

С. Ф. РОДИОНОВ и А. Л. ОШЕРОВИЧ

## СПЕКТРОФОТОМЕТР С ВТОРИЧНО-ЭЛЕКТРОННЫМ УМНОЖИТЕЛЕМ ДЛЯ ОЗОНОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

(Представлено академиком А. Н. Терениным 9 XII 1948)

Примененный рядом исследователей (<sup>1</sup>) оптический метод определения толщины слоя озона в атмосфере основан на измерении на поверхности Земли интенсивности  $I_\lambda$  узкой полосы (10—15 Å) солнечного спектра в пределах полосы Гартля (2200—3200 Å). При этом используется известное уравнение Бугэ:

$$I_\lambda = I_\lambda^0 e^{-\alpha x \mu - \beta m - \delta m}, \quad (1)$$

где  $I_\lambda^0$  — интенсивность за пределами атмосферы;  $x$  — толщина озонного слоя;  $\alpha$  — коэффициент поглощения озона;  $\beta$  — коэффициент ослабления вследствие релеевского рассеяния;  $\delta$  — коэффициент ослабления вследствие рассеяния на взвешенных частицах (аэрозоли);  $\mu$  и  $m$  — относительные длины пути луча через слой озона и через всю атмосферу, соответственно; величины  $m$  и  $\mu$  нормируются так, что при  $Z=0$   $m=\mu=1$ , где  $Z$  — зенитное расстояние солнца. В области изменений  $Z$  от 0 до  $70^\circ$  можно положить  $m=\mu=\sec Z$ . Для вычисления толщины слоя озона необходимо знание коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\delta$ .

Значения коэффициента  $\alpha$  в зависимости от длины волны известны из лабораторных измерений, величины же  $\beta$  и  $\delta$  зависят от атмосферных условий и при точных измерениях должны быть определены экспериментально. Если, как это сделал Добсон, измерять отношение интенсивностей  $I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2}$  и  $I_{\lambda_2}/I_{\lambda_3}$  света длин волн солнечной радиации, находящихся в соотношении  $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$ , где  $\lambda_1$  сильно поглощается озоном, и считать  $\delta$  не зависящим от длины волны в данной области спектра, то, на основании соответствующих уравнений Бугэ, можно определить как  $x$ , так и  $\beta$ . Как показал один из авторов этой статьи (<sup>2</sup>), при более точном решении задачи следует учитывать имеющую место в действительности зависимость от длины волны коэффициента  $\delta$ , обусловленную селективным ослаблением света аэрозолями, которые постоянно в большем или меньшем количестве присутствуют в атмосфере до высот 6—7 км и действие которых особенно резко проявляется при больших зенитных расстояниях солнца. При не слишком больших зенитных расстояниях решение уравнений Бугэ, составленных для трех длин волн  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ , приводит к следующей формуле для толщины слоя озона:

$$x = \frac{S_0 - S - k(L - L_0)}{\sec Z (\alpha_1 - \alpha_2 - k\alpha_1)}, \quad (2)$$

где  $S_0 = \lg \frac{I_{\lambda_1}^0}{I_{\lambda_2}^0}$ ,  $L_0 = \lg \frac{I_{\lambda_2}^0}{I_{\lambda_3}^0}$  при  $\sec Z = 0$ ;  $S = \lg \frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}}$ ,  $S = \lg \frac{I_{\lambda_2}}{I_{\lambda_3}}$ ,

$$k = \frac{\lambda_1^{-4} - \lambda_2^{-4}}{\lambda_2^{-4} - \lambda_3^{-4}}, \quad \alpha_1 \text{ и } \alpha_2 \text{ — значения коэффициентов поглощения озона}$$

для длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Величины  $S_0$  и  $L_0$  представляют, таким образом, отношение интенсивностей света длин волн  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  за пределами атмосферы и являются постоянными для любого озонометрического метода.

Добсоном был сконструирован спектрофотометр (3), в котором две длины волны солнечного спектра, выделяемые монохроматором двойного разложения и модулируемые вращающимся диском, попадали попеременно на окно фотоэлемента, соединенного с усилителем переменного тока; такое устройство позволяет непосредственно измерять отношение интенсивностей двух длин волн, компенсируя с помощью специального оптического клина более интенсивную длину волны так, чтобы ток на выходе усилителя был равен нулю. Измеряя отношение интенсивностей для двух пар длин волн  $I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2}$  и  $I_{\lambda_2}/I_{\lambda_3}$ , где  $\lambda_1$  поглощается озоном, а  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  практически не поглощаются, Добсон мог с достаточной для метеорологических целей точностью при помощи своего спектрофотометра определять содержание озона в любой момент времени согласно формуле (2). Однако для целого ряда задач (в частности, для исследований так называемого эффекта аномальной прозрачности (4), измерения озона в условиях белых ночей и т. п.) необходимо радикальное увеличение чувствительности метода. Для этой цели нами было разработано описанное ниже фотометрическое устройство с вторично-электронным умножителем, которое и было нами применено в видоизмененном спектрофотометре Добсона для измерения озона.

В качестве оптической части прибора нами была использована без существенных изменений оптическая система Добсона\*, состоящая из кварцевого монохроматора двойного разложения и системы щелей, выделяющих три длины волны:  $\lambda_1 = 3128 \text{ \AA}$ ,  $\lambda_2 = 3318 \text{ \AA}$  и  $\lambda_3 = 4468 \text{ \AA}$ , и описанная в соответствующих работах (3). Модуляция светового потока осуществлялась с частотой 24 герца вращающимся диском с прорезями, расположенными таким образом, чтобы в одну половину периода в окно ФЭУ попадал свет длины волны  $\lambda_2$ , а в другую половину — свет длины волны  $\lambda_1$  или  $\lambda_3$ . Фотометрическое устройство состояло из вторично-электронного умножителя и усилителя переменного тока. В качестве ФЭУ нами была применена сурьмяно-цезиевая трубка Кубецкого с окном-мембраной, с темновым током  $5 \cdot 10^{-9}$  а при  $V_{\text{раб}} = 1000$  в. Кривая спектральной чувствительности такого умножителя будет дана в другом месте. Питание ФЭУ осуществлялось выпрямителем со стабилизирующим устройством. Трехкаскадный усилитель на лампах 6Ж7—6Ж7—6С5 с отрицательной обратной связью имел в используемом интервале частот почти горизонтальную частотную характеристику, так что случайные изменения частоты модуляции светового потока не вызывали изменения величины выходного сигнала. В выходную цепь усилителя включали механический коммутатор, вращающийся на одной оси с модуляционным диском. При равенстве интенсивностей обеих длин волн, попадающих на катод ФЭУ, ток через гальванометр, включенный в цепь коммутатора, равен нулю. Принципиальная схема фотоэлектрической части устройства дана на рис. 1.

Подобное фотометрическое устройство позволяет измерять световые потоки на два — три порядка меньшие, чем потоки, измеряемые

\* Оптическая часть спектрофотометра Добсона была нам любезно предоставлена Главной геофизической обсерваторией, по поручению которой велась настоящая работа. Пользуемся случаем выразить благодарность Главной геофизической обсерватории.

фотометром Добсона, так как в последнем увеличение токового усиления электрометрического каскада ограничивается значением частоты модуляции светового потока и величиной входной емкости лампы-электрометра; в лучшем случае величина токового усиления электрометрического каскада в фотометре Добсона может быть доведена до  $10^4$ .

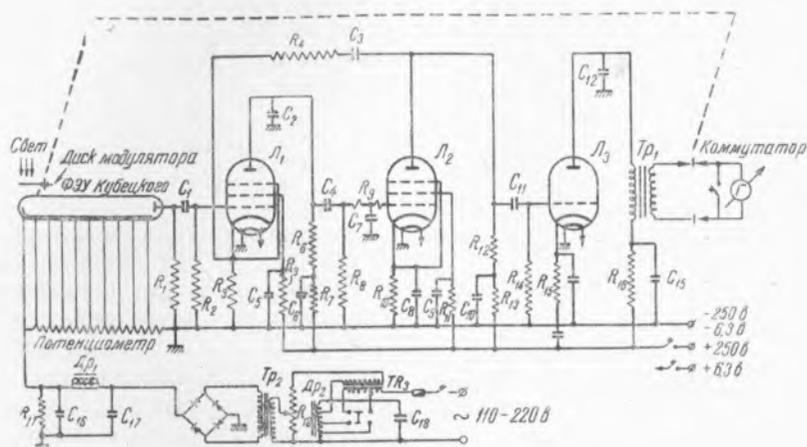


Рис. 1. Принципиальная схема фотоэлектрической части спектрофотометра

Кроме того, следует отметить, что при применении ФЭУ отпадает необходимость в специальных мерах для уменьшения микрофонного эффекта, а также в герметизации и осушении устройства.

Величины  $S$  и  $L$  (равенство (2)) связаны с непосредственными отсчетами прибора  $S'$  и  $L'$ , дающими положение оптического клина, при котором достигается равенство нулю тока на выходе, соотношениями:

$$S' = -\gamma S + A, \quad L' = -\gamma L + B.$$

Здесь  $\gamma$  зависит от оптических свойств клина, а величины  $A$  и  $B$  — от спектральной чувствительности ФЭУ и гетерохромных характеристик оптической системы. Как нетрудно видеть, величины  $A$  и  $B$  представляют собой постоянные, исключаяющиеся при применении формулы (2).

Измерение содержания озона с помощью описанного спектрофотометра и определение постоянного метода ( $S_0$  и  $L_0$ , уравнение (2)) производилось в мае — июне 1948 г. в районе г. Терийоки. Производились измерения прямого солнечного света и рассеянного света зенита. При измерениях прямого солнечного света перед входной щелью прибора в целях равномерного освещения щели помещалась матовая кварцевая пластинка; вследствие большой чувствительности фотометра при измерениях в прямом солнечном свете применялось общее ослабление светового потока нейтральным фильтром, помещаемым перед гелиостатическим устройством, служащим для юстировки изображения солнца на щель прибора; кроме того, рабочее напряжение ФЭУ понижалось на одну треть его нормальной величины.

Рис. 2, изображающий значения величины  $S'$ , полученные для эталонного источника (лампа накаливания) в зависимости от времени с момента включения прибора, дает представление о разбросе изме-



Рис. 2. Режим работы спектрофотометра при эталонном источнике света

ряемой величины, обусловленном колебаниями нуля вследствие некоторого несовершенства механической коммутации, флуктуаций темнового тока ФЭУ и т. п.

На рис. 3 даны зависимости величин  $S'$  и  $L'$  от  $\sec Z$  в прямом солнечном свете для одного из дней наблюдений. Точки достаточно хорошо ложатся на прямые, начальные ординаты которых дают после соответствующего пересчета величины

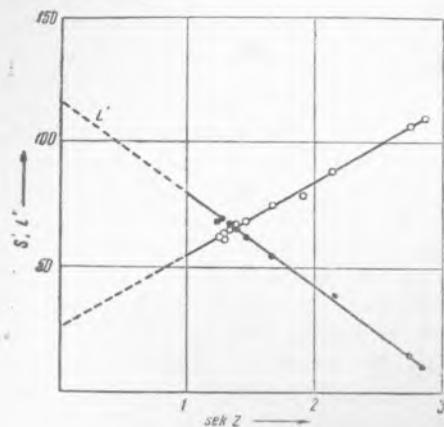


Рис. 3. Зависимость показаний прибора (величины  $S'$  и  $L'$ ) от  $\sec Z$

$$S_0 = \lg \frac{I_{3128}^0}{I_{33.8}^0}, \quad L_0 = \lg \frac{I_{4468}^0}{I_{3318}^0},$$

входящие в основную формулу (2).

На рис. 4 дан дневной ход содержания озона для двух дней, различающихся метеорологическими условиями. Хотя параллельные высотные метеорологические измерения и не производились, но о резком различии атмосферных условий для этих двух дней свидетельствуют внешние атмосферные показатели. Кривая 1 получена в условиях значительной замутненности атмосферы (хотя и в отсутствие облачности) и обнаруживает типичное для данного места измерений изменение содержания озона в течение дня. Кривая 2 представляет редкий для данного места случай исключительной прозрачности атмосферы.



Рис. 4. Дневные вариации общего содержания озона: 1 — 13 июня 1948 г., 2 — 21 июня 1948 г.

Дальнейшие озонметрические наблюдения с описанным прибором, а также исследования поглощения атмосферными аэрозолями и т. д. при больших зенитных расстояниях авторы надеются осуществить в ближайшее время в высокогорных условиях.

Научно-исследовательский физический институт  
Ленинградского государственного университета  
им. А. А. Жданова

Поступило  
29 IX 1948

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> П. Гетц, Атмосферный озон, 1934. <sup>2</sup> С. Ф. Родионов, Диссертация, Физический ин-т АН СССР, 1942; С. Ф. Родионов, Е. Н. Павлова, Н. Т. Рейнов и Е. В. Рдултовская, Изв. АН СССР, сер. географ. и геофиз., № 4, 1:5 (1942). <sup>3</sup> G. M. V. Dobson, Proc. Phys. Soc., 43, 324 (1951). <sup>4</sup> С. Ф. Родионов, Е. Н. Павлова и Н. Н. Ступников, ДАН, 19, 53 (1938).