

<https://doi.org/10.3176/phys.math.tech.1965.4.03>

ХЕРБЕРТ НИЙЛИСК

СПЕКТРОФОТОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПОТОКОВ ВНУТРИ ПОСЕВА

В статье описывается интегрирующий полевой спектрофотометр с интерференционными светофильтрами и полусферическим приемником радиации для измерения нисходящих и восходящих спектральных потоков внутри посева при пяти длинах волны.

Основная трудность измерения радиационных потоков внутри растительного покрова состоит в значительной неоднородности радиационного поля как в вертикальном, так и горизонтальном направлениях. Поэтому измерения в отдельных точках дают существенно различные результаты и трудно получить величины, характерные для всего посева. Здесь могут быть применены только статистические характеристики. Первой из таких характеристик является среднее значение потока радиации по некоторой поверхности или пути. Измерение среднего потока по поверхности требует применения приемников радиации с довольно большой приемной поверхностью, размеры которых больше характерных горизонтальных масштабов неоднородностей радиационного поля. Построение таких приемников связано с техническими трудностями. Легче построить аппарат для измерения среднего по пути. Описываемый прибор предусмотрен для измерения средних спектральных потоков по некоторому пути.

Интегрирующий полевой спектрофотометр для измерения радиационных потоков внутри посева состоит из следующих основных частей:

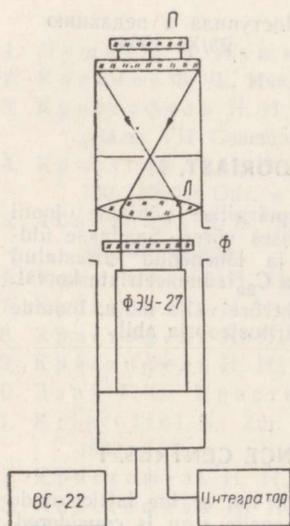
1) оптическая система спектрофотометра, 2) приспособление для передвижения и установки спектрофотометра внутри посева на разных уровнях и 3) регистрирующая часть. Построено два варианта прибора.

Первый имеет фотометрический шар для приема радиации от полусферы, описанной в [1], а второй — приставку из сдвоенного молочного стекла, описанную в [2]. Оптическая система обоих спектрофотометров следующая: фотометрический шар или приставка из молочного стекла П (рис. 1), коллимационная линза Л, интерференционный светофильтр Ф и фотоумножитель ФЭУ-27. Схема проста и не требует ни точных деталей, ни тонкой юстировки.

Угловые характеристики прибора с шаром и приставкой из сдвоенного молочного стекла в интервале спектра от 400 до 750 $m\mu$ приведены на рис. 2, где на горизонтальной оси дан угол падения z , а на вертикальной — относительное отклонение от закона косинуса $j(z)$ в процентах.

Рис. 1. Оптическая система спектрофотометра.

При применении приставки из сдвоенного молочного стекла нужно учитывать, что приемник с такой приставкой имеет некоторую чувствительность при углах падения от 90 до 100°. Это объяс-



няется отражением от верхнего стекла приставки. Такая «обратная чувствительность» не превышает 1—2%, но может дать некоторую ошибку при измерении отражений радиации, если высота Солнца 0—8° и прямая радиация падает на прибор. В таких случаях придется затенять прибор от прямой радиации.

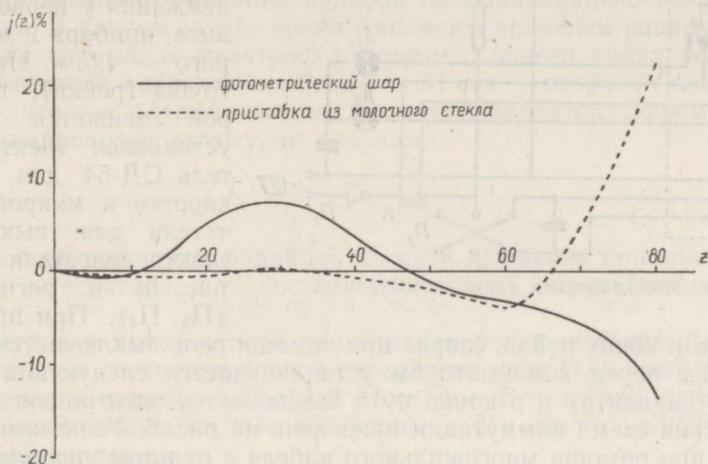


Рис. 2. Угловые характеристики приемников.

Конструктивно первый вариант прибора выполнен из кассеты с пятью интерференционными светофильтрами, автоматически заменяемыми после измерения одним из них. Внешний вид приемной части прибора показан на рис. 3. С целью уменьшения габаритов и веса прибора, что

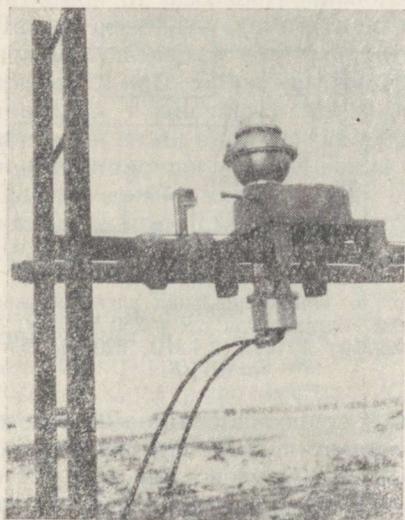


Рис. 3. Внешний вид первого варианта спектрофотометра.

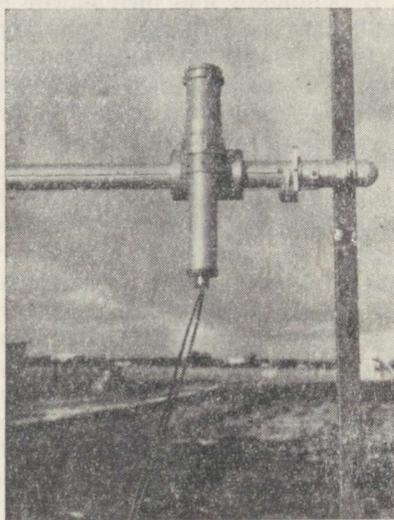


Рис. 4. Внешний вид второго варианта спектрофотометра.

весьма важно для измерений в посевах, второй вариант спектрофотометра построен с одним фильтром, который можно легко и быстро заменить вручную. Внешний вид второго варианта прибора показан на рис. 4.

Для получения среднего значения потока на некотором пути в посевах нужно передвигать спектрофотометр, измеряя поток на пути движения.

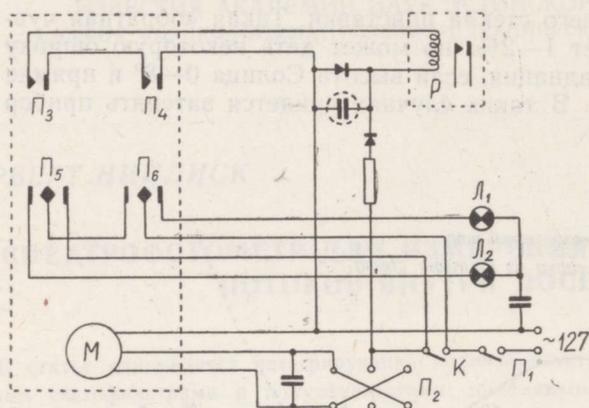


Рис. 5. Электрическая схема коммутации.

нии каретки к концу рейки, сперва при помощи реле выключается регистратор, затем перед коллиматором устанавливается следующий фильтр (у первого варианта) и в конце пути выключается электродвигатель М. Электрическая схема коммутации приведена на рис. 5. Узлы коммутации соединены при помощи многожильного кабеля с пультом управления, где находятся переключатели для реверсирования электродвигателя (П₂, К), выключатель сети (П₁) и сигнальные лампы (Л₁, Л₂), показывающие место расположения каретки со спектрофотометром.

Для установки спектрофотометра на разных высотах, а также для поворота приемной поверхности вниз или вверх имеются вертикальные шесты, забиваемые в землю.

В основном нас интересует не детальный ход потока радиации по пути движения спектрофотометра, а его среднее значение. Поэтому регистрирующая часть спектрофотометра выполнена в виде интегратора постоянного тока, который дает возможность сразу записать среднее значение потока, не зная его детального хода. Принципиальная электрическая схема интегратора, описанного в [3], дана на рис. 6. Интегратор построен на базе высокоомного электронного потенциометра ЭППВ-51, в схеме которого измерительные сопротивления заменены металлопленочным конденсатором С и последовательным сопротивлением R.

Интегратор работает следующим образом. Конденсатор заряжается током $I R_1/R$, где I входной ток. При равновесии потенциометра падение напряжения на входе электронного усилителя равно нулю, а напряжение между точками А и В равно и противоположно напряжению на конденсаторе. Следовательно, показание прибора n и запись на диаграммной ленте повторяет изменения напряжения на конденсаторе.

Изменение напряжения на конденсаторе равно

$$\frac{dU_C}{dt} = \frac{I R_1}{C R},$$

где U_C — напряжение на конденсаторе,
 t — время.

Для этой цели применена движущаяся по дюральной трубке каретка, к которой прикреплен спектрофотометр. Длина пути движения у первого варианта прибора 2 м, у второго — 4,5 м. На концах трубы (рейки), по которой движется каретка, установлен электродвигатель СД-54 для привода каретки и микропереключатели для выключения электродвигателя (П₅, П₆, рис. 5) и регистратора (П₃, П₄). При приближе-

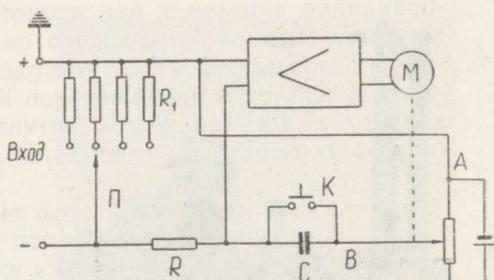


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема интегратора: $R = 230 \text{ M}\Omega$, $R_1 = 33 \text{ M}\Omega$, $10 \text{ M}\Omega$, $2.4 \text{ M}\Omega$, $620 \text{ k}\Omega$, $C = 0.5 \text{ }\mu\text{F}$.

$$U_c = \frac{R_1}{RC} \int_0^t I dt.$$

Следовательно, показание прибора пропорционально интегралу входного тока. В данном случае время t является временем равномерного прохождения каретки со спектрофотометром с одного конца рейки до другого. У первого варианта прибора $t = 38$ сек, у второго $t = 90$ сек. Если считать, что ток фотомножителя пропорционален падающему на приемник радиационному потоку, то получим

$$\bar{S} = an,$$

где \bar{S} — средний поток радиации на пути движения приемника, n — показание интегратора, a — постоянная прибора, определяемая градуировкой.

Интегратор имеет четыре предела измерения, выбираемые сопротивлениями R_1 и соответствующим переключателем П. Самый чувствительный предел измерения $1.42 \cdot 10^{-8}$ А/сек дел. Все детали интегрирующего звена смонтированы на высококачественной полистирольной или фторопластовой изоляции.

Фотоумножитель питается от стабилизированного выпрямителя ВС-22 напряжением 600—800 в. При таком напряжении питания темновые токи ФЭУ на 3—4 порядка меньше измеряемого сигнала, а чувствительность достаточна для измерений внутри посева.

Постоянство чувствительности приемника между отдельными измерениями или между сериями измерений проверяется лампой накаливания, питаемой от высокостабильного стабилизатора постоянного тока У-1199. Лампа соединена со стабилизатором четырьмя проводами, из которых два используются для тока, а два других для проверки напряжения на цоколе лампы. Влияние температуры на сопротивление соединительных проводов исключается тем, что соответствующий делитель напряжения обратной связи вынут из прибора и вмонтирован у цоколя лампы. Источником эталонного напряжения служит нормальный элемент III класса. Для повышения стабильности светового потока лампы, она подвергалась искусственному старению и питается напряжением на 10% ниже номинального.

Регистрирующая часть прибора, а также пульт управления и узлы питания смонтированы в автобусе. Спектрофотометр соединен с автобусом кабелями длиной 25 м.

Градуировка прибора в абсолютных единицах энергии производилась по прямой радиации Солнца методом Бугера. Для градуировки выбирались возможно более устойчивые ясные погоды, причем в течение градуировки прозрачность атмосферы про-

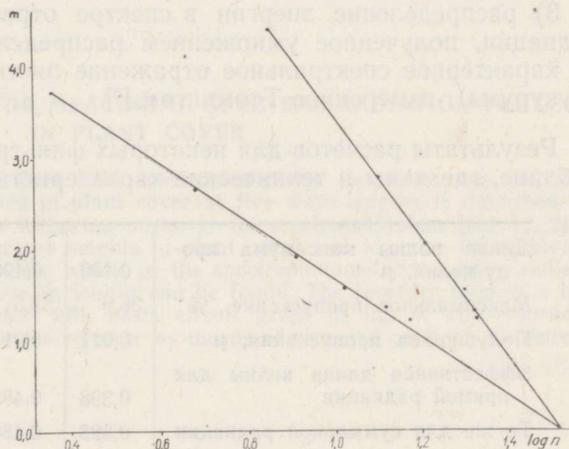


Рис. 7. Пример градуировочной кривой.

веряли по показаниям актиметра. В качестве примера на рис. 7 приведены градуировочные кривые для одного фильтра, сделанные при разных, сильно различающихся условиях прозрачности. На горизонтальной оси приведен логарифм от показания прибора, а на вертикальной — масса атмосферы. После экстраполяции показаний спектрофотометра за пределы атмосферы их сопоставили со спектральным распределением прямой радиации, опубликованным Джонсоном [4].

Так как интерференционный светофильтр имеет определенную ширину пропускания и иногда довольно протяженные «крылья» пропускания, нужно рассчитать эффективные длины волны λ_e и учитывать их при градуировке и измерениях. Эффективная длина волны выражается формулой

$$\lambda_e = \frac{\int_0^{\infty} \lambda I(\lambda) h(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} I(\lambda) h(\lambda) d\lambda},$$

где $I(\lambda)$ — распределение энергии в спектре измеряемой радиации, $h(\lambda)$ — аппаратная функция.

В нашем случае основную часть аппаратной функции составляет пропускание интерференционного светофильтра $p_1(\lambda)$ и относительная спектральная чувствительность фотоумножителя $p_2(\lambda)$:

$$h(\lambda) = p_1(\lambda) p_2(\lambda).$$

Пропускание $p_1(\lambda)$ было измерено на спектрофотометре СФ-4. На этом же приборе измерена относительная чувствительность ФЭУ-27. В качестве неселективного приемника применялся вакуумный термоэлемент. Для расчета принимали следующие спектральные распределения:

- 1) распределение энергии в спектре прямой радиации за пределами атмосферы по Джонсону [4];
- 2) распределение энергии в спектре суммарной радиации по Кондратьеву [5];
- 3) распределение энергии в спектре отраженной от растительности радиации, полученное умножением распределения суммарной радиации на характерное спектральное отражение листьев зеленой растительности (кукурузы), измеренное Тоомингом [6].

Результаты расчетов для некоторых фильтров приведены в следующей таблице, где даны и технические характеристики фильтров:

Длина волны максимума пропускания, μ	0,400	0,490	0,554	0,680	0,774
Максимальное пропускание, %	36,0	52,5	51,0	34,3	22,5
Полуширина пропускания, μ	0,011	0,014	0,012	0,013	0,012
Эффективная длина волны для прямой радиации	0,398	0,488	0,553	0,676	0,764
То же для суммарной радиации	0,398	0,488	0,552	0,676	0,764
То же для отраженной радиации	0,399	0,490	0,553	0,676	0,765

Интерференционные светофильтры нужно выбирать так, чтобы побочные полосы пропускания не попали в пределы чувствительности приемника или чтобы пропущенная ими радиация была мала по сравнению с радиацией, пропущенной основной полосой. В нашем случае инфракрасные полосы пропускания не мешают, так как в этой области ФЭУ-27 нечувствительны, а в ультрафиолетовой части не имели или имели только незначительные полосы пропускания.

Описанные приборы применялись летом 1963 года во время комплексной экспедиции по изучению фотосинтеза для измерения спектральных радиационных потоков внутри посева кукурузы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нийлиск Херберт, Исследования по физике атмосферы, № 3, 150 (1962).
2. Гуляев Б. И., Труды ГТО, вып. 100, 193 (1960).
3. Рееманн Ю., Исследования по физике атмосферы, № 3, 187 (1962).
4. Johnson F. S., Journ. Meteorol., 11, 431 (1954).
5. Кондратьев К. Я., Лучистая энергия Солнца, Гидрометеоздат., 1954, стр. 386.
6. Тооминг Х., Отражение и поглощение коротковолновой солнечной радиации некоторыми естественными поверхностями, Кандидатская диссертация, Тарту, 1961.

*Институт физики и астрономии
Академии наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию
11/V 1964

HERBERT NIILISK

СПЕКТРОФОТОМЕЕТЕР СПЕКТРАALSETE VOOUDE MÕOTMISEKS TAIMKATTE SEES

Artiklis kirjeldatakse interferentsfiltritega ja poolsfäärist kiirguse vastuvõtjaga integreerivat välispektrofotomeetrit, mida kasutatakse viiel lainepikkusel taimkatte sees üles- ja allasuunduvate kiirgusvoogude mõõtmiseks. Spektrofotomeeter koosneb järgmistest põhiosadest: 1) vastuvõtja (joon. 1), 2) seadmed, mis on ette nähtud spektrofotomeetri asetamiseks taimkatte sees eri kõrgusele ja tema liikumapanekuks keskmiste kiirgusvoogude leidmisel, 3) registreeriv osa.

Spektrofotomeetri abil leitakse keskmine kiirgusvoog 2—4,5 m pikkusel teelõigul. Registraatorina kasutatakse kõrgeoomilist alalisvoolu integraatorit, mille põhimõtteline skeem esitatakse joon. 6. Spektrofotomeetri registreeriv osa asub autobussis ning on vastuvõtjaga ühendatud 25 m pikkuse kaabli abil.

HERBERT NIILISK

SPECTROPHOTOMETER FOR MEASURING SPECTRAL RADIATION FLUXES IN PLANT COVER

The integrating interference-filter field spectrophotometer for measuring the downward and upward radiation fluxes in plant cover at five wave-lengths is described. The spectrophotometer consists of the following parts: 1) the receiving system (fig. 1), 2) the devices to fix the receiver at various heights in plant cover and to move the receiver in horizontal plane, 3) the recorder. By means of the spectrophotometer the mean radiation flux on the path of 2 ÷ 4.5 meters in length can be found. The recorder used is a high-resistance direct-current integrator with basic circuit given in fig. 6. The recorder is housed in a bus and connected to the receiver by means of screened cable of 25 meters in length.