах $E_{0\lambda}$ должно предшествовать исследование так называемой аппаратной функции спектрального прибора [1]. Для измерения аппаратной функции в качестве квазимонохроматического излучения была выбрана линия ртути $\lambda = 2967,3 \text{ \AA}$. Полученная аппаратная функция имела вид гауссианы с шириной по основанию 20 \AA и полушириной (на уровне $0.5 I_{\max}$) 10 \AA .

Практически с такой же аппаратной функцией (полуширина 13 \AA) были получены значения спектральной освещенности в работе [2]. Они в дальнейшем использовались при расчете коэффициентов K_λ .

Упомянем также, что была проведена работа по редуцированию спектральных коэффициентов поглощения озонем и молекулярного рассеяния. Для их расчета использовалось следующее выражение:

$$Y_{\lambda'} = \int_{\lambda - \Delta\lambda}^{\lambda' + \Delta\lambda} \Pi(\lambda - \lambda') y(\lambda) d\lambda, \quad (5)$$

где $Y_{\lambda'}$ - соответствующий коэффициент; $\Pi(\lambda)$ - аппаратная функция; $y(\lambda)$ - спектральная зависимость соответствующего коэффициента, полученная с высоким спектральным разрешением; $\Delta\lambda$ - полуширина аппаратной функции.

Измерения УФО. С помощью описанного выше метода проведена калибровка спектрорадиометра и получен ряд результатов по ультрафиолетовой освещенности. На рис.3 приведен пример спектральной зависимости УФО в биологически активной области спектра УФ-Б (280-320 нм) для трех зенитных углов Солнца Z_\odot .

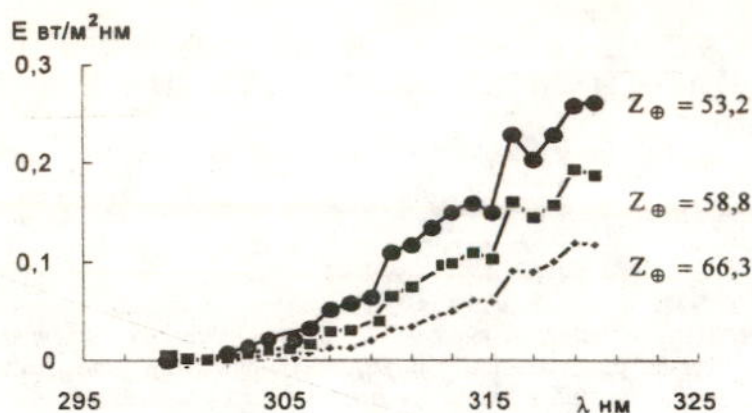


Рис. 3. Зависимость ультрафиолетовой освещенности в биологически активной области спектра для трех зенитных углов Солнца

Из полученных данных следует, что величины E существенно зависят от высоты Солнца, т.е. от оптического пути луча в атмосфере. Анализ других факторов (альbedo земного покрова, облачность, мутность атмосферы, общее содержание озона и т. п.) требует значительно-го статистического материала измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. - Л.: Машиностроение, 1970. - 271 с.
2. Ultraviolet solar irradiance measurements from 200 to 355 nm during spacelab 1 mission / Labs D., Neckel H., Simon P. C., Nhillier G. Solar Physics. - 107/2. - 1987. - P. 203 - 219.
3. UV-B Monitoring Workshop: A Review of the Science and Status of Measuring and Monitoring Programs / 10-12 March 1992, Washington, D.C. : Science and Policy Associates, Inc. The West Tower, Suite 400 - 1333 H Street, NW, Washington, D.C. - 324 p.

Алматинский Государственный
Университет имени Абая

КҮННИҢ УЛЬТРАКҮЛГІНДІ СӘУЛЕСІНІҢ БИОЛОГИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІЛІГІНІҢ ӨЗГЕРҮІ

Физ. мат. ғ. канд. А.И. Иванов
О.А. Зырянова
Л.М. Каримова
В.Н. Коровченко

290-320 нм спектр облысында ультракүлгін сәулесінің белсенділігінің спектр құрамын зерттеу қажеттігі дәлелденген. Жер бетін жарықталғандырудағы қаутты спектрлі ультракүлгінді өлшеу тәжірибесінің күрделілі және оны шешу жолдары талданды. Нақты қолданылатын спектрорадиометрдің құрылысы мен оның жұмыс істеу тәсілдері көрсетілді, алғашқы нәтижелері келтірілді.