

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР  
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И КОНТРОЛЮ  
ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

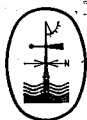
ТРУДЫ  
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ  
им. А. И. ВОЕЙКОВА

*Выпуск*

**419**

АКТИНОМЕТРИЯ  
АТМОСФЕРНАЯ ОПТИКА  
И ОЗОНОМЕТРИЯ

Под редакцией  
д-ра техн. наук Г. П. ГУЩИНА



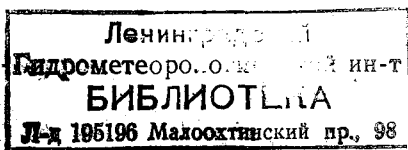
ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1980

В сборнике публикуются работы по методике и результатам измерения составляющих радиационного баланса, спектральной прозрачности атмосферы и аэрозоля, дальности видимости и общего содержания атмосферного озона.

Сборник предназначен для научных работников и специалистов в области физики атмосферы.

The publication contains papers on the procedures and results of measuring radiation balance components, atmospheric spectral transparency and aerosol, visibility range and total ozone content in the atmosphere.

The publication is meant for researchers and specialists in atmospheric physics.



*Е. П. Барашкова*

## **ОБ ИЗМЕНЧИВОСТИ РАДИАЦИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Известно, что основным источником тепла, поступающего к подстилающей поверхности, является лучистая энергия Солнца [1, 8, 15], поэтому основной причиной изменения температуры подстилающей поверхности во времени являются периодические и случайные колебания потоков солнечной радиации. Однако степень нагревания и охлаждения подстилающей поверхности зависит от соотношения отдельных составляющих теплового баланса. Различие теплофизических свойств деятельного слоя приводит к пространственной изменчивости температуры подстилающей поверхности при близких значениях поглощенной коротковолновой радиации. Исследования периодических изменений (суточный и годовой ход) температуры оголенной почвы имеют большую историю [11, 15]. Менее исследованы случайная изменчивость температуры и ее поведение для других видов подстилающей поверхности [2, 4, 13].

Авторы статьи [4] А. Г. Горелик и С. Ф. Калачинский отмечают, что при безоблачной погоде температура поверхности почвы обладает мелкомасштабной неоднородной структурой. Используя радиационный метод измерения (сканирующий прибор, работающий в спектральной области 8—12 мкм), авторы [4] получили расхождения в температуре отдельных участков сухой поверхности в пункте наблюдения 10—15 °С. Там же отмечается, что при сплошной облачности неоднородность температуры подстилающей поверхности уменьшается, наиболее однородное поле температуры наблюдается при хорошо увлажненной поверхности почвы. Влияние переменной облачности на температуру сухой и влажной поверхности проявляется различным образом. В результате эксперимента установлено, что инерция изменения температуры сухой почвы составляет 60 с, для влажной она достигает 400 с. Разность температур, освещенных и затененных облаком участков подстилающей поверхности достигает 10 °С и более.

По данным М. А. Сулева и Ю.-А. Р. Мулламаа [13], автокорреляционная функция радиационной температуры поверхности песка

в условиях переменной облачности близка к автокорреляционной функции прямой радиации Солнца.

В статьях [6, 7] вопрос об изменении температуры сухой почвы в условиях переменной облачности рассматривался теоретически. Получены формулы, связывающие дисперсии, корреляционные функции и спектральные плотности суммарной радиации и температуры поверхности почвы.

В настоящей статье приводятся некоторые дополнительные сведения о временной и пространственной изменчивости радиационной температуры подстилающей поверхности, полученные по данным измерений, проведенных в Воейково (Ленинградская область) в июле—августе 1974 г., и самолетных измерений по отдельным маршрутам на территории СССР в сентябре 1967 г.

Для измерений радиационной температуры в Воейково были использованы два радиометра системы ЛЭТИ [5, 14], работающих в различных спектральных областях. Один из радиометров (№ 1) имел бело-блестящую приемную поверхность и фильтр из KRS-5 (область чувствительности 2,5—40 мкм), другой (№ 2) — черную приемную поверхность и комбинированный фильтр, составленный из флюорита ( $\text{CaF}_2$ ) и антимонида индия ( $\text{InSb}$ ) (область чувствительности 7—12,5 мкм). Инерция радиометров по максимальному значению ЭДС  $\tau_{\text{max}} = 12 \div 15$  с,  $\tau_{0,63} = 2 \div 3$  с. Во время измерений радиометры имели постоянную температуру (25 или 30 °C). При термостатировании радиометров радиационная температура подстилающей поверхности определялась непосредственно по величине термотока. Зависимость между температурой черной поверхности и величиной термотока радиометра устанавливались во время предварительных градуировок. Устойчивость этой зависимости контролировалась ежедневно в процессе работы. С целью термостатирования радиометры помещались в массивные цилиндрические корпуса из красной меди, температура которых поддерживалась постоянной путем автоматического включения и выключения электрического обогрева. Для уменьшения теплообмена медный цилиндр вставлялся в цилиндр из пенопласта и все целиком помещалось в стальной корпус. При этом центральный угол радиометра составлял 60°. Прибор устанавливался на высоте 160 см от подстилающей поверхности, радиометром визировался постоянно один и тот же участок подстилающей поверхности, заросший травой.

При измерениях радиационной температуры подстилающей поверхности осуществлялась непрерывная запись показаний радиометра с помощью многопредельного переносного милливольтметра постоянного тока типа Н-39. В качестве усилителя использовался микровольтмикроамперметр постоянного тока Ф116 с шунтом 100 Ом. На рис. 1 представлен образец записи показаний радиометра № 1 17 июля 1974 г. с 8 ч 30 мин до 12 ч по московскому декретному времени. Штриховыми линиями даны отметки времени, у отметок времени в скобках приводятся сведения об облачности. Стрелками отмечены показания, соответствующие контролю градуировки, и нулевые отметки (температура излучателя равна

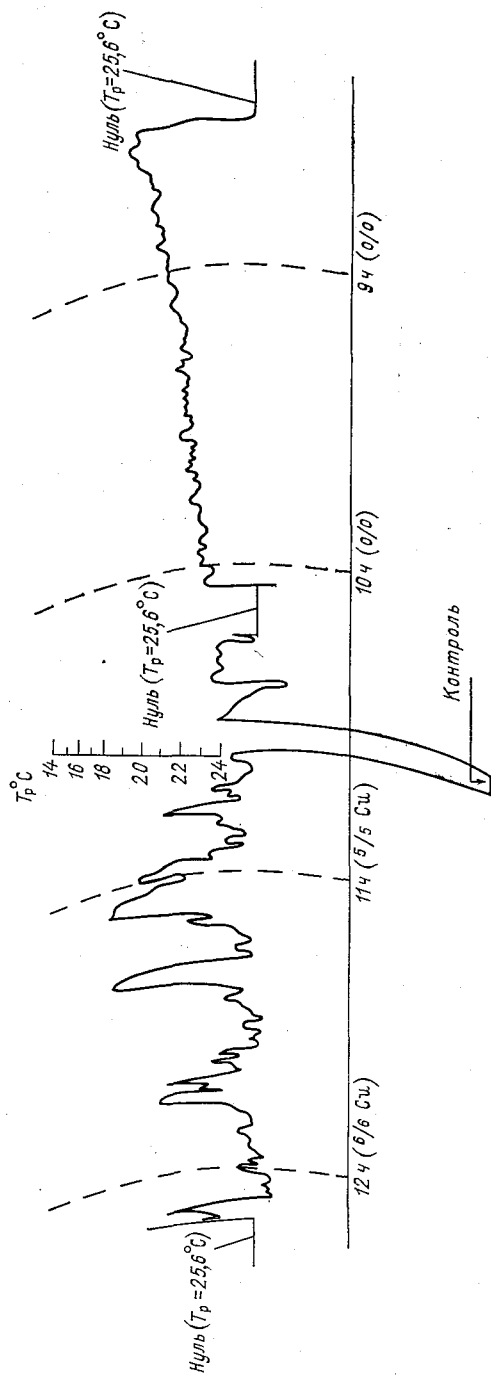


Рис. 1. Образец записи показаний радиометра, обращенного в надир.

температуре радиометра), на рисунке нанесена также шкала радиационной температуры  $T_p$  в градусах Цельсия.

На приведенном рисунке отчетливо проявляется зависимость характера изменения радиационной температуры от состояния облачности и связанного с ним состояния солнечного диска. Для характеристики изменчивости радиационной температуры подстилающей поверхности были рассмотрены разности максимальных и минимальных значений  $T_p$  за десятиминутные интервалы ( $\max T_p - \min T_p = \max \Delta_{10}T_p$ ) и разности  $T_p$  на концах минутного интервала по результатам регистрации в околополуденные часы ( $\Delta_1 T_p = T_p(t_{i+1}) - T_p(t_i)$ ). Интегральная повторяемость  $\max \Delta_{10}T_p$  при облачности разных ярусов представлена в табл. 1. Там же приводится интегральная повторяемость  $\Delta_1 T_p$  и  $\Delta_{10}T_p$  без разделения условий облачности. Выборки, соответствующие облачности отдельных ярусов, включают небольшое число случаев  $n$  и не могут считаться статистически обеспеченными. Однако из таблицы видно, что пределы изменения  $T_p$  внутри десятиминутного интервала увеличиваются при переходе от безоблачного неба к облачному, и если при безоблачном небе  $\Delta_{10}T_p$  не превышает  $4^\circ\text{C}$ , то при сплошной облачности нижнего яруса оно может достигать  $10-11^\circ\text{C}$ . В большинстве случаев (90 %)  $\Delta_{10}T_p$  не превышает  $5^\circ\text{C}$ . Анализ распределения  $\Delta_{10}T_p$  по всей совокупности данных ( $n=682$ ) показывает, что оно имеет следующие характеристики: среднее значение  $\overline{\Delta_{10}T_p} = 2,5^\circ\text{C}$ , среднее квадратическое отклонение  $\sigma =$

Таблица 1

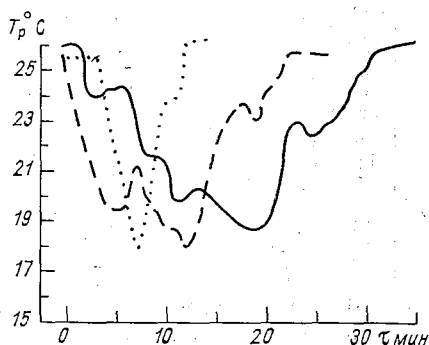
Интегральная повторяемость (%) разностей максимальных и минимальных значений радиационной температуры за десятиминутные интервалы  $P_1$  и разностей  $T_p$  на концах минутных интервалов  $P_2$

| $\Delta_{10}T_p$ °C | $P_1$      |                 |                 |                |         |         | $ \Delta_1 T_p $ °C | $P_2$ |
|---------------------|------------|-----------------|-----------------|----------------|---------|---------|---------------------|-------|
|                     | облачность |                 |                 |                |         |         |                     |       |
|                     | ясно       | верхний<br>ярус | средний<br>ярус | нижний<br>ярус | кучевая | средняя |                     |       |
| $\wedge 1$          | 56         | 47              | 10              | 12             | 16      | 24      | $\wedge 1$          | 76    |
| $\wedge 2$          | 95         | 80              | 29              | 41             | 38      | 51      | $\wedge 2$          | 92    |
| $\wedge 3$          | 99         | 96              | 67              | 56             | 42      | 66      | $\wedge 3$          | 96    |
| $\wedge 4$          | 100        | 99              | 86              | 76             | 61      | 81      | $\wedge 4$          | 98    |
| $\wedge 5$          |            | 100             | 94              | 86             | 83      | 91      | $\wedge 5$          | 99    |
| $\wedge 6$          |            |                 | 98              | 91             | 96      | 95      | $\wedge 6$          | 99    |
| $\wedge 7$          |            |                 | 100             | 97             | 100     | 98      | $\wedge 7$          | 100   |
| $\wedge 8$          |            |                 |                 | 98             |         | 99      |                     |       |
| $\wedge 9$          |            |                 |                 | 99             |         | 99      |                     |       |
| $\wedge 10$         |            |                 |                 | 99             |         | 99      |                     |       |
| $\wedge 11$         |            |                 |                 | 100            |         | 100     |                     |       |
| $n$                 | 57         | 58              | 48              | 137            | 85      | 682     |                     | 908   |

$= 1,791$ , асимметрия  $A = 0,99$ , эксцесс  $E = 0,82$ , мода  $1,5^\circ\text{C}$ , медиана  $2^\circ\text{C}$ . Распределение значений  $\Delta_1 T_p$  при различной облачности и общем числе случаев  $n = 908$  также отлично от нормального: среднее значение  $T_{i+1} - T_i = -0,03$ , среднее квадратическое отклонение  $\sigma = 1,17$ , асимметрия  $A = 0,34$ , эксцесс  $E = 6,09$ , мода  $-0,25$ , медиана  $-0,28$ .

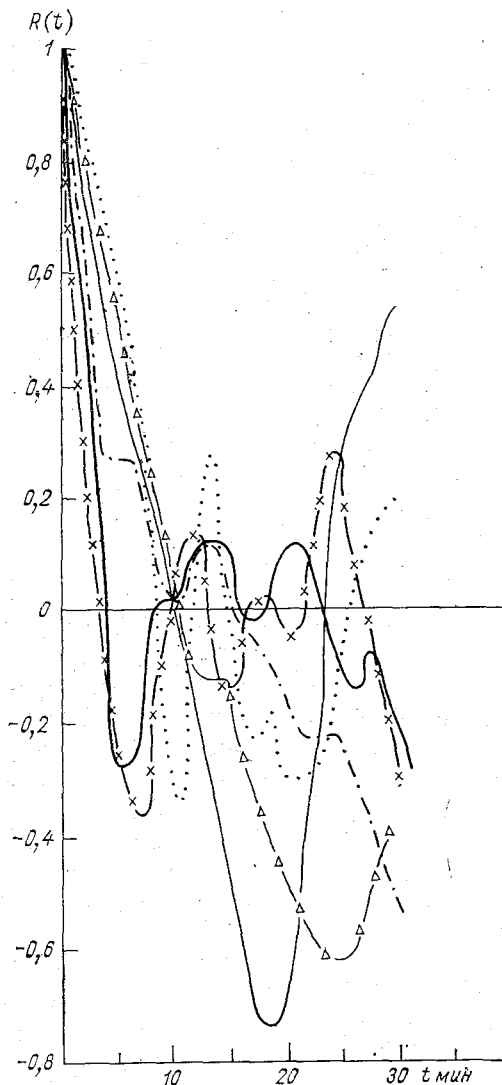
Характер непериодических изменений радиационной температуры подстилающей поверхности зависит от структуры и скорости перемещения облачности. На рис. 2 приведен ход  $T_p$  травяного покрова, вызванный затенением солнечного диска кучевыми облаками. Неоднородность облака приводит к нарушению монотонного хода температуры при ее убывании и возрастании, при этом асимметрия в ходе температуры относительно момента с минимальным значением  $T_p$  проявляется в большей степени при более продолжительном затенении.

Рис. 2. Ход радиационной температуры травяного покрова при затенении солнечного диска кучевым облаком.



Для более детальной характеристики изменчивости  $T_p$  во времени были использованы корреляционные функции  $R_{T_p}(t)$ , рассчитанные М. П. Жуковой на ЭВМ. Для расчета корреляционных функций выбирались результаты регистрации температуры в околополуденные часы (11—12, 12—13 ч по среднему солнечному времени), тем самым влияние суточного хода температуры сводилось к минимуму. Всего было использовано 18 реализаций продолжительностью 1 ч с шагом квантования 1 мин. Все реализации соответствовали облачному небу с облаками нижнего яруса (5—6 баллов Cu, 10 баллов Sc, 10 баллов St, Ns). Корреляционные функции, полученные для разных реализаций, имеют значительный разброс, вызванный как различием размеров и скоростей передвижения облачных образований, так и ограниченностью реализаций. На рис. 3 представлены корреляционные функции, соответствующие кучевой облачности 5—6 баллов. Радиус корреляции ( $t$  соответствующее  $R(t) = 0,5$ ) в отдельных реализациях меняется от 2 до 6 мин, при  $t > 10$  мин  $R(t)$  имеет колебательный характер и неоднократно принимает нулевые значения. Более однообразный вид корреляционных функций получен при слоисто-кучевой облачности 10 баллов. В этом случае радиус корреляции также меняется

от 2 до 6 мин,  $R_{T_p}(t) > 0$  при  $t < 8$  мин. Минимальные значения  $R_{T_p}(t)$  соответствуют  $t = 15$  мин, нулевые —  $t = 8$  и 26 мин. Осредненная по всем 18 реализациям корреляционная функция  $\bar{R}_{T_p}$



приведена в табл. 2. В таблице, кроме того, приведены ошибка коэффициента корреляции  $\sigma_R$ , пределы изменения корреляционных функций, использованных для осреднения,  $\max R$  и  $\min R$  и корреляционная функция радиационной температуры  $R_{T_p}^*$ , полученная М. А. Сулевым и Ю.-А. Р. Мулламаа [13] по экспериментальным данным и соответствующая песчаной поверхности при меняющейся облачности. Значения этой функции превосходят средние значения  $\bar{R}_{T_p}(t)$ , но находятся в пределах изменений корреляционных функций, рассчитанных по отдельным реализациям, при этом изменения  $R$  в зависимости от  $t$  в том и другом случае имеют значи-

Рис. 3. Временные корреляционные функции радиационной температуры травяного покрова, соответствующие кучевой облачности 5—6 баллов.

тельные сходства. Средние значения  $\bar{R}_{T_p}$  при  $0 \leq t \leq 10$  мин могут быть представлены в виде экспоненциальной функции  $\bar{R}_{T_p} = e^{-0,25t}$ . Экстраполяция значений  $\bar{R}_{T_p}(t)$  к  $t = 0$  позволяет оценить меру

ошибки измерений  $\eta^2$ . Так как  $R_{\text{экс}}(0) = 0,97$ , то  $\eta^2 = \frac{1 - R_{\text{экс}}(0)}{R_{\text{экс}}(0)} = 0,03$ .

Таблица 2

Корреляционные функции радиационной температуры подстилающей поверхности  $R_{T_p}$  и суммарной радиации  $R_Q$

| $t$ мин | $\bar{R}_{T_p}$ | $\bar{\sigma}_{R_{T_p}}$ | max $R_{T_p}$ | min $R_{T_p}$ | $R_{T_p}^*$ | $e^{-0,25t}$ | $R_Q$ | $\sigma_{R_Q}$ |
|---------|-----------------|--------------------------|---------------|---------------|-------------|--------------|-------|----------------|
| 0       | 1,00            | 0,00                     | 1,00          | 1,00          | 1,00        | 1,00         | 1,00  | 0              |
| 1       | 0,80            | 0,05                     | 0,96          | 0,49          | 0,90        | 0,76         | 0,99  | 0,01           |
| 2       | 0,62            | 0,08                     | 0,88          | 0,19          | 0,83        | 0,61         | 0,83  | 0,04           |
| 3       | 0,47            | 0,10                     | 0,81          | -0,12         | 0,72        | 0,47         | 0,67  | 0,07           |
| 4       | 0,36            | 0,12                     | 0,74          | -0,12         | 0,61        | 0,37         | 0,50  | 0,10           |
| 5       | 0,30            | 0,13                     | 0,67          | -0,18         | 0,50        | 0,29         | 0,28  | 0,12           |
| 6       | 0,22            | 0,14                     | 0,60          | -0,28         | 0,37        | 0,22         | 0,08  | 0,13           |
| 7       | 0,16            | 0,15                     | 0,54          | -0,35         | 0,25        | 0,17         | -0,11 | 0,13           |
| 8       | 0,10            | 0,17                     | 0,47          | -0,39         | 0,10        | 0,13         | -0,22 | 0,13           |
| 9       | 0,07            | 0,17                     | 0,45          | -0,25         |             | 0,10         | -0,33 | 0,12           |
| 10      | 0,03            | 0,17                     | 0,47          | -0,32         |             | 0,08         | -0,42 | 0,12           |
| 15      | -0,19           | 0,17                     | 0,20          | -0,63         |             | 0,02         | -0,36 | 0,13           |
| 20      | -0,22           | 0,17                     | 0,10          | -0,64         |             | 0,01         | -0,19 | 0,15           |
| 25      | -0,14           | 0,19                     | 0,21          | -0,64         |             | 0,00         | -0,03 | 0,17           |
| 30      | -0,12           | 0,20                     | 0,54          | -0,54         |             |              | 0,06  | 0,18           |

Для сравнения в табл. 2 приводится осредненная корреляционная функция для суммарной радиации  $R_Q$ , рассчитанная по результатам регистрации суммарной радиации в Воейково. Датчик суммарной радиации был удален от датчика радиационной температуры примерно на 400 м. Выбранные для расчета  $R_Q$  реализации  $Q$  совпали по времени с реализациями  $T_p$ , использованными для расчета  $R_{T_p}$ . Сравнение корреляционных функций  $R_Q$  и  $R_{T_p}$  показывает, что радиационная температура и суммарная радиация имеют близкие радиусы корреляции, и, следовательно, необходимо предъявлять одинаковые требования к периоду осреднения и частоте отсчетов при определении их средних значений [9, 10].

По данным [12], точность среднего  $\sigma_{\xi}^2$  определяется выражением

$$\sigma_{\xi}^2 = \frac{\sigma^2}{N^2} \left[ N + 2 \sum_{k=1}^{N-1} (N-k) R(k \Delta t) \right],$$

где  $\sigma$  — точность отдельного измерения,  $N$  — число измерений,  $\Delta t$  — временной интервал между отсчетами,  $R$  — корреляционная функция, а оптимальный шаг между отсчетами  $\Delta_{\text{опт}}$  определяется из уравнения

$$\frac{4}{3} R\left(\frac{\Delta_{\text{опт}}}{2}\right) - \frac{5}{6} R(\Delta_{\text{опт}}) = \frac{1}{2}.$$

Используя эти формулы и представляя  $R_{T_p}(\Delta t) = e^{-0,25\Delta t}$ , мы получили, что дисперсия среднего значения радиационной температуры по сравнению с единичным измерением уменьшается в несколько раз ( $m$ ) в зависимости от периода осреднения  $\tau$ :

|                                             |     |   |    |    |    |    |    |    |
|---------------------------------------------|-----|---|----|----|----|----|----|----|
| $m = \sigma^2/\sigma_{\bar{x}}^2$ . . . . . | 1,5 | 2 | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
| $\tau$ мин . . . . .                        | 4   | 9 | 20 | 25 | 35 | 45 | 50 | 60 |

Оптимальный интервал между отсчетами 2—3 мин.

Для характеристики пространственной изменчивости радиационной температуры были использованы результаты самолетной экспедиции, проводившейся ГГО в сентябре 1967 г. по маршруту Ленинград — Новосибирск—Иркутск—Владивосток—Южно-Сахалинск — Магадан—Хабаровск—Новосибирск—Караганда—Чарджоу—Красноводск—Астрахань—Ленинград.

Для измерений  $T_p$  использовался макет радиационного термометра, описанный в [3]. Приемник радиации был снабжен комбинированным фильтром, пропускающим радиацию в области 7,5—12 мкм, и поддерживался при постоянной температуре. Использованный во время полетов в 1967 г. вариант радиационного термометра имел угол зрения  $1,5 \times 3^\circ$ , инерцию 2,5 с. Абсолютная градуировка выполнялась по черному телу, шкала прибора градуировалась по температуре. Показания радиационного термометра в градусах Цельсия регистрировались на одноканальном электронном потенциометре ЭПП-09 с временем отработки всей шкалы 1 с, шкала прибора  $20^\circ\text{C}$ , инструментальная ошибка  $0,4^\circ\text{C}$ . Высота полета менялась от 300 до 2500 м, скорость полета 250 км/ч.

При определении радиационной температуры не учитывалась поправка на влияние слоя воздуха [3]. Впрочем, при сравнении в близкие моменты времени следует считать, что эта поправка сохраняется постоянной и при определении разности  $\Delta T_p = T_p(t_{i+1}) - T_p(t_i)$  ее влияние исключается и полученное значение  $\Delta T_p$  обусловлено только различием в температурах и в излучательных свойствах подстилающей поверхности. Наибольшие контрасты радиационной температуры ( $\max \Delta T_p$ ) на соседних участках трассы, обусловленные различием в типах подстилающей поверхности, по материалам экспедиции 1967 г. (сентябрь) могут достигать  $10\text{—}17^\circ\text{C}$ . Наиболее часто значительные скачки температуры отмечаются при переходе с суши на водную поверхность и наоборот. В отдельных случаях значительные горизонтальные градиенты температуры ( $17^\circ\text{C}$ ) наблюдаются и при однотипной поверхности, как, например, для леса на маршруте Мадагаскар—Чита; причиной такого изменения температуры наряду с различием древесных пород является также и различная плотность древостоя.

Для характеристики изменчивости  $T_p$  однотипных поверхностей были рассмотрены повторяемости максимальных различий в значениях радиационной температуры в пределах двухминутного ин-

тервала  $\Delta_2 T_p$  для 5 типов подстилающей поверхности: море, пустыня, степь, лес, сельскохозяйственные угодья (поля и пашни). При скорости самолета 250 км/ч двухминутному интервалу соответствует расстояние 8 км.

Интегральная повторяемость значений  $\Delta_2 T_p$  приведена в табл. 3, а численные характеристики их распределения — в табл. 4. Из табл. 3 следует, что наименьшие пределы изменения  $\Delta_2 T_p$  наблюдаются над водной поверхностью (Охотское и Каспийское моря): в 96 % всех случаев  $\Delta_2 T_p \leq 1^\circ\text{C}$ , а крайние пределы изменения не превышают  $5^\circ\text{C}$ . Для водной поверхности характерна независимость от условий освещенности. В пустыне, несмотря на кажущуюся однородность подстилающей поверхности, наблюдаются достаточно широкие пределы изменения  $\Delta_2 T_p$  — до  $13^\circ\text{C}$ , в 90 % всех случаев  $\Delta_2 T_p \leq 6^\circ\text{C}$ . Для сельскохозяйственных угодий, степи и леса кривые интегральной повторяемости  $\Delta_2 T_p$  практически совпадают. Близкий ход интегральной повторяемости для последних трех типов подстилающей поверхности позволил объединить все эти случаи в одну совокупность (суша) и распределить по характеру освещенности. Для подстилающей поверхности, затененной облаками, в 90 % всех случаев  $\Delta_2 T_p \leq 7^\circ\text{C}$ , для освещенной  $\Delta_2 T_p \leq 11^\circ\text{C}$ , в последнем случае также больше пределы изменения  $\Delta_2 T_p$ .

Таблица 3

Интегральная повторяемость (%) значений  $\Delta_2 T_p$  для разных типов подстилающей поверхности

| $\Delta_2 T_p, ^\circ\text{C}$ | Лес | Поля, пашни | Степь | Пустыня | Море | Суша |          |
|--------------------------------|-----|-------------|-------|---------|------|------|----------|
|                                |     |             |       |         |      | ясно | пасмурно |
| $\leq 1$                       | 5   | 10          | 3     | 1       | 96   | 2    | 15       |
| $\leq 2$                       | 19  | 24          | 14    | 6       | 99   | 9    | 41       |
| $\leq 3$                       | 34  | 34          | 27    | 16      | 99   | 19   | 60       |
| $\leq 4$                       | 48  | 45          | 38    | 36      | 99   | 32   | 73       |
| $\leq 5$                       | 60  | 59          | 54    | 55      | 100  | 46   | 78       |
| $\leq 6$                       | 64  | 63          | 62    | 80      |      | 57   | 83       |
| $\leq 7$                       | 70  | 75          | 65    | 90      |      | 68   | 91       |
| $\leq 8$                       | 80  | 77          | 73    | 94      |      | 74   | 93       |
| $\leq 9$                       | 82  | 84          | 81    | 96      |      | 82   | 96       |
| $\leq 10$                      | 83  | 89          | 86    | 96      |      | 87   | 98       |
| $\leq 11$                      | 90  | 94          | 89    | 96      |      | 91   | 99       |
| $\leq 12$                      | 95  | 97          | 89    | 99      |      | 93   | 99       |
| $\leq 13$                      | 96  | 99          | 95    | 100     |      | 96   | 99       |
| $\leq 14$                      | 97  | 100         | 97    |         |      | 97   | 99       |
| $\leq 15$                      | 98  |             | 97    |         |      | 97   | 99       |
| $\leq 16$                      | 98  |             | 100   |         |      | 98   | 100      |
| $\leq 17$                      | 99  |             |       |         |      | 99   |          |
| $\leq 18$                      | 100 |             |       |         |      | 99   |          |
| $\leq 19$                      |     |             |       |         |      | 99   |          |
| $\leq 20$                      |     |             |       |         |      | 99   |          |
| $\leq 21$                      |     |             |       |         |      | 100  |          |

Численные характеристики распределения значений  $\Delta_2 T_p$  (сентябрь 1967 г.)

| Подстилающая поверхность | $n$ | $\max \Delta_2 T_p$ | $\overline{\Delta_2 T_p}$ | $\sigma$ | $\Delta_2 T_p \left( \frac{n}{2} \right)$ | $M$     | $A$  | $E$   |
|--------------------------|-----|---------------------|---------------------------|----------|-------------------------------------------|---------|------|-------|
| Лес . . . . .            | 115 | 18                  | 5,29                      | 3,76     | 4,68                                      | 2,5     | 1,00 | 0,22  |
| Поле . . . . .           | 150 | 14                  | 5,01                      | 3,40     | 4,88                                      | 1,5—4,5 | 0,68 | —0,66 |
| Степь . . . . .          | 37  | 16                  | 5,80                      | 3,72     | 5,25                                      | 4,5     | 0,81 | —0,13 |
| Лес, поле, степь         | 302 | 18                  | 5,21                      | 3,59     | 4,87                                      | 1,5—4,5 | 0,94 | —0,15 |
| Пустыня . . . . .        | 84  | 13                  | 4,84                      | 2,09     | 5,25                                      | 4,5     | 1,19 | 2,82  |
| Суша                     |     |                     |                           |          |                                           |         |      |       |
| ясно . . . . .           | 622 | 21                  | 6,05                      | 3,49     | 5,88                                      | 4,5     | 1,15 | 1,01  |
| пасмурно . . . .         | 161 | 16                  | 3,26                      | 2,63     | 2,97                                      | 1,5     | 1,04 | 1,36  |
| Море . . . . .           | 387 | 5                   |                           |          |                                           |         |      |       |
|                          | 374 | 1,2                 | 0,20                      | 0,21     | 0,11                                      | 0,05    | 1,61 | 2,94  |

В табл. 4 использованы следующие обозначения:  $n$  — число случаев;  $\max \Delta_2 T_p$  — наибольшее значение  $\Delta_2 T_p$ ;  $\overline{\Delta_2 T_p}$  — среднее значение;  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение;  $\Delta_2 T_p (n/2)$  — медиана,  $M$  — мода,  $A$  — коэффициент асимметрии,  $E$  — эксцесс.

По данным экспедиции 1967 г. были также рассчитаны пространственные корреляционные функции радиационной температуры  $R(l)$ , где  $l$  — расстояние в километрах, для некоторых типов подстилающей поверхности. Для расчетов были использованы средние значения  $T_p$  за полминутные интервалы при одинаковых для отдельной реализации условиях освещения подстилающей поверхности. Всего было использовано 9 часовых реализаций: 5 для моря, 3 для леса и одна для пустыни. Для пустыни, чтобы исключить влияние суточного хода, были использованы окологолуденные значения  $T_p$ . Результаты расчетов  $R(l)$  в виде графиков представлены на рис. 4. Ограниченность реализаций и возможная неоднородность подстилающей поверхности не позволяют получить точные значения корреляционных функций, и приведенные на рис. 4 значения  $R(l)$  нужно рассматривать как ориентировочные. Пространственные корреляционные функции  $T_p$  для водной поверхности по сравнению с  $R(l)$  для леса и пустыни имеют более плавный ход с  $l$  и большие радиусы корреляции. Если радиус корреляции значений  $T_p$  для водной поверхности составляет 20 км и более, то для пустыни и леса он не превышает 5 км. Отмечается значительный разброс значений  $R(l)$  для одного типа подстилающей поверхности. Полученные пространственные корреляционные функции  $T_p$  свидетельствуют о том, что радиационная температура участков территории даже для однотипной подстилающей поверхности при неизменных условиях освещенности имеет мелкомасштабную структуру.

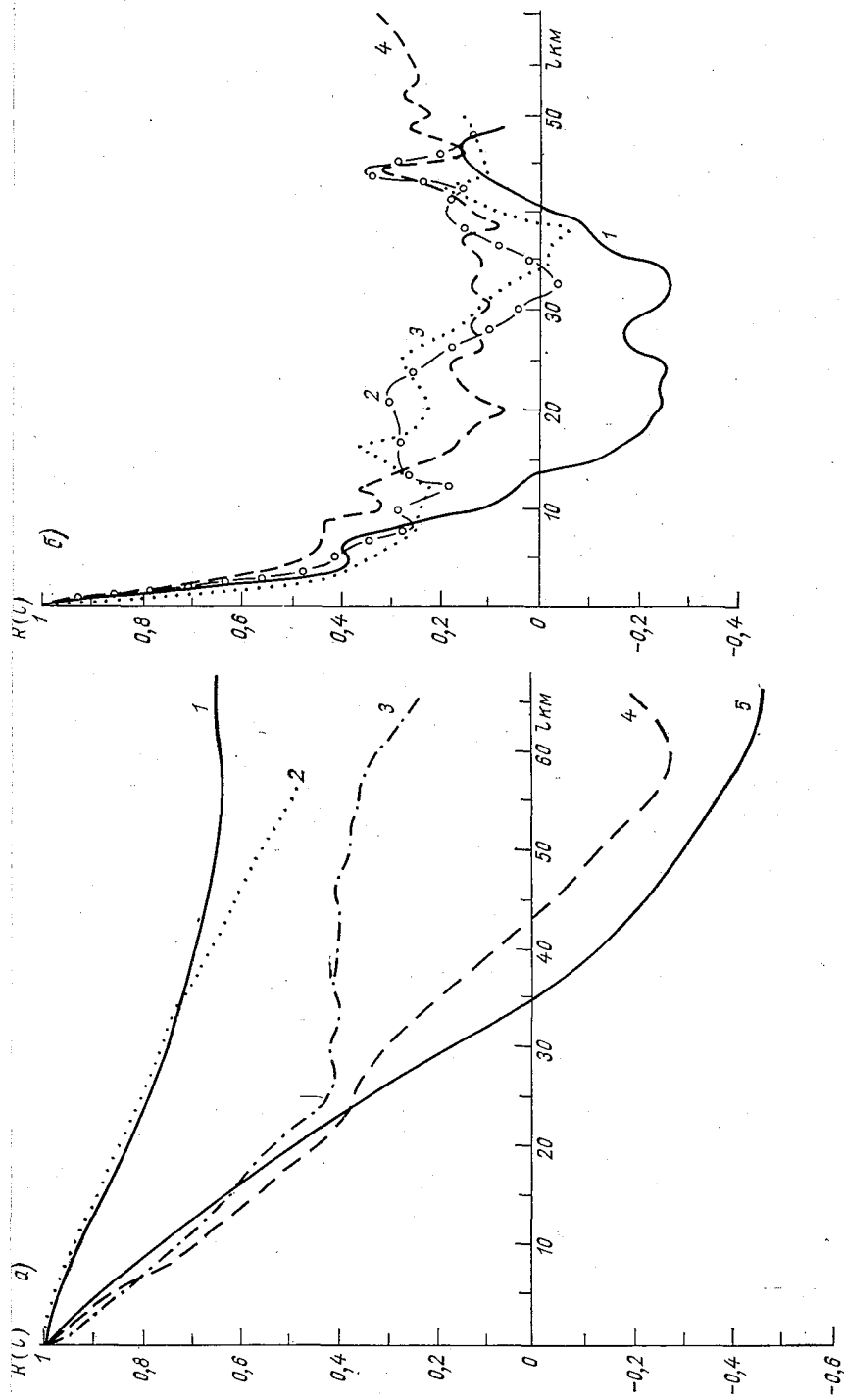


Рис. 4. Пространственные корреляционные функции радиационной температуры.

а — поверхность моря: 1 — Южно-Сахалинск—Магадан, ясно, 2 — Николаевск-на-Амуре—Магадан, №, 3 — Петропавловск-Камчатский—Магадан, ясно, 4 — Магадан—Охотск, ясно, 5 — Красноводек—Астрахань, Ас, Се, 6 — леса: 1 и 2 — Ленинград—Киров, 3 — Магадан—Цита, 4 — пустыни.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Тепловой режим приземного слоя атмосферы.— Л.: Гидрометеиздат, 1956.— 435 с.
2. Гаевский В. Л. Температура поверхности больших территорий.— Труды ГГО, 1951, вып. 26, с. 113—126.
3. Гаевский В. Л., Рабинович Ю. И. Об учете влияния атмосферы на результаты измерения радиационной температуры с искусственных спутников Земли.— Труды ГГО, 1964, вып. 166, с. 247—260.
4. Горелик Л. Г., Калачинский С. Ф. Влияние облачности на радиационные характеристики подстилающей поверхности.— В кн.: Радиационные процессы в атмосфере и на земной поверхности. Материалы IX Всесоюзного совещания по актинометрии. Л., 1974, с. 108—111.
5. Козырев Б. П. Многоспайные радиационные термозлементы для измерения мощного излучения из полупространства в спектральных областях 0,3—2,5 и 2,5—40 мкм.— Труды ГГО, 1964, вып. 166, с. 261—282.
6. Кээваллик С. Х., Мулламаа Ю.-А. Р. Температура сухой почвы при переменной облачности.— В кн.: Облачность и радиация. Тарту, 1975, с. 229—234.
7. Кээваллик С. Х., Мулламаа Ю.-А. Р. Флуктуации температуры сухой подстилающей поверхности при переменной облачности.— В кн.: Радиационные процессы в атмосфере и на земной поверхности. Материалы IX Всесоюзного совещания по актинометрии. Л., 1974, с. 112—116.
8. Лайхтман Д. Л. Физика пограничного слоя атмосферы.— Л.: Гидрометеиздат, 1961.— 253 с.
9. Мулламаа Ю.-А. Р. и др. Некоторые вопросы методики измерения средних потоков коротковолновой радиации при облачности/Мулламаа Ю.-А. Р., Пылдмаа В. К., Сулев М. А.— В кн.: Теплообмен в атмосфере. М., 1972, с. 87—93.
10. Пылдмаа В. К. О точности осреднения потоков суммарной радиации.— В кн.: Теплообмен в атмосфере. М., 1972, с. 93—97.
11. Справочник по климату СССР.— Л.: Гидрометеиздат, 1965—1966.
12. Стохастическая структура полей облачности и радиации/ Мулламаа Ю.-А. Р., Сулев М. А. и др. Тарту: АН ЭССР ИФ и А, 1972.— 281 с.
13. Сулев М. А., Мулламаа Ю.-А. Р. Экспериментальные исследования изменчивости температуры почвы.— В кн.: Облачность и радиация. Тарту, 1975, с. 229—234.
14. Фарапонова Г. П., Тимановская Р. Г. Полевые испытания термозлементов.— В кн.: Актинометрия и оптика атмосферы. Тр. VI Межведомственного совещания по актинометрии и атмосферной оптике. Таллин, 1968, с. 212—218.
15. Шульгин А. П. Климат почвы и его регулирование.— Л.: Гидрометеиздат, 1972.— 341 с.

*В. И. Горышин*

## **ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ «МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ДАЛЬНОСТЬ ВИДИМОСТИ» И ЕЕ ИЗМЕРЕНИИ НА СЕТИ СТАНЦИЙ**

Принято считать, что при решении задач приборных измерений дальности видимости различных объектов относительно легко осуществить приборные измерения метеорологической дальности видимости. Для этого достаточно измерить прозрачность слоя атмосферы известной протяженности.

Определение «метеорологическая дальность видимости» опирается на выводы теории горизонтальной дальности видимости Кошмидера [5], хотя сам Кошмидер, рассматривая случай видения абсолютно черной поверхности на фоне неба у горизонта, подобный термин не употреблял.

Так как из его теории следовало, что дальность видимости абсолютно черной поверхности на фоне неба у горизонта зависит только от коэффициента рассеяния (точнее от показателя ослабления) и порога контрастной чувствительности глаза наблюдателя, было предложено в дальнейшем использовать в качестве универсальной метеорологической характеристики оптического состояния атмосферы эту величину, считая значение порога контрастной чувствительности глаза константой при решении определенных задач наблюдения.

Например, в настоящее время при измерении дальности видимости при метеорологическом обслуживании авиации порог контрастной чувствительности глаза принят равным 0,05. Со временем за указанной характеристикой дальности видимости закрепилось название «метеорологическая дальность видимости», которое сейчас и используется во всех странах. Для организации правильных и единообразных измерений дальности видимости, в том числе и метеорологической, разработки методики ее измерений необходимо иметь строгое, физически обоснованное определение этой величины.

Исключительно важным это требование становится тогда, когда решаются метеорологические задачи определения погрешности измерений, задачи разработки образцовых средств измерения дальности видимости.

Если обратиться к Наставлению гидрометеорологическим станциям и постам [4], то в нем на с. 200—201 можно найти следующее определение метеорологической дальности видимости (МДВ): «Метеорологической дальностью видимости называется то наибольшее расстояние, с которого в светлое время суток можно различить (обнаружить) на фоне неба вблизи горизонта (или на фоне воздушной дымки) абсолютно черный объект достаточно больших угловых размеров (больше 15 угловых минут).

Величина МДВ в ночное время показывает, на каком расстоянии при существующей в этот момент прозрачности можно было бы обнаружить абсолютно черный объект, если бы вместо ночи был день».

Дополнительно в Наставлении дается разъяснение, что МДВ является одной из характеристик прозрачности атмосферы. Она связана с другими оптическими характеристиками (коэффициентами пропускания и рассеяния, показателем ослабления и др.) простыми зависимостями, с помощью которых можно вычислить любую характеристику, если известна МДВ, и, наоборот, найти МДВ, если измерена другая характеристика прозрачности. Далее в тексте подчеркивается, что МДВ необходимо отличать от реальной дальности видимости различных объектов на местности.

В главе 10 «Измерение видимости» и главе 16 «Приборы и методы наблюдения на аэронавигационных метеостанциях» Руководства по метеорологическим приборам и практике наблюдений ВМО [6] и в проекте пересмотренных глав 10 и 16, текст которых был одобрен Седьмой сессией Комиссии по приборам и методам наблюдений ВМО в г. Гамбурге в августе 1977 г., за основное определение метеорологической дальности видимости было принято то, которое было рекомендовано ВМО еще в 1957 г., а именно: «Метеорологическая оптическая дальность видимости — это длина пути в атмосфере, необходимая для ослабления светового потока коллимированного пучка света, идущего от лампы накаливания при цветовой температуре в 2700 К, до 0,05 его первоначальной величины, при этом световой поток оценивается посредством функции видности глаза, установленной Международной комиссией по освещенности».

В связи с тем что на многих метеорологических станциях в различных странах применяется методика визуальной оценки МДВ днем, в главе 10 Руководства [6] приводятся дополнительные определения МДВ: «Метеорологическая дальность видимости днем определяется как наибольшее расстояние, на котором черный объект соответствующих размеров и расположенный у земли может быть виден и распознан при рассматривании его на фоне тумана, неба и т. п. Следует подчеркнуть, что необходимо именно распознать объект, а не просто увидеть его не распознав, что он собой представляет».

Учитывая, что измерения МДВ должны проводиться и ночью, в главе 10 Руководства дополнительно приводятся два официальных определения МДВ для этих условий:

1. «Метеорологическая дальность видимости (в случае ночных наблюдений) определяется как наибольшее расстояние, на котором черный объект соответствующих размеров может быть увиден и распознан, если общее освещение будет соответствовать нормальному дневному уровню».

2. «Метеорологическая дальность видимости ночью определяется как наибольшее расстояние, на котором огни средней интенсивности можно увидеть и различить».

Неудовлетворительность последней формулировки настолько очевидна, что в дальнейшем мы не будем принимать ее во внимание. Анализ приведенных ранее определений МДВ показывает, что существует несколько нечетких, а в ряде случаев расплывчатых определений МДВ, большая часть из которых построена по принципу отражения процесса визуального наблюдения объекта наблюдателем как днем, так и ночью. Эти формулировки основаны на предположении, что основным средством измерения МДВ является глаз наблюдателя. Неопределенность понятий различения, обнаружения, опознания объекта, используемых в определениях, приводит к неоднозначности, субъективности визуальной оценки МДВ. Реализовать приборные измерения МДВ в соответствии с подобными определениями и оценить точность измерений тем более затруднительно из-за отсутствия в них четких количественных характеристик используемых понятий.

Формализованное определение оптической МДВ, введенное в главу 10 Руководства, достаточно строгое в физическом и метрологическом отношении, когда речь идет об измерении показателя ослабления (прозрачности), становится неудовлетворительным и не пригодным к практическому использованию, когда речь идет об измерении МДВ.

Все рассмотренные определения МДВ сформулированы при прямом или косвенном предположении, что выводы теории Кошмидера строго достоверны и что МДВ есть эквивалентная характеристика прозрачности атмосферы. По Кошмидеру, МДВ ( $S_M^{(k)}$ ) есть

$$S_M^{(k)} = \frac{\ln \frac{1}{\varepsilon}}{\alpha}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — порог контрастной чувствительности глаза,  $\alpha$  — показатель ослабления.

Решая уравнение Бугера—Ламберта, можем получить

$$L = \frac{\ln \frac{1}{T}}{\alpha}, \quad (2)$$

где  $L$  — длина пути коллимированного пучка в атмосфере,  $T$  — прозрачность слоя атмосферы протяженностью  $L$ .

Сравнивая формулы (1) и (2), можно видеть их полное внешнее сходство. Если принять, что  $T = \varepsilon$ , то  $L$  будет равно  $S_M^{(k)}$ . Этот вывод и явился обоснованием для введения вышеуказанного

формализованного определения оптической МДВ. Неудовлетворительность определений такого параметра, как дальность видимости, в том числе и МДВ, затрудняет организацию приборных измерений дальности видимости и особенно оценку точности приборных измерений этой величины.

Наибольшая сложность с измерениями МДВ на сети станций возникла в настоящее время в связи с тем, что выводы Кошмидера о том, что МДВ есть однозначная характеристика прозрачности атмосферы, оказались неверными. Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные автором в течение ряда лет, показали [1, 2], что МДВ зависит не только от показателя ослабления (прозрачности), но и от коэффициента рассеяния под углами, близкими к  $0^\circ$ , отношения коэффициента рассеяния к показателю ослабления и от угла зрения приемника, т. е. одному и тому же показателю ослабления могут соответствовать различные значения МДВ. Дальность видимости абсолютно черной поверхности на фоне насыщенной яркости дымки определяется следующей формулой:

$$S_M = \frac{\ln \frac{1}{\varepsilon}}{\alpha \left( 1 - \frac{\Delta\omega_{\text{пр}}}{4\pi} \cdot \frac{\sigma_0}{\alpha} \gamma_{0(0)} \right)}, \quad (3)$$

где  $\Delta\omega_{\text{пр}}$  — угол зрения приемника,  $\sigma_0$  — объемный коэффициент рассеяния,  $\gamma_{0(0)}$  — нормированный коэффициент рассеяния под углами, близкими к  $0^\circ$ .

При слабых помутнениях атмосферы ( $S_M > 5$  км) множитель в скобках в формуле (3) близок к единице и формула Кошмидера (1) дает достаточно правильный результат. Однако при слабых помутнениях результаты измерения МДВ теряют однозначность в связи с тем, что яркость фона неба, на котором рассматривается абсолютно черный объект, становится отличной от насыщенной яркости дымки, т. е. бесконечно протяженного горизонтального слоя атмосферы, за счет влияния на нее ряда факторов и в первую очередь собственной яркости облаков у линии горизонта.

Таким образом, мы пришли к выводу, что МДВ не является некой универсальной характеристикой прозрачности атмосферы. МДВ есть частный случай дальности видимости, когда объектом наблюдения является абсолютно черная поверхность. При этом следует подчеркнуть, что принципиальной разницы между дальностью видимости реальных объектов и дальностью видимости абсолютно черного объекта не существует. Различаются лишь их количественные характеристики, так как дальность видимости реальных объектов зависит от фотометрических свойств объекта.

Прозрачность же атмосферы является самостоятельной физической характеристикой оптического состояния атмосферы, определяющей только способность реальной атмосферы пропускать световое излучение. Количественная характеристика прозрачности атмосферы зависит от дистанции измерения. Более универсальной физической характеристикой оптического состояния атмосферы яв-

ляется показатель ослабления, который, как было указано, не равен МДВ.

В свете всего сказанного ранее необходимо уточнить определение таких величин, как «дальность видимости» и «метеорологическая дальность видимости».

Прежде всего следует подчеркнуть, что когда речь идет об измерении дальности видимости, то всегда имеется в виду, что существует реальный объект наблюдения, дальность видимости которого мы хотим измерить. Этими объектами могут быть реальные предметы на местности, аналог абсолютно черной поверхности, различные источники света. Количественная характеристика дальности видимости, вообще, без указания конкретного объекта наблюдения не существует. Следовательно, МДВ есть частная характеристика дальности видимости, предназначенная для практического использования при решении различных прикладных задач, например метеорологического обеспечения взлета и посадки самолетов, когда требуется знать дальность видимости взлетно-посадочной полосы (ВПП) и огней ВПП.

С учетом всего ранее сказанного можно рекомендовать следующее определение дальности видимости: дальностью видимости объекта называется то максимальное расстояние, на котором контраст этого объекта на окружающем фоне, измеряемый с помощью устройства с параметрами, аналогичными параметрам глаза, достигает при данном уровне яркости фона и угловых размерах объекта минимального (порогового) значения.

Численное значение порогового контраста должно регламентироваться установленными в соответствии с решаемой практической задачей нормами и стандартизованными зависимостями порогового контраста от яркости фона и угловых размеров объекта.

При разработке этих норм (констант) и стандартизованных зависимостей должны быть учтены осредненные характеристики человеческого глаза: порог контрастной чувствительности и вариации порога при выполнении различных зрительных задач, зависимость порога от яркости фона и угловых размеров объекта, спектральная чувствительность глаза, с целью максимального сближения результатов объективных измерений дальности видимости и визуальной оценки глазами потребителя этой информации, например пилота самолета.

Это определение дальности видимости включает в себя и тот случай, когда объектом наблюдения является абсолютно черное тело. Сохраняя традиционный термин — метеорологическая дальность видимости, — определение ее можно сформулировать следующим образом: МДВ называется то максимальное расстояние, на котором контраст абсолютно черной поверхности на фоне насыщенной (максимальной) яркости дымки, измеряемый с помощью устройства с параметрами, аналогичными параметрам глаза, достигает при данном уровне яркости фона и угловых размерах поверхности минимального (порогового) значения. Сравнивая

настоящее определение МДВ с предыдущим, мы видим, что принципиальной разницы в этих величинах нет, различие будет лишь в их количественных значениях. Вместе с тем эти определения дальности видимости не требуют каких-либо дополнительных оговорок для случаев измерения в сумерки и ночью. Так как значение порогового контраста зависит от яркости фона и угловых размеров объекта, а эти осредненные зависимости должны быть стандартизованы подобно кривой спектральной чувствительности глаза, то будет изменяться и дальность видимости при переходе от светлого времени суток к темному или при наблюдении объекта с малыми угловыми размерами. Это соответствует и фактическому положению дел. С уменьшением яркости фона дальность видимости предметов становится все меньше и меньше. Те определения МДВ для ночных условий, которые были приведены ранее, лишены какого-либо смысла, так как ночью несамосветящиеся предметы мы не видим, а МДВ не характеризует однозначно прозрачность атмосферы.

Использование в определении дальности видимости порогового контраста в качестве основного количественного критерия оправдано и тем, что при любых теоретических выводах формул дальности видимости (для различных случаев наблюдения) мы всегда независимо от вида исходных формул теории составляем уравнение контраста и далее, предполагая увеличение дистанции наблюдения, принимаем этот контраст равным пороговому значению, а предельную дистанцию наблюдения считаем равной дальности видимости объекта. Затем, решая уравнение, выводим формулу дальности видимости.

Визуальные наблюдения дальности видимости необходимо рассматривать как средство приближенной оценки дальности видимости объектов, средство ее аппроксимации, и использование методики визуальных наблюдений оправдано только относительной простотой этих наблюдений и отсутствием пригодной для широкого использования аппаратуры. Техника измерений дальности видимости будет совершенствоваться только путем создания специальных измерительных приборов, а не за счет улучшения методики визуальных наблюдений, поэтому определение дальности видимости должно содержать точные количественные критерии, которые позволят оценить погрешности измерений и сделать измерения сопоставимыми между собой.

Определение не должно строиться путем отражения процедуры визуальных наблюдений дальности видимости объекта, когда критерием отсчета являются такие нечеткие понятия, как «обнаружить объект», «различить», «опознать». Подобные критерии становятся бесполезными, если мы хотим на основе подобного определения создать приборную методику измерений. Вместе с тем определение величины, в данном случае дальности видимости, должно быть однозначным и не зависеть от какой-либо методики измерений.

В настоящее время в практике наблюдений за дальностью ви-

димости, для оценки МДВ ночью и в сумерки используются различные огни (чаще лампа 60 Вт). Для перехода от измеренной дальности видимости огня (светового ориентира) к МДВ используются специальные таблицы. Учитывая все сказанное ранее, необходимо сделать вывод, что подобная методика определения МДВ не пригодна для практического использования. Дальность видимости огня, как известно, зависящая от силы света огня, прозрачности атмосферы и яркости фона, на котором наблюдается огонь, означает лишь ту максимальную дистанцию, на которой огонь известной силы света при данной яркости фона и прозрачности атмосферы воспринимается еще как светящаяся точка. При этом яркость фона определяет величину минимальной (пороговой) освещенности на зрачке глаза, при которой источник еще воспринимается как светящаяся точка. Функция, определяющая связь пороговой освещенности на зрачке с яркостью фона, для условий наблюдения на аэродромах в настоящее время стандартизована ИКАО.

Современное состояние дел с измерениями дальности видимости на сети станций складывалось в течение ряда десятилетий, и, естественно, отказ от привычных представлений и изменение методики наблюдений связаны с большими трудностями, однако подобная перестройка отражает естественный процесс научного развития и совершенствования методики и средств наблюдений.

То, что МДВ широко внедрилась в практику наблюдений, было связано с тем, что эта характеристика представлялась универсальной и отождествлялась с однозначной оптической характеристикой атмосферы — прозрачностью, но величина МДВ была более наглядна, более осязаема. При решении вопроса о том, какая характеристика оптического состояния атмосферы должна будет измеряться в дальнейшем на сети ГМС вместо МДВ, может быть только одна рекомендация: показатель ослабления. Так как часть станций выдает информацию об опасных явлениях, в том числе и о дальности видимости, вопрос о содержании этой информации должен быть решен на основании анализа требований потребителей, главным образом авиации.

Если для определения показателя ослабления придется измерять прозрачность слоя атмосферы, которая, как известно, зависит от измерительной дистанции, необходимо для обеспечения единообразия измерений нормировать допустимый ряд дискретных измерительных дистанций и определить диапазоны показателя ослабления, в пределах которых нужно использовать ту или иную измерительную дистанцию. Необходимо также нормировать и периоды осреднения. Эти требования важны в связи с тем, что пространственная неоднородность помутнения исключительно велика [3]. Оценка погрешностей измерения показателя ослабления с помощью того или иного прибора, в основу которого положен любой измерительный способ, должна производиться путем сравнения результатов этих измерений с результатами образцовых измерений этой величины.

Показатель ослабления, эквивалентный некой величине  $S_M^{(k)}$  (формула (1)), которую мы до настоящего времени считали МДВ, будет иметь ту же значимость, что и другие метеоэлементы, наблюдаемые на станциях.

Показатель ослабления является точной оптической характеристикой атмосферы, и, следовательно, приборные измерения этого параметра могут быть более точными, чем измерения дальности видимости на сети ГМС в настоящее время. Можно ожидать, что показатель ослабления (при целесообразном осреднении) явится полезной характеристикой при контроле загрязнения атмосферы.

Действующая в настоящее время методика измерения видимости на сети не пригодна для измерения показателя ослабления. Визуально-инструментальные измерения с помощью прибора М53-А днем позволяют получить очень приблизительно величину фактической дальности видимости черного объекта, при ночных измерениях с помощью прибора М71 выдается величина, приблизительно эквивалентная прозрачности атмосферы. Взаимного согласования этих данных нет.

В заключение необходимо кратко остановиться на вопросе оценки погрешностей измерения МДВ. Во всех документах и статьях приводимые погрешности измерения МДВ получены расчетным путем на основании данных об абсолютной погрешности приборного измерения прозрачности атмосферы.

Расчет погрешностей производится по известной формуле

$$\frac{\Delta S_M^{(k)}}{S_M^{(k)}} = \frac{1}{\ln \frac{1}{\epsilon}} \cdot \frac{S_M^{(k)}}{L} \cdot \frac{\Delta T}{T}, \quad (4)$$

полученной из формулы (1).

Здесь  $\Delta S_M^{(k)}/S_M^{(k)}$  — относительная погрешность измерения МДВ,  $\Delta T$  — абсолютная погрешность измерения прозрачности  $T$ ,  $L$  — длина луча в атмосфере.

При расчете погрешностей по формуле (4) не учитываются погрешности, возникающие за счет пространственной неоднородности прозрачности атмосферы и за счет неточности формулы (1). Эти два фактора являются причиной возникновения значительных дополнительных погрешностей, которые мы в настоящее время не учитываем.

В табл. 1 представлены относительные погрешности измерения МДВ регистраторами прозрачности атмосферы, рассчитанные по формуле (4) для различных абсолютных погрешностей  $\Delta T$  при  $\epsilon = 0,05$ .

Если иметь в виду, что абсолютная погрешность измерения прозрачности с помощью современных фотометров типа РДВ-2 не превышает 2 %, то на основании данных табл. 1 можно сделать вывод, что мы действительно с высокой точностью измеряем дальность видимости. Непосредственная экспериментальная оценка ис-

Таблица 1

Значения относительной погрешности МДВ при различных значениях абсолютной погрешности измерения прозрачности

| $\Delta T \%$ | $S_M^{(k)} / L$ |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|               | 1               | 1,5  | 2    | 3    | 4    | 5    | 7,5  | 10   | 20   |
|               | $T \%$          |      |      |      |      |      |      |      |      |
|               | 5               | 13,6 | 22,4 | 36,9 | 47,3 | 55,0 | 67,1 | 74,1 | 86,1 |
| 2             | 13,3            | 7,3  | 5,9  | 5,4  | 5,6  | 6,0  | 7,4  | 9,0  | 15,5 |
| 3             | 20,0            | 11,0 | 8,9  | 8,1  | 8,4  | 9,0  | 11,1 | 13,5 | 23,3 |
| 4             | 26,6            | 14,6 | 11,8 | 10,8 | 11,2 | 12,0 | 14,8 | 18,0 | 31,0 |
| 5             | 33,0            | 18,2 | 14,7 | 13,5 | 14,0 | 15,0 | 18,5 | 22,5 | 38,7 |

точников погрешностей [3] показала, что точность измерений во много раз меньше той, которая указана в табл. 1.

Для улучшения качества информации о дальности видимости и показателе ослабления необходимо существенно усовершенствовать методику и средства измерений на сети метеорологических станций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горышин В. И. Теория горизонтальной дальности видимости при учете вклада многократного рассеяния.— Труды ГГО, 1977, вып. 384, с. 113—135.
2. Горышин В. И. Результаты экспериментальной проверки выводов усовершенствованной теории горизонтальной дальности видимости.— Труды ГГО, 1977, вып. 384, с. 136—142.
3. Горышин В. И., Аствацатуров С. Л. Некоторые статистические характеристики изменчивости горизонтальной прозрачности атмосферы.— Труды ГГО, 1977, вып. 384, с. 13—27.
4. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л., Гидрометеониздат, 1969, вып. 3, ч. 1.
5. Koschmieder H. Theorie der horisontalen Sichtweite. Beiträge zur Phys. der freien Atmosphäre, 1926, Bd XII, H. 1.
6. The Guide to Meteorological Instrument and Observing Practices, 1970, WMO, N 8, Tp. 3.

*В. И. Горышин*

## **О СТАНДАРТИЗАЦИИ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ**

Измерения дальности видимости в метеорологии развивались таким образом, что на определенном этапе основным способом оценки дальности видимости были визуальные наблюдения. Это положение нашло отражение как в самом определении понятия «дальность видимости», так и в том, что до настоящего времени четко не определены требования к параметрам приборов, предназначенных для измерения дальности видимости.

Повышение качества информации о дальности видимости возможно только путем совершенствования инструментальных измерений. Нет сомнения в том, что любой способ и прибор, предназначенные для измерения дальности видимости в любых условиях, должны выдавать однозначный ответ. Однако сравнение результатов измерения дальности видимости, полученных с помощью различных приборов и способов, показывает значительный разброс измеренных значений дальности видимости. Одной из причин этого положения является то, что основные характеристики приборов, измеряющих дальность видимости, и зависимости между величинами, используемые при расчете шкал приборов, не нормированы.

Для обеспечения единообразия инструментальных измерений дальности видимости и показателя ослабления необходимо нормировать определенные характеристики приборов. Следует сделать это и потому, что измерения оптических характеристик атмосферы сложны и осуществляются в среде, сильно изменчивой в пространстве и времени.

В настоящее время при инструментальных измерениях дальности видимости для нужд авиации нормируются только две характеристики: порог контрастной чувствительности глаза, точнее значение минимального контраста, и период осреднения измеряемой дальности видимости.

Известно, что при визуальной оценке дальности видимости существуют две достаточно определенные зрительные задачи: первая — определение момента потери видимости предмета, когда

контраст предмета уменьшается и достигает того минимального значения, при котором мы еще различаем контуры предмета, и вторая — определение момента обнаружения минимально различимого контраста предмета при возрастании этого контраста. Существуют и другие зрительные задачи, например узнавания, ясного видения, различения деталей объекта. Но неопределенность этих понятий приводит к тому, что экспериментальная оценка минимальных контрастов, соответствующих этим зрительным задачам, дает очень разнородный материал.

Существует очень большое количество работ, посвященных изучению в лабораторных условиях порога контрастной чувствительности глаза [6, 7, 9, 11 и др.] и его зависимости от различных факторов. Начало этих исследований относится к 60-м годам 19 ст., когда был сформулирован закон Вебера—Фехнера. Некоторые авторы изучали порог контрастной чувствительности глаза в полевых условиях [2, 3, 8, 10].

Анализ материалов, посвященных исследованию значений порога контрастной чувствительности глаза и его зависимости от различных факторов (зрительной задачи, окружающего фона, угловых размеров предмета, наличия побочных факторов раздражения, состояния наблюдателя и др.), показывает, что этот параметр глаза очень изменчив и попытки найти наиболее правильное значение порога, пригодное для всестороннего решения проблемы дальности видимости, лишены смысла.

Учитывая значительную изменчивость порога, необходимо нормировать средние статистические значения порога контрастной чувствительности глаза, т. е. вероятностные значения, для двух зрительных задач, а именно значения минимально различаемого контраста при наблюдении уменьшающегося контраста и при наблюдении возрастающего, начиная от предпороговых значений контраста.

Известно, что спектральная чувствительность глаза также подвержена значительным колебаниям, однако в настоящее время мы имеем нормированную характеристику спектральной чувствительности глаза, принятую Международной комиссией по освещенности.

Так как измерения дальности видимости связаны только с решением частных практических задач, например, обеспечения данными о дальности видимости объектов и огней при взлете и посадке самолетов или при плавании судов в прибрежной зоне, то каждый потребитель информации о дальности видимости должен определить (нормировать) коэффициент надежности (запаса), на который следует умножить нормированное значение минимального порога. При такой операции потребитель преследует одну цель: измеренные инструментально значения дальности видимости в любых условиях не должны быть более тех, которые может наблюдать потребитель, находясь в самых неблагоприятных условиях.

В настоящее время ИКАО рекомендовала использовать при расчете дальности видимости для обеспечения взлета и посадки

самолетов значение минимального контраста, равное 0,05. Значение 0,05 включает определенный коэффициент запаса и не соответствует наиболее вероятному значению порога контрастной чувствительности глаза, о чем прямо сказано в циркуляре ИКАО [5].

В свете сказанного трудно понять резолюцию 7/1 Седьмой сессии Комиссии по приборам и методам наблюдения ВМО о том, что значение порога контрастной чувствительности глаза, равное 0,05, может и не быть оптимальным для достижения приблизительного равенства между метеорологической дальностью видимости (МДВ) и наблюдаемой дальностью видимости днем, поэтому надо продолжить поиск этого оптимального значения.

Так как критерий выбора значения 0,05 отличается от критерия определения наиболее вероятного значения порога, то этот поиск не будет успешным. По мере совершенствования инструментальных измерений дальности видимости коэффициент запаса будет уменьшаться, что будет определять потребитель, а нормированные минимальные значения порога для двух зрительных задач будут неизменны, так как неизменны и характеристики среднего статистического глаза.

Первый этап внедрения инструментальных измерений дальности видимости на аэродромах фактически и отражал попытки выбора того или иного коэффициента запаса при решении вопроса о значении порога. Был период, когда во Франции использовался порог 0,07, в США 0,055, в СССР 0,035, в некоторых странах 0,02.

Известно, что порог контрастной чувствительности глаза зависит от яркости фона, на котором наблюдается предмет, и от угловых размеров объекта. До настоящего времени влияние яркости фона на значение порога мы не учитывали при измерениях дальности видимости, считая порог неизменным как днем, так и ночью, что в определенной степени было связано с тем, что МДВ воспринималась как однозначная характеристика прозрачности атмосферы. Влияние угловых размеров объекта исключалось тем, что в самом определении МДВ существовало ограничение минимально допустимого углового размера объекта (не менее  $20'$ ). Неучет влияния яркости фона на значение порога контрастной чувствительности глаза приводит к ошибочным измерениям в сумерки, а также при низких и высоких уровнях яркости фона.

На рис. 1 представлены графики зависимости порогового контраста  $K_{\text{пор}}$  от яркости фона  $B_{\text{ф}}$  для трех угловых размеров объекта. Из рисунка видно, что пороговый контраст остается относительно неизменным в ограниченном диапазоне яркостей. Зависимость порогового контраста от яркости и угловых размеров объекта достаточно устойчива и должна быть нормирована. Для автоматических расчетов на ЭВМ необходимо дать аппроксимационные формулы, например, подобно той, которая была предложена в работе [11] для зависимости порогового контраста от угловых размеров объекта,

$$(K_{\text{пор}} - \varepsilon) \gamma^2 = \delta^2, \quad (1)$$

где  $K_{\text{пор}}$  — наименьший воспринимаемый контраст при данных уг-

ловых размерах объекта  $\gamma$ ,  $\epsilon$  — порог контрастной чувствительности глаза при больших угловых размерах объекта (нормированный порог),  $\delta$  — острота зрения глаза.

Таким образом, в определенном диапазоне яркостей мы будем использовать нормированное значение порога, за пределами этого диапазона значение порога должно вычисляться по принятой ап-

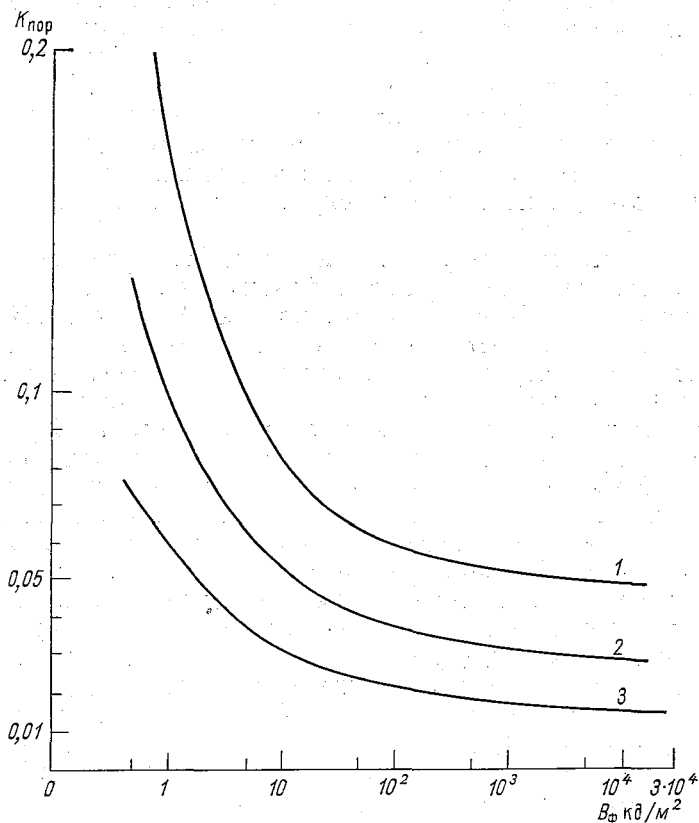


Рис. 1. Зависимость порога контрастной чувствительности глаза от яркости фона при различных угловых размерах объекта (по данным работы [11]).

1 — угловой размер объекта 31'; 2 — 56', 3 — 2'14'.

проксимационной формуле. При решении задачи определения дальности видимости объекта с малыми угловыми размерами должна учитываться нормированная зависимость порогового контраста от угловых размеров.

Возможен и другой путь решения задачи. По результатам измерения яркости фона определяем в соответствии с нормированной зависимостью порогового контраста от яркости фона значение порогового контраста и умножаем это значение на коэффициент запаса. Этот результат будет верен для объектов с угловыми

размерами не менее установленных, при меньших угловых размерах производится уточнение результата по принятой зависимости.

Разработка рекомендаций о целесообразных периодах осреднения при инструментальных измерениях дальности видимости зависит в первую очередь от результатов исследования спектров временной и пространственной изменчивости дальности видимости, которые мы пока знаем плохо, и от тех практических задач, для которых нужна информация о дальности видимости.

В настоящее время для инструментальных измерений дальности видимости для нужд авиации период осреднения нормирован и равен 30—60 с. Вопрос о целесообразном и научно обоснованном осреднении дальности видимости при инструментальных измерениях для решения тех или иных практических задач разработан еще недостаточно, но в любом случае измерений этот параметр должен быть нормирован.

Для того чтобы инструментальные измерения дальности видимости достаточно точно отражали фактическое состояние дальности видимости, необходимо, чтобы кривая относительной спектральной чувствительности прибора была подобна по форме кривой относительной спектральной чувствительности глаза, а максимум спектральной чувствительности располагался в области 550 нм, т. е. необходимо нормировать эту характеристику прибора.

Хотя это требование вполне очевидно, выполняется оно далеко не всегда. Во многих случаях инструментальных измерений дальности видимости, особенно при использовании импульсных и лазерных источников света, относительная спектральная чувствительность прибора не соответствует требуемой. Это является причиной появления дополнительных погрешностей измерения, незначительных при измерениях в тумане и заметных при измерениях в дымах.

Для оценки достижимой точности соответствия кривой относительной спектральной чувствительности прибора кривой относительной спектральной чувствительности глаза нами были рассчитаны корректирующие фильтры для случая, когда кривая относительной спектральной чувствительности мультищелочного катода нам была точно известна. Так как реальная спектральная чувствительность фотокатода может варьировать, были рассчитаны кривые относительной спектральной чувствительности прибора при тех же корректирующих фильтрах, но при смещении максимума чувствительности фотокатода в пределах 450—550 нм. Результаты расчета представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что максимум относительной спектральной чувствительности прибора смещается незначительно, в пределах 550—560 нм, хотя сама кривая заметно смещается относительно кривой спектральной чувствительности глаза. Учитывая то, что кривые спектральной чувствительности глаза для отдельных наблюдателей имеют аналогичный разброс, полученный результат согласования кривых следует признать удовлетворительным. В качестве корректирующих фильтров были использованы стекла ЖЗС-18 толщиной 2,6 мм и ЖС-11 толщиной 4 мм.

В заключение необходимо остановиться на вопросе нормирования дистанций пространственного осреднения измеряемых оптических характеристик при инструментальных измерениях дальности видимости и показателя ослабления.

Если бы мы имели в распоряжении образцовые средства измерения дальности видимости объектов и показателя ослабления, то, вероятно, нормировать дистанции осреднения было бы не обязательно. Однако образцовых средств измерения в настоящее время нет. Кроме того, достоверно известно, что правильное значение оптической характеристики можно получить при инструменталь-

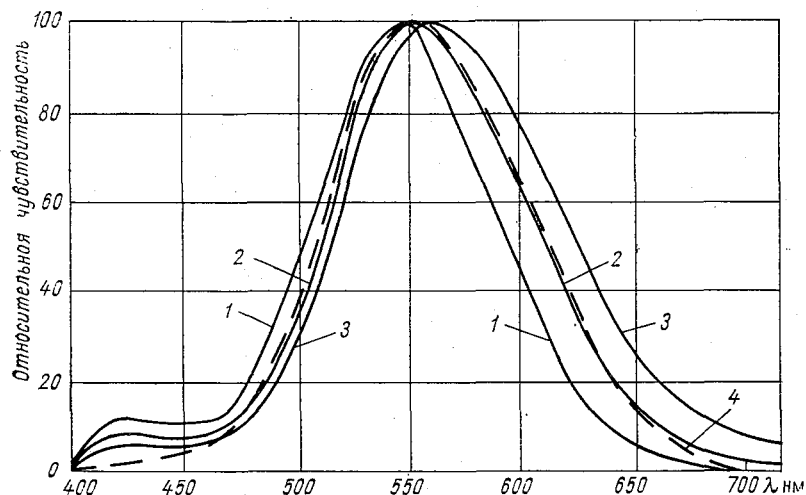


Рис. 2. Кривые относительной спектральной чувствительности прибора при смещении максимума спектральной чувствительности мультищелочного фотокатода.

1 — при максимуме спектральной чувствительности фотокатода на длине волны 450 нм, 2 — то же на длине волны 500 нм, 3 — то же на длине волны 550 нм, 4 — кривая относительной спектральной чувствительности глаза.

ных измерениях только тогда, когда пространственное осреднение осуществляется на предельно больших дистанциях, например, равных измеряемой дальности видимости. В противном случае возникают очень большие ошибки в оценке дальности видимости и показателя ослабления из-за неоднородности помутнения атмосферы. Так как использование предельных дистанций при каждом измерении практически неосуществимо, необходимо разработать рекомендации, которые определили бы дискретный ряд дистанций пространственного осреднения и соответствующий им ряд значений дальности видимости и показателя ослабления, которые можно измерять при той или иной дистанции осреднения. Это позволит свести к максимуму ошибки инструментальных измерений дальности видимости и показателя ослабления и получить сопоставимые между собой результаты инструментальных измерений, выполненных различными приборами и способами. Для доказательства

того, что указанные погрешности очень велики, приведем результаты исследования сходимости показаний двух приборов РДВ-2 с базами 100 и 50 м (табл. 1). Приборы РДВ-2 были установлены рядом в одном пункте.

Таблица 1

Доля (%) различных градаций расхождений значений МДВ, измеренных двумя приборами РДВ-2 с базами 50 и 100 м

| Метеоявление                                  | Градации расхождений, % |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------------------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|
|                                               | 0—10                    | 0—20 | 0—30 | 0—40 | 0—50 | 0—60 | 0—70 |
| Снегопады<br>при МДВ 200—<br>3000 м . . . . . | 49,7                    | 74,4 | 86,5 | 92,2 | 96,4 | 98,7 | 99,4 |
| при МДВ 200—<br>1000 м . . . . .              | 58,0                    | 86,7 | 96,0 | 99,0 | 100  | —    | —    |
| Туманы . . . . .                              | 34,0                    | 62,3 | 80,7 | 93,4 | 96,7 | 97,6 | 98,1 |
| Дымки . . . . .                               | 23,4                    | 55,9 | 77,8 | 90,9 | 100  | —    | —    |

Материалы табл. 1 наглядно подтверждают значимость такой характеристики, как дистанция пространственного осреднения. Для проверки достоверности данных табл. 1 были произведены синхронные измерения МДВ двумя приборами РДВ-2 с общей измерительной базой 100 м. В этом случае наблюдалась полная сходимость показаний приборов.

Стандартизация рассмотренных характеристик позволит повысить качество инструментальных измерений дальности видимости и показателя ослабления. Однако необходимо провести еще большую работу по разработке количественных норм, утверждению этих норм и внедрению их в практику измерений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болдырев Н. Г. Дальность видимости реальных объектов.— Труды ГГО, 1950, вып. 19 (81).
2. Болдырев Н. Г., Бартенева О. Д. Определение метеорологической дальности видимости по контрастам удаленных объектов.— Труды ГГО, 1953, вып. 42, с. 32—51.
3. Гаврилов В. А. Видимость в атмосфере.— Л.: Гидрометеиздат, 1966.— 324 с.
4. Кравков С. В. Глаз и его работа.— М.: Изд. АН СССР, 1950.— 531 с.
5. Практика наблюдений за дальностью видимости на ВПП и передача сообщений о ней.— Циркуляр ИКАО, 1973, 113-А.
6. Теплов Б. М. Пороги различия светлоты при разном окружении.— Психология, 1932, № 3.
7. Aubert H. Physiologie der Netzhaut. 1865. Breslau.
8. Foitzin L. Über der Kontrastschwelle des Auges in bezug des Sichtproblem. Beiträge zur definierten Bestimmung des Tagesweite 1951. Akad. Verl. Berlin.
9. Koenig A. Gesammelte Abhandlungen zur Physiologischen Optik. 1903. Leipzig.
10. Middleton W. E. K. Vision through the atmosphere 1952. University of Toronto press.

Г. П. Гущин, П. А. Александров, Е. Т. Васильева

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЭРОЗОЛЬНОГО ПОМУТНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ В ЛЕНИНГРАДЕ И ЕГО ПРИГОРОДЕ

Влияние большого города на прозрачность всей толщи атмосферы исследовалось путем синхронных наблюдений за спектральной прозрачностью одинаковыми приборами — фильтровыми фотометрами М-83 [1], установленными в Ленинграде и его пригороде в течение 1975—1978 гг. Прибор М-83 выделяет шесть участков спектра с центрами 344, 369, 463, 530, 572 и 627 нм (помимо двух более коротковолновых участков, используемых для измерения суммарного озона). Один прибор, М-83 № 69, был установлен в Воейково (научно-экспериментальная база Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова), в 14 км от границы города Ленинграда. Другой прибор, М-83 № 9, был установлен во дворе ГГО, расположенной в северо-восточной части г. Ленинграда, примерно в 30 км от первого прибора.

Прибор М-83 № 9 до установки в Ленинграде был привязан к прибору № 69 в Воейково. Смысл привязки заключался в нахождении значений внеатмосферных постоянных градуируемого прибора по значениям этих постоянных эталонного прибора (в данном случае прибора М-83 № 69) для всех шести светофильтров. Привязка осуществлялась в Воейково путем синхронных наблюдений за спектральной прозрачностью атмосферы по прямому солнечному свету, когда оба прибора находились в нескольких метрах друг от друга. Прибор М-83 № 69 был заранее отградуирован в соответствии с действующими методическими указаниями [2]. Согласно [2], спектральный показатель аэрозольного ослабления атмосферы (или иначе оптическая плотность слоя аэрозолей) для прибора М-83 № 69 равен

$$\delta_{\lambda} = \frac{I_{\lambda, 0} - I_{\lambda}}{m} - \beta_{\lambda} - \Omega_{a\lambda}, \quad (1)$$

где  $I_{\lambda, 0} = \lg S_{\lambda, 0}$  — внеатмосферная постоянная прибора;  $I_{\lambda} = \lg S_{\lambda}$ ;  $S_{\lambda, 0}$  и  $S_{\lambda}$  — прямая солнечная радиация с длиной волны

Значения  $(l'_{\lambda, i} - l_{\lambda, i})$  в период градуировки прибора М-83 № 9, Воейково

| $\lambda_{\text{тах}} \text{ нм}$ |     |     |     |     |     |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 344                               | 369 | 530 | 463 | 572 | 627 |

2 апреля 1977 г.

|       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| -0,10 | -0,19 | -0,26 | -0,05 | -0,41 | -0,51 |
| -0,05 | -0,15 | -0,24 | -0,02 | -0,36 | -0,45 |
| -0,08 | -0,18 | -0,26 | -0,06 | -0,41 | -0,47 |
| -0,16 | -0,33 | -0,23 | -0,07 | -0,41 | -0,49 |
| -0,12 | -0,20 | -0,24 | -0,07 | -0,39 | -0,46 |
| -0,12 | -0,20 | -0,26 | -0,05 | -0,38 | -0,45 |
| -0,12 | -0,20 | -0,26 | -0,08 | -0,38 | -0,45 |

17 мая 1977 г.

|       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| -0,05 | -0,13 | -0,20 | 0,00  | -0,34 | -0,43 |
| -0,06 | -0,13 | -0,19 | 0,00  | -0,32 | -0,42 |
| -0,06 | -0,13 | -0,18 | +0,01 | -0,32 | -0,41 |
| -0,07 | -0,13 | -0,17 | +0,02 | -0,29 | -0,35 |
| -0,09 | -0,16 | -0,20 | 0,00  | -0,37 | -0,43 |
| -0,07 | -0,16 | -0,21 | -0,03 | -0,38 | -0,41 |
| -0,06 | -0,17 | -0,24 | -0,02 | -0,36 | -0,41 |
| -0,07 | -0,14 | -0,19 | -0,01 | -0,35 | -0,38 |
| -0,08 | -0,14 | -0,18 | -0,01 | -0,34 | -0,39 |
| -0,06 | -0,15 | -0,20 | 0,00  | -0,35 | -0,40 |
| -0,06 | -0,16 | -0,19 | -0,01 | -0,37 | -0,40 |
| -0,06 | -0,14 | -0,18 | -0,01 | -0,35 | -0,38 |

3 июня 1977 г.

|       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| -0,11 | -0,19 | -0,25 | -0,07 | -0,40 | -0,46 |
| -0,12 | -0,21 | -0,29 | -0,11 | -0,45 | -0,49 |
| -0,11 | -0,21 | -0,25 | -0,09 | -0,43 | -0,46 |
| -0,14 | -0,22 | -0,28 | —     | -0,41 | —     |
| -0,12 | -0,16 | -0,26 | -0,07 | -0,55 | -0,49 |
| -0,10 | -0,11 | -0,26 | -0,08 | -0,41 | -0,47 |
| -0,09 | -0,18 | -0,24 | -0,07 | -0,41 | -0,46 |
| -0,11 | -0,20 | -0,25 | -0,06 | -0,41 | -0,46 |
| -0,11 | -0,19 | -0,24 | —     | -0,39 | -0,44 |
| —     | -0,17 | -0,24 | +0,02 | —     | -0,40 |
| -0,11 | -0,12 | -0,24 | -0,08 | -0,40 | -0,46 |
| -0,11 | -0,13 | -0,24 | -0,08 | -0,41 | -0,44 |
| -0,14 | -0,15 | -0,28 | -0,09 | -0,43 | -0,46 |
| -0,09 | -0,17 | -0,23 | -0,04 | -0,39 | -0,44 |

на верхней границе атмосферы и на поверхности земли соответственно;  $\beta_\lambda$  — показатель рэлеевского рассеяния атмосферы;  $\Omega$  — суммарный озон;  $\alpha_\lambda$  — показатель поглощения озона.

Для прибора М-83 № 9 синхронное значение спектрального показателя аэрозольного ослабления атмосферы определяется выражением

$$\delta_\lambda = \frac{l'_{\lambda, 0} - l'_\lambda}{m} - \beta_\lambda - \Omega_{\alpha\lambda}. \quad (2)$$

Приравнивая правые части соотношений (1) и (2), получим

$$l_{\lambda, 0} - l_\lambda = l'_{\lambda, 0} - l'_\lambda, \quad (3)$$

откуда

$$l'_{\lambda, 0} = l_{\lambda, 0} + (l'_\lambda - l_\lambda). \quad (4)$$

Если произведено  $n$  синхронных наблюдений, то формула (4) для определения значения внеатмосферной постоянной приобретает вид

$$\bar{l}'_{\lambda, 0} = l_{\lambda, 0} + \frac{\sum_{i=1}^n (l'_{\lambda, i} - l_{\lambda, i})}{n}. \quad (5)$$

Обработка данных привязочных наблюдений по приборам М-83 № 69 и 9 производилась по формуле (5). В табл. 1 приводятся результаты обработки данных градуировочных наблюдений, произведенных в апреле—июне 1977 г. Результаты расчета  $l'_{\lambda, 0}$  для прибора М-83 № 9 приведены в табл. 2. Значения  $l_{\lambda, 0}$  и  $l'_{\lambda, 0}$ , приведенные в табл. 2, использовались для расчета синхронных значений показателей аэрозольного ослабления атмосферы, измеренных в Воейково и ГГО. При этом применялись формулы (1) и (2).

Таблица 2

Значения постоянных  $l_{\lambda, 0}$ ,  $l'_{\lambda, 0}$  по приборам М-83 № 69 и 9

|                                         | Номер светсфилтра |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                         | 3                 | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
|                                         | Длина волны, нм   |       |       |       |       |       |
|                                         | 344               | 369   | 530   | 463   | 572   | 627   |
| $l_{\lambda, 0}$ (№ 69)                 | 1,98              | 3,25  | 2,73  | 3,19  | 2,97  | 1,49  |
| $(l'_{\lambda, i} - l_{\lambda, i})$ ср | —0,09             | —0,17 | —0,23 | —0,04 | —0,39 | —0,44 |
| $l'_{\lambda, 0}$ (№ 9)                 | 1,89              | 3,08  | 2,50  | 3,15  | 2,58  | 1,05  |

Приведем некоторые результаты синхронных измерений атмосферной мутности в г. Ленинграде и Воейково.

На рис. 1 приведена зависимость значений показателя аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_\lambda$  для  $\lambda = 463$  и  $\lambda = 369$  нм от высоты Солнца  $\theta$  (соответствующей времени наблюдений), измеренных синхронно в первой половине дня 15 июня 1977 г. в Воейково и Ленинграде. Как видно из рисунка, значения  $\delta_\lambda$  соответствуют средним условиям аэрозольного замутнения атмосферы и в Ленинграде (ГГО) в основном заметно превышают соответствующие значения в Воейково.

На рис. 2 приведены значения  $\delta_\lambda$  для  $\lambda = 530$  нм, полученные 16 VI 1977 г. в Воейково и Ленинграде. Условия наблюдений

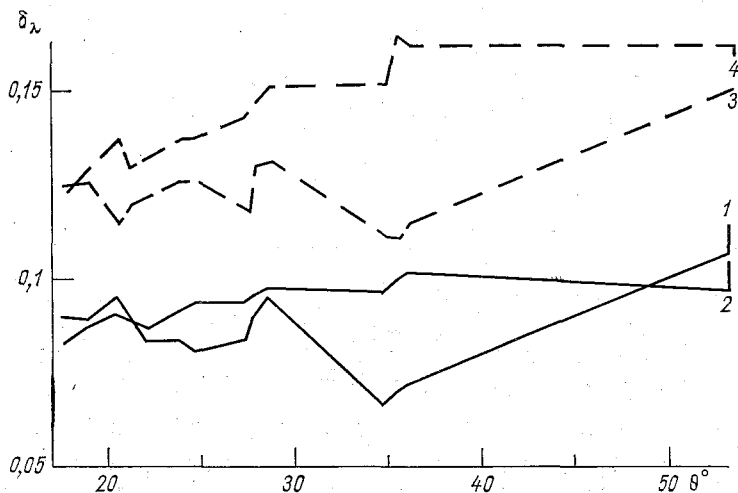


Рис. 1. Показатель аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_\lambda$  в зависимости от высоты Солнца  $\theta$  15 VI 1977 г.

1 — Воейково,  $\lambda=463$  нм; 2 — Ленинград (ГГО),  $\lambda=369$  нм; 3 — Воейково,  $\lambda=530$  нм; 4 — Ленинград (ГГО),  $\lambda=530$  нм.

в Ленинграде соответствовали повышенным значениям атмосферной мутности. Из рис. 2 следует, что спектральная мутность атмосферы в Ленинграде значительно превышала таковую в Воейково.

На рис. 3 и 4 даны синхронные значения  $\delta_\lambda$  в Воейково и Ленинграде, полученные в условиях хорошей прозрачности атмосферы ( $\delta_\lambda < 0,05$ ) для длин волн 369, 530, 572 и 627 нм 18 июня 1977 г. Как видно из рис. 3 и 4, значения аэрозольной мутности в Ленинграде заметно превышают таковые в Воейково для всех указанных длин волн.

Из изложенного можно сделать следующие предварительные выводы:

1. Большой город оказывает заметное влияние на прозрачность атмосферы. В ближней ультрафиолетовой и видимой областях спектра показатель аэрозольного ослабления атмосферы в городе в 1,5—2 раза превышает значение этого показателя в пригороде.

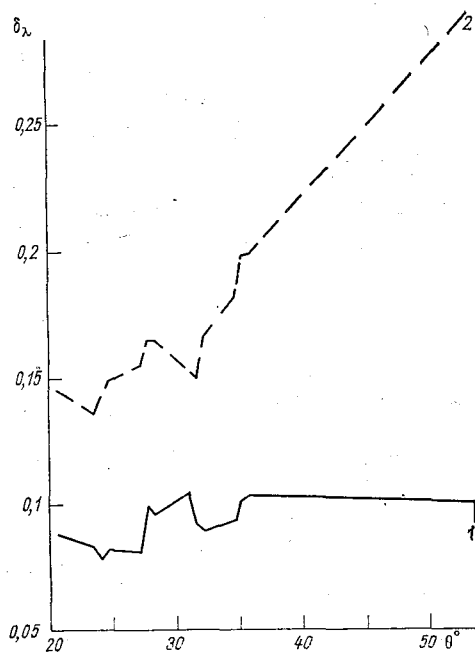


Рис. 2. Показатель аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_\lambda$  в зависимости от высоты Солнца  $\theta$  16 VI 1977 г.,  $\lambda=530$  нм.

1 — Воейково, 2 — Ленинград (ГГО).

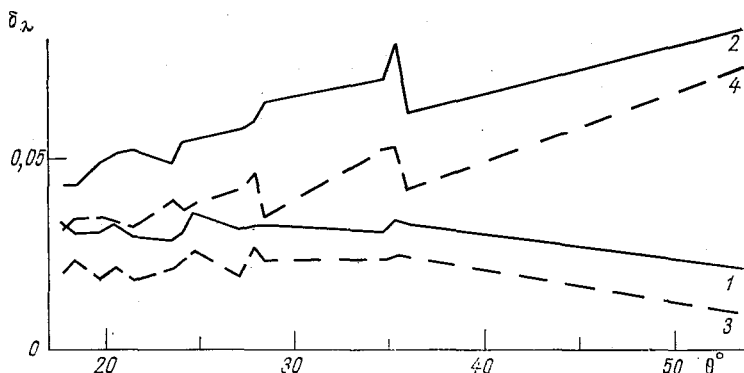


Рис. 3. Показатель аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_\lambda$  в зависимости от высоты Солнца  $\theta$  18 VI 1977 г.

1 — Воейково,  $\lambda=369$  нм; 2 — Ленинград,  $\lambda=369$  нм; 3 — Воейково,  $\lambda=530$  нм; 4 — Ленинград,  $\lambda=530$  нм.

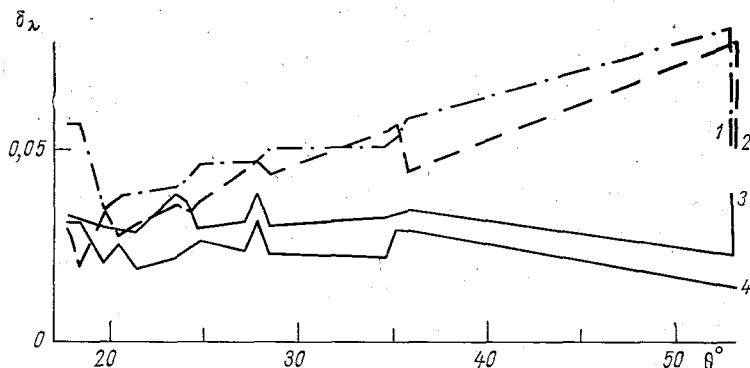


Рис. 4. Показатель аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_\lambda$  в зависимости от высоты Солнца  $\theta$  18 VI 1977 г.

1 — Воейково,  $\lambda=627$  нм; 2 — Ленинград,  $\lambda=627$  нм; 3 — Воейково,  $\lambda=572$  нм; 4 — Ленинград,  $\lambda=572$  нм.

2. Повышенная мутность атмосферы в городе по сравнению с мутностью в пригороде наблюдается в условиях низкой, средней и высокой прозрачности атмосферы.

3. Для получения статистически обеспеченных выводов о влиянии большого города на спектральную прозрачность всей толщи его атмосферы целесообразно продолжить наблюдения по разработанной методике и программе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 367375 (СССР). Измеритель спектральной прозрачности атмосферы/ Г. П. Гушин.— Заявл. 12.07.71, № 1678102/18—10; опубл. 23.01.73.— Бюлл. открытий, изобрет. и промышленных образцов и товарн. знаков, № 8, 1973.
2. Методические указания по производству и обработке наблюдений за спектральной прозрачностью атмосферы и характеристиками атмосферных аэрозолей/Сост. Г. П. Гушин.— Л.: Гидрометеиздат, 1972.— 53 с.

*Г. П. Гущин, М. П. Жукова, С. А. Соколенко*

## РАСЧЕТ ОСЛАБЛЕНИЯ СВЕТА АЭРОЗОЛЬНЫМ СЛОЕМ АТМОСФЕРЫ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Закономерность прохождения прямого солнечного света через всю толщу атмосферы в ближней и далекой ультрафиолетовой (УФ) области спектра (200—400 нм) описывается формулой Бугера

$$S_{\lambda} = S_{0\lambda} 10^{-(\mu_{\Omega\lambda} + m\beta_{\lambda} + m_1\delta_{\lambda})}, \quad (1)$$

где  $S_{0\lambda}$  и  $S_{\lambda}$  — прямая солнечная радиация с длиной волны  $\lambda$  до вхождения и после прохождения атмосферы соответственно;  $\mu$ ,  $m$  и  $m_1$  — оптические массы озона, атмосферы и аэрозоля соответственно;  $\Omega$  — суммарный озон,  $\beta_{\lambda}$  — показатель рэлеевского рассеяния атмосферы и  $\delta_{\lambda}$  — показатель аэрозольного ослабления атмосферы. Из формулы (1) следует, что в указанной области спектра колебания ослабления света определяются в основном двумя переменными компонентами — суммарным озоном  $\Omega$  и показателем аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_{\lambda}$ , из которых наименее известен показатель  $\delta_{\lambda}$ .

Некоторые весьма ограниченные сведения об ослаблении УФ излучения аэрозольным слоем атмосферы приводятся в работах [1, 3, 4, 5]. Из этих сведений невозможно составить определенного представления о зависимости показателя аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_{\lambda}$  от длины волны  $\lambda$ . Экспериментальные данные о величине  $\delta_{\lambda}$  в ультрафиолетовой области спектра приводятся в единичных работах [1, 2, 3], причем прямые измерения этой величины в области сильного озонного поглощения (200—300 нм) полностью отсутствуют.

В то же время известно, что знания величины  $\delta_{\lambda}$  и ее зависимости от длины волны необходимы при расчете режима УФ радиации [5] при оценке точности измерения суммарного озона [1] и УФ радиации [5] и для ряда других задач, связанных с радиационным и тепловым режимами атмосферы.

В настоящей работе приводятся результаты теоретических расчетов значения показателя аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_{\lambda}$  в области спектра 200—400 нм на основе нескольких моделей распределения аэрозольных частиц по размерам.

Расчет величины  $\delta_\lambda$  производился по формуле Ми [4]

$$\delta_\lambda = 0,434 \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 n K f(r) dr, \quad (2)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  — соответственно наименьший и наибольший радиусы аэрозольных частиц в вертикальном столбе атмосферы единичного сечения,  $n$  — счетная концентрация аэрозольных частиц,  $K$  — фактор эффективности ослабления,  $f(r)$  — функция распределения аэрозольных частиц по размерам в вертикальном столбе атмосферы единичного сечения. Были использованы три следующих вида функции распределения аэрозольных частиц по размерам:

1) распределение типа Юнге [5]

$$f(r) = cr^{-n}, \quad (3)$$

где  $c$  и  $n$  — параметры функции распределения;

2) распределение типа Гаусса [1, 4]

$$f(r) = N_m e^{-c_1 \left( \lg \frac{r}{r_m} \right)^2}, \quad (4)$$

где  $N_m$ ,  $c_1$  и  $r_m$  — параметры функции распределения;

3) распределение, найденное экспериментально в приземном слое [5] и экстраполированное на всю толщу атмосферы (табл. 1). При этом в табл. 1 варианты 1 и 2 — осредненные данные, полученные в результате наблюдений за атмосферными аэрозолями во Франкфурте-на-Майне; вариант 3 — модель распределения частиц атмосферных аэрозолей по размерам над континентом; вариант 4 — то же, что и вариант 3, над океаном [6].

При расчетах всех трех видов функции распределения применяли фактор эффективности рассеяния  $K$  в формуле (2), найденный для двух характерных значений коэффициента преломления  $m$ , равных  $1,33 \pm i0$  и  $1,50 \pm i0$  [4]. Расчет величины  $\delta_\lambda$  в УФ области спектра производился без учета поглощения света аэрозольными частицами.

При расчете  $\delta_\lambda$  с использованием функции распределения типа Юнге (3) принимали, что параметр  $n$  равен 3,5; 4,0; 4,5; 5,0, значения  $r_1$  в формуле (2) изменяются от 0,02 до 0,20 мкм,  $r_2 = 20$  мкм, а параметр  $c$  изменяется от  $10^{-8}$  до  $10^{-6}$  см. В табл. 2 в качестве примера приводятся значения  $\delta_\lambda$ , рассчитанные по формулам (2) и (3) при  $n = 4$ ,  $c = 10^{-6}$  см, значения  $r_1$ , изменяющиеся от 0,02 до 0,20 мкм, для  $\lambda$ , равных 200, 220, ..., 400 нм, и  $m$ , равных 1,33 и 1,50. Из табл. 2 следует, что для одних и тех же значений  $n$ ,  $c$ ,  $r_1$  и  $\lambda$  значения  $\delta_\lambda$  при  $m = 1,50$  больше, чем при  $m = 1,33$ . С увеличением  $\lambda$  и  $r_1$  происходит уменьшение величины  $\delta_\lambda$ .

При расчете величины  $\delta_\lambda$  с использованием функции распределения типа Гаусса (4) брали следующие значения параметров этой функции:  $N_m = 10^7$  см $^{-3}$ ,  $c_1 = 5$ , 10 и 50,  $r_m = 0,06$ ; 0,1; 0,15; 0,20 мкм.

Таблица 1

Распределение аэрозольных частиц по размерам  $dN/d \lg r$ .  
Экспериментальные данные [6]

| $r$ мкм | Вариант распределения |                      |                      |                      |
|---------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|         | 1                     | 2                    | 3                    | 4                    |
| 0,01    | $2,1 \cdot 10^4$      | $2,1 \cdot 10^3$     | $9 \cdot 10^3$       | $3,8 \cdot 10$       |
| 0,02    | $2,8 \cdot 10^4$      | $4,8 \cdot 10^3$     | $1,3 \cdot 10^4$     | $2,0 \cdot 10^2$     |
| 0,04    | $2,8 \cdot 10^4$      | $5,8 \cdot 10^3$     | $1,5 \cdot 10^4$     | $2,4 \cdot 10^2$     |
| 0,05    | $2,5 \cdot 10^4$      | $3,5 \cdot 10^3$     | $1,3 \cdot 10^4$     | $2,0 \cdot 10^2$     |
| 0,06    | $2,0 \cdot 10^4$      | $2,5 \cdot 10^3$     | $1,2 \cdot 10^4$     | $1,9 \cdot 10^2$     |
| 0,08    | $1,2 \cdot 10^4$      | $1,0 \cdot 10^3$     | $8,2 \cdot 10^3$     | $1,4 \cdot 10^2$     |
| 0,10    | $6,0 \cdot 10^3$      | $4,5 \cdot 10^2$     | $6 \cdot 10^3$       | $1,0 \cdot 10^2$     |
| 0,15    | $1,9 \cdot 10^3$      | $1,4 \cdot 10^2$     | $1,9 \cdot 10^3$     | $3,5 \cdot 10$       |
| 0,20    | $8,0 \cdot 10^2$      | $5,0 \cdot 10$       | $5,8 \cdot 10^2$     | $1,3 \cdot 10$       |
| 0,25    | $4,0 \cdot 10^2$      | $2,4 \cdot 10$       | $2,8 \cdot 10^2$     | $8,0$                |
| 0,3     | $2,6 \cdot 10^2$      | $1,4 \cdot 10$       | $1,6 \cdot 10^2$     | $6,5$                |
| 0,4     | $1,2 \cdot 10^2$      | $6,5$                | $6,2 \cdot 10$       | $4,2$                |
| 0,5     | $5,9 \cdot 10$        | $4,0$                | $3,5 \cdot 10$       | $3,5$                |
| 0,6     | $3,2 \cdot 10$        | $3,0$                | $2,3 \cdot 10$       | $3,0$                |
| 0,7     | $2,8 \cdot 10$        | $1,9$                | $1,5 \cdot 10$       | $2,6$                |
| 0,8     | $1,5 \cdot 10$        | $1,6$                | $1,05 \cdot 10$      | $2,5$                |
| 0,9     | $1,1 \cdot 10$        | $1,2$                | $7,5$                | $2,3$                |
| 1,0     | $9,0$                 | $1,0$                | $6,5$                | $2,2$                |
| 2,0     | $9,5 \cdot 10^{-1}$   | $1,9 \cdot 10^{-1}$  | $6,0 \cdot 10^{-1}$  | $6,0 \cdot 10^{-1}$  |
| 3,0     | $2,2 \cdot 10^{-1}$   | $5,4 \cdot 10^{-2}$  | $1,5 \cdot 10^{-1}$  | $1,5 \cdot 10^{-1}$  |
| 4,0     | $1,1 \cdot 10^{-1}$   | $1,7 \cdot 10^{-2}$  | $6,6 \cdot 10^{-2}$  | $6,6 \cdot 10^{-2}$  |
| 5,0     | $5,8 \cdot 10^{-2}$   | $8,0 \cdot 10^{-3}$  | $3,5 \cdot 10^{-2}$  | $3,5 \cdot 10^{-2}$  |
| 6,0     | $3,6 \cdot 10^{-2}$   | $4,0 \cdot 10^{-3}$  | $2,0 \cdot 10^{-2}$  | $2,0 \cdot 10^{-2}$  |
| 7,0     | $2,4 \cdot 10^{-2}$   | $2,8 \cdot 10^{-3}$  | $1,25 \cdot 10^{-2}$ | $1,25 \cdot 10^{-2}$ |
| 8,0     | $1,7 \cdot 10^{-2}$   | $1,5 \cdot 10^{-3}$  | $8,8 \cdot 10^{-3}$  | $8,8 \cdot 10^{-3}$  |
| 9,0     | $1,2 \cdot 10^{-2}$   | $1,0 \cdot 10^{-3}$  | $6,0 \cdot 10^{-3}$  | $6,0 \cdot 10^{-3}$  |
| 10,0    | $1,0 \cdot 10^{-2}$   | $6,8 \cdot 10^{-4}$  | $4,5 \cdot 10^{-3}$  | $4,5 \cdot 10^{-3}$  |
| 11,0    | $8,0 \cdot 10^{-3}$   | $4,7 \cdot 10^{-4}$  | $3,0 \cdot 10^{-3}$  | $3,0 \cdot 10^{-3}$  |
| 12,0    | $7,0 \cdot 10^{-3}$   | $3,6 \cdot 10^{-4}$  | $2,5 \cdot 10^{-3}$  | $2,5 \cdot 10^{-3}$  |
| 13,0    | $5,6 \cdot 10^{-3}$   | $2,5 \cdot 10^{-4}$  | $1,6 \cdot 10^{-3}$  | $1,6 \cdot 10^{-3}$  |
| 14,0    | $4,5 \cdot 10^{-3}$   | $1,8 \cdot 10^{-4}$  | $1,2 \cdot 10^{-3}$  | $1,2 \cdot 10^{-3}$  |
| 15,0    | $4,0 \cdot 10^{-3}$   | $1,08 \cdot 10^{-4}$ | $1,08 \cdot 10^{-4}$ | $1,08 \cdot 10^{-4}$ |

Расчет величины  $\delta_\lambda$  по экспериментальным данным о распределении аэрозольных частиц по размерам, приведенным в виде зависимости  $dN/d \lg r$  от  $r$  (табл. 1), производился с учетом преобразования

$$f(r) = \frac{dN}{dr} = \frac{M}{r} \frac{dN}{d \lg r}, \quad (5)$$

где  $M = 0,4343$ , после чего формула (2) получает вид

$$\delta_\lambda = 0,1886 \int_{r_1}^{r_2} \pi r K \frac{dN}{d \lg r} dr. \quad (6)$$

Величина  $\delta_\lambda$  в зависимости от  $\lambda$ . Рассчитано для распределения Юнге (3) при  $h=4$ ,  $c=1,10^{-6}$  см и различных  $r_1$

| $\lambda$ нм | $r_1$ мкм |       |       |       |       |       |       |
|--------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|              | 0,02      | 0,04  | 0,06  | 0,08  | 0,10  | 0,15  | 0,20  |
| $m=1,33$     |           |       |       |       |       |       |       |
| 200          | 0,651     | 0,617 | 0,566 | 0,509 | 0,493 | 0,313 | 0,208 |
| 220          | 0,595     | 0,561 | 0,519 | 0,473 | 0,426 | 0,312 | 0,216 |
| 240          | 0,525     | 0,508 | 0,483 | 0,437 | 0,399 | 0,308 | 0,219 |
| 250          | 0,501     | 0,484 | 0,459 | 0,428 | 0,394 | 0,302 | 0,220 |
| 280          | 0,454     | 0,440 | 0,415 | 0,392 | 0,362 | 0,288 | 0,221 |
| 300          | 0,423     | 0,413 | 0,396 | 0,373 | 0,347 | 0,282 | 0,221 |
| 320          | 0,399     | 0,389 | 0,372 | 0,349 | 0,328 | 0,273 | 0,220 |
| 340          | 0,377     | 0,367 | 0,354 | 0,339 | 0,319 | 0,271 | 0,221 |
| 350          | 0,370     | 0,360 | 0,347 | 0,332 | 0,313 | 0,266 | 0,221 |
| 360          | 0,345     | 0,345 | 0,332 | 0,321 | 0,306 | 0,265 | 0,221 |
| 380          | 0,331     | 0,331 | 0,318 | 0,307 | 0,294 | 0,257 | 0,216 |
| 400          | 0,316     | 0,316 | 0,308 | 0,296 | 0,284 | 0,250 | 0,213 |
| $m=1,50$     |           |       |       |       |       |       |       |
| 200          | 1,077     | 0,940 | 0,804 | 0,660 | 0,537 | 0,284 | 0,176 |
| 220          | 1,012     | 0,875 | 0,756 | 0,642 | 0,531 | 0,299 | 0,179 |
| 240          | 0,925     | 0,823 | 0,720 | 0,622 | 0,526 | 0,315 | 0,190 |
| 250          | 0,913     | 0,811 | 0,709 | 0,614 | 0,520 | 0,318 | 0,194 |
| 280          | 0,791     | 0,722 | 0,637 | 0,569 | 0,494 | 0,327 | 0,209 |
| 300          | 0,743     | 0,675 | 0,607 | 0,550 | 0,481 | 0,328 | 0,216 |
| 320          | 0,715     | 0,647 | 0,579 | 0,522 | 0,467 | 0,327 | 0,222 |
| 340          | 0,667     | 0,599 | 0,556 | 0,507 | 0,456 | 0,333 | 0,232 |
| 350          | 0,658     | 0,590 | 0,547 | 0,498 | 0,451 | 0,332 | 0,233 |
| 360          | 0,642     | 0,574 | 0,531 | 0,486 | 0,439 | 0,329 | 0,236 |
| 380          | 0,628     | 0,560 | 0,517 | 0,472 | 0,429 | 0,327 | 0,237 |
| 400          | 0,584     | 0,516 | 0,481 | 0,447 | 0,404 | 0,319 | 0,236 |

Для характеристики зависимости величины  $\delta_\lambda$  от длины волны в УФ области спектра при разных значениях параметров функций распределения и коэффициентов преломления приводятся рис. 1—5. Для удобства обозначения все кривые на рис. 1—5 нормированы (путем изменения параметров  $c$  и  $N_m$  в формулах (3) и (4) и введения коэффициента перед интегралом в формуле (6)) к трем значениям  $\delta_{\lambda=400 \text{ нм}}$ , равным 0,05; 0,10; 0,15, что характерно для условий хорошей и средней прозрачности атмосферы. Из рис. 1—5 следует, что величина  $\delta_\lambda$  изменяется в зависимости от  $\lambda$  не монотонно и не гладко, что отличается от известной зависимости, определяемой формулой А. Онгстрема  $\delta_\lambda = c_2 \lambda^{-b}$ .

Для распределений Юнге характерен рост величины  $\delta_\lambda$  с уменьшением длины волны в интервале 200—400 нм (рис. 1, 2, 5). При этом увеличение параметра  $n$  от 3,5 до 5 вызывает ускорение указанного роста величины  $\delta_\lambda$  (при неизменном значении  $r$ , равном в рассматриваемых случаях 0,1 мкм). Для значения  $n=3,5$  характерен почти нейтральный ход величины  $\delta_\lambda$  (кривые 1 и 2 на рис. 1, 2,

кривые 2 и 3 на рис. 2). Рост величины  $\delta_\lambda$  с уменьшением  $\lambda$  более заметен при  $m = 1,33$ , чем при  $m = 1,50$ , что не противоречит данным табл. 2, в которой приведены значения  $\delta_\lambda$  при неизменном параметре  $c$  и из которой следует, что при  $m = 1,33$  абсолютные, а не относительные, как на рис. 1 (кривая 2), величины  $\delta_\lambda$  меньше, чем при  $m = 1,50$ .

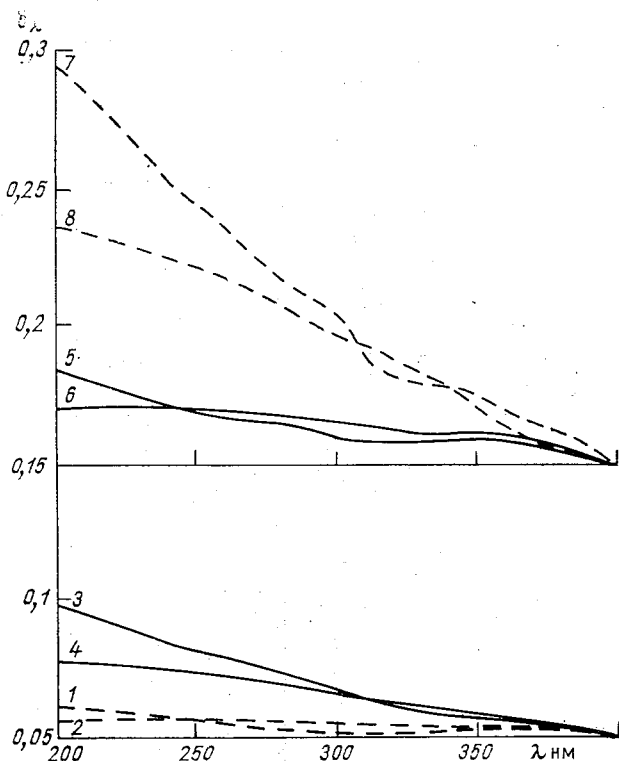


Рис. 1. Показатель аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_\lambda$  в зависимости от длины волны  $\lambda$ . Рассчитано для распределения Юнге (3).

Для  $\delta_\lambda = 400 \text{ нм} = 0,05$ : 1)  $n=3,5$ ,  $m=1,33$ , 2)  $n=3,5$ ,  $m=1,50$ , 3)  $n=4,5$ ,  $m=1,33$ , 4)  $n=4,5$ ,  $m=1,50$ ; для  $\delta_\lambda = 400 \text{ нм} = 0,15$ : 5)  $n=3,5$ ,  $m=1,33$ , 6)  $n=3,5$ ,  $m=1,50$ , 7)  $n=4,5$ ,  $m=1,33$ , 8)  $n=4,5$ ,  $m=1,5$ .

Такая же зависимость величины  $\delta_\lambda$  от коэффициента  $m$  (ускорение роста при переходе от  $m = 1,50$  к  $m = 1,33$ ) наблюдается для экспериментальных распределений аэрозольных частиц по размерам (рис. 4).

Для распределений типа Гаусса (4) зависимость величины  $\delta_\lambda$  от  $\lambda$  более сложная. В зависимости от параметров  $c_1$  и  $r_m$  она может быть почти нейтральной (рис. 4 а), характеризоваться ростом

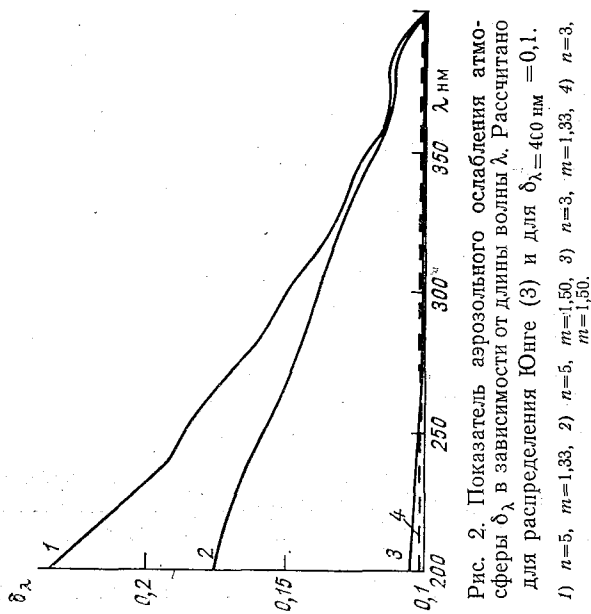


Рис. 2. Показатель аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_\lambda$  в зависимости от длины волны  $\lambda$ . Рассчитано для распределения Юнге (3) и для  $\delta_\lambda = 400 \text{ nm} = 0.1$ .

1)  $n=5$ ,  $m=1.33$ , 2)  $n=5$ ,  $m=1.50$ , 3)  $n=3$ ,  $m=1.33$ , 4)  $n=3$ ,  $m=1.50$ .

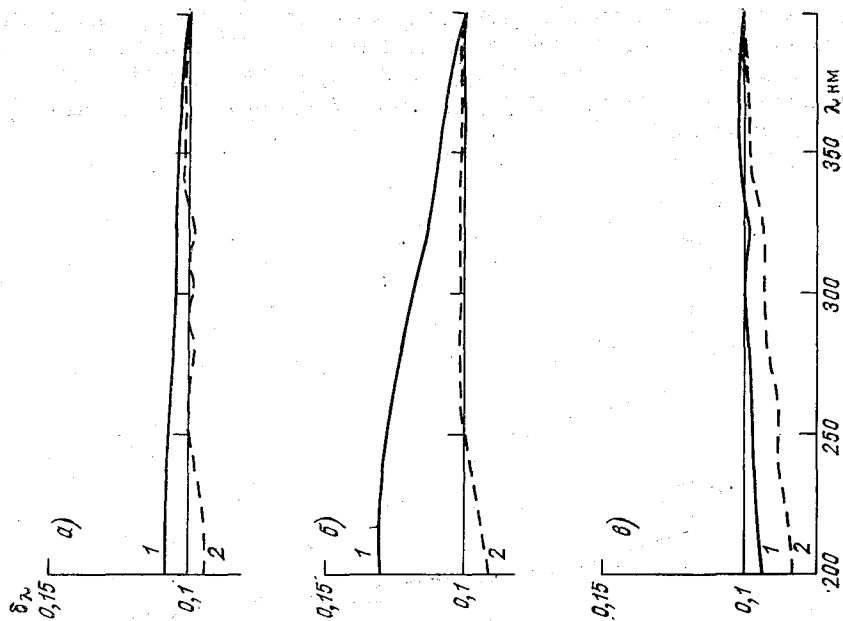


Рис. 3. Показатель аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_\lambda$  в зависимости от длины волны  $\lambda$ . Рассчитано для распределения Юнге (4) и для  $\delta_\lambda = 400 \text{ nm} = 0.1$ .

а)  $c=5$ ,  $r_m=0.06$ , б)  $c=10$ ,  $r_m=0.1$ , в)  $c=10$ ,  $r_m=0.15$ ; 1)  $m=1.33$ , 2)  $m=1.50$ .

$\delta_\lambda$  с уменьшением  $\lambda$  (рис. 3 б, кривая 1 и рис. 5 а, кривая 2) и уменьшением  $\delta_\lambda$  с уменьшением  $\lambda$  (рис. 3 в). На рис. 5 для сравнения между собой нанесены кривые зависимости  $\delta_\lambda$  от  $\lambda$ , полученные в результате расчета для разных распределений частиц по размерам. Как видно из рисунка, в области спектра 300—400 нм при определенных параметрах распределения Юнге и Гаусса

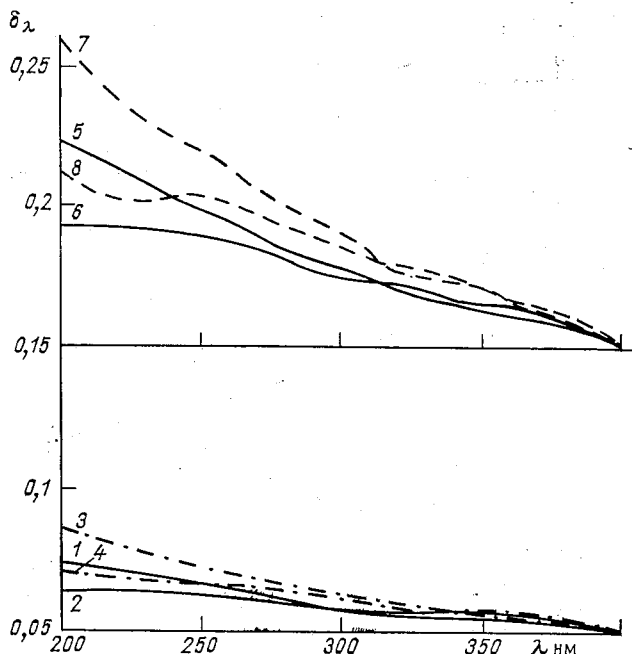


Рис. 4. Показатель аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_\lambda$  в зависимости от длины волны  $\lambda$ . Рассчитано для распределения, найденного экспериментально [5] (табл. 1).

Для  $\delta_\lambda = 400 \text{ нм} = 0,05$ : 1 — вариант 1,  $m=1,33$ ; 2 — вариант 1,  $m=1,50$ ; 3 — вариант 3,  $m=1,33$ ; 4 — вариант 3,  $m=1,50$ ; для  $\delta_\lambda = 400 \text{ нм} = 0,15$ : 5 — вариант 1,  $m=1,33$ ; 6 — вариант 1,  $m=1,50$ ; 7 — вариант 3,  $m=1,33$ ; 8 — вариант 3,  $m=1,50$ .

дают практически одинаковую зависимость  $\delta_\lambda$  от  $\lambda$  (рис. 5 а). Близкие между собой кривые  $\delta_\lambda$  были получены для распределения Юнге и экспериментального распределения в диапазоне длин волн 200—400 нм (рис. 5 в).

Представляет интерес оценить вклад аэрозольных частиц различных размеров в ослабление радиации в УФ области спектра. С этой целью были рассчитаны относительные значения показателя аэрозольного ослабления  $\delta_\lambda$  в процентах для групп частиц с разными размерами  $r$  (0,01—0,08, 0,10—0,30, 0,40—0,90, 1,0—20,0 мкм). Результаты указанного расчета для экспериментального распределения частиц по размерам приводятся в табл. 3.

Как видно из табл. 3, в УФ области спектра наибольший вклад в аэрозольное ослабление, вызванное рассеянием, вносят частицы размерами 0,1—0,3 мкм (за исключением варианта 4, представляющего распределение аэрозольных частиц над океаном). Отно-

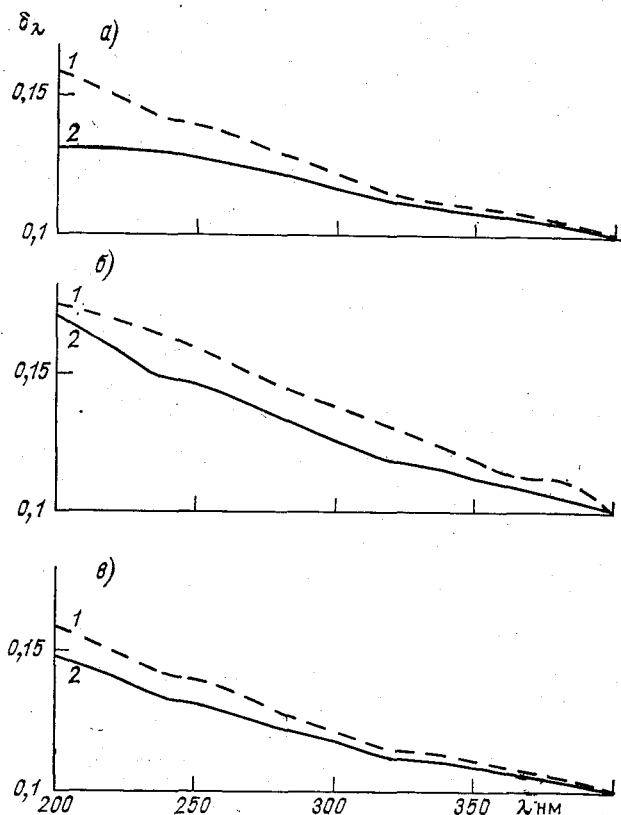


Рис. 5. Показатель аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_\lambda$  в зависимости от длины волны  $\lambda$ . Рассчитано для  $\delta_\lambda = 4(c \cdot \text{нм}) = 0,10$ .

а) 1 — распределение Юнге (3),  $m=1,33$ ,  $n=4$ ; 2 — распределение (4),  $m=1,33$ ,  $r_m=0,1$ ,  $c=10$ ; б) 1 — распределение Юнге (3),  $m=1,50$ ,  $n=5$ ; 2 — распределение, найденное экспериментально [5], вариант 3,  $m=1,33$ ; в) 1 — распределение Юнге (3),  $m=1,33$ ,  $n=4$ ; 2 — распределение, найденное экспериментально [5], вариант 1,  $m=1,33$ .

сительный вклад в значение показателя аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_\lambda$  частицами с размерами 0,1—0,3 мкм достигает 42—86 %. Вклад указанных частиц растет с уменьшением длины волны и с увеличением коэффициента преломления  $m$  от 1,33 до 1,50. Наоборот, вклад частиц с размерами 0,4—0,9 и 1,0—20,0 мкм уменьшается с уменьшением длины волны и увеличением коэффи-

Таблица 3

Вклад частиц определенных размеров  $r$  в ослабление монохроматической радиации в УФ области спектра (в процентах от величины  $\delta_\lambda$ ). Распределение частиц по размерам указано в табл. 1

| $\lambda$ нм | Пределы $r$ , мкм |               |             |               |               |             |               |               |             |               |               |             |
|--------------|-------------------|---------------|-------------|---------------|---------------|-------------|---------------|---------------|-------------|---------------|---------------|-------------|
|              | 0,10—<br>0,30     | 0,40—<br>0,90 | 1,0—<br>2,0 | 0,10—<br>0,30 | 0,40—<br>0,90 | 1,0—<br>2,0 | 0,10—<br>0,30 | 0,40—<br>0,90 | 1,0—<br>2,0 | 0,10—<br>0,30 | 0,40—<br>0,90 | 1,0—<br>2,0 |
|              | $m=1,33$          |               |             | $m=1,50$      |               |             | $m=1,33$      |               |             | $m=1,50$      |               |             |
|              | Вариант 1         |               |             |               |               |             | Вариант 2     |               |             |               |               |             |
| 200          | 74,6              | 13,3          | 12,2        | 77,8          | 11,8          | 10,4        | 66,9          | 12,6          | 20,5        | 71,6          | 11,0          | 17,4        |
| 220          | 73,7              | 13,4          | 12,8        | 77,4          | 12,1          | 10,5        | 65,6          | 12,9          | 21,5        | 71,2          | 11,2          | 17,5        |
| 240          | 72,2              | 14,3          | 13,6        | 76,4          | 12,9          | 10,5        | 65,4          | 13,8          | 22,8        | 70,5          | 11,8          | 17,7        |
| 250          | 81,8              | 14,5          | 13,7        | 76,4          | 12,9          | 10,6        | 63,0          | 13,9          | 23,1        | 70,3          | 11,8          | 17,9        |
| 280          | 68,4              | 16,7          | 14,8        | 75,5          | 13,4          | 11,1        | 59,4          | 15,7          | 24,9        | 68,7          | 12,5          | 18,8        |
| 300          | 66,1              | 18,5          | 15,3        | 75,2          | 13,3          | 11,4        | 57,1          | 17,1          | 25,8        | 68,1          | 12,6          | 19,3        |
| 320          | 63,1              | 20,3          | 16,6        | 74,6          | 13,1          | 12,3        | 53,8          | 18,5          | 27,8        | 67,0          | 12,4          | 20,6        |
| 340          | 59,9              | 21,7          | 18,4        | 73,1          | 13,8          | 12,2        | 50,5          | 19,4          | 30,1        | 65,0          | 13,1          | 21,9        |
| 350          | 58,0              | 22,6          | 19,5        | 72,6          | 13,7          | 13,7        | 48,5          | 19,9          | 31,6        | 64,4          | 13,1          | 22,5        |
| 360          | 56,3              | 23,3          | 20,4        | 71,8          | 14,2          | 14,0        | 46,9          | 20,5          | 32,6        | 63,4          | 13,4          | 23,2        |
| 380          | 54,2              | 24,9          | 21,0        | 71,3          | 14,5          | 14,1        | 44,8          | 21,6          | 33,6        | 62,8          | 13,8          | 23,4        |
| 400          | 51,4              | 26,3          | 22,1        | 70,2          | 15,4          | 14,4        | 42,3          | 22,7          | 35,0        | 61,5          | 14,5          | 21,0        |
|              | Вариант 3         |               |             |               |               |             | Вариант 4     |               |             |               |               |             |
| 200          | 82,6              | 9,5           | 9,9         | 86,3          | 7,9           | 8,0         | 19,7          | 15,9          | 64,4        | 22,9          | 15,5          | 61,6        |
| 220          | 79,6              | 9,8           | 10,6        | 83,6          | 8,2           | 8,2         | 19,0          | 16,0          | 65,0        | 22,6          | 15,6          | 61,8        |
| 240          | 78,0              | 10,6          | 11,4        | 83,0          | 8,7           | 8,3         | 17,9          | 16,4          | 65,7        | 22,2          | 16,0          | 61,8        |
| 250          | 77,6              | 10,7          | 11,7        | 82,8          | 8,8           | 8,4         | 17,5          | 16,5          | 66,0        | 22,2          | 16,2          | 62,4        |
| 280          | 74,6              | 12,6          | 12,8        | 81,7          | 9,4           | 8,9         | 16,0          | 17,2          | 66,8        | 21,0          | 16,4          | 62,4        |
| 300          | 72,5              | 14,0          | 13,5        | 81,3          | 9,4           | 9,3         | 15,0          | 18,0          | 66,9        | 20,6          | 16,6          | 62,8        |
| 320          | 69,5              | 15,5          | 15,0        | 80,5          | 9,3           | 10,2        | 13,7          | 18,1          | 68,2        | 19,8          | 15,9          | 64,3        |
| 340          | 66,4              | 16,7          | 16,8        | 78,9          | 9,9           | 11,2        | 12,4          | 17,8          | 69,8        | 18,8          | 16,0          | 65,2        |
| 350          | 64,5              | 17,6          | 18,0        | 78,5          | 9,9           | 11,5        | 11,6          | 17,7          | 70,6        | 18,4          | 15,7          | 65,9        |
| 360          | 62,8              | 18,3          | 18,9        | 77,7          | 10,4          | 11,9        | 11,0          | 17,6          | 71,3        | 17,9          | 15,8          | 66,3        |
| 380          | 60,8              | 19,6          | 19,6        | 77,3          | 10,7          | 12,0        | 10,5          | 17,8          | 71,7        | 17,7          | 16,0          | 66,2        |
| 400          | 58,2              | 21,0          | 20,8        | 76,1          | 11,5          | 12,4        | 9,7           | 17,8          | 72,5        | 17,1          | 16,3          | 66,6        |

коэффициента  $m$ . Вклад частиц с  $r=0,01 \div 0,08$  мкм оказался близким к нулю.

На основании проделанных расчетов представляется возможным оценить суммарное количество аэрозольных частиц в вертикальном столбе атмосферы сечением  $1 \text{ см}^2$ . В качестве примера для расчета было использовано распределение Юнге (3). В этом случае

$$dN = cr^{-n} dr. \quad (7)$$

Интегрируя выражение (7) от  $r_1$  до  $r_2$  (левую часть соответственно от  $N_1$  до  $N_2$ ), получим

$$N_{1,2} = N_2 - N_1 = \frac{c}{n-1} (r_1^{1-n} - r_2^{1-n}), \quad (8)$$

где  $N_{1,2}$  — общее количество аэрозольных частиц в вертикальном столбе атмосферы сечением  $1 \text{ см}^2$  с размерами от  $r_1$  до  $r_2$ .

С помощью формулы (8) рассчитывается количество малых ( $r < 0,1 \text{ мкм}$ ), больших ( $0,1 \text{ мкм} \leq r \leq 1,0 \text{ мкм}$ ) и гигантских ( $r > 1,0 \text{ мкм}$ ) аэрозольных частиц. В качестве примера были выбраны параметры распределения  $c = 10^{-6}$  и  $n = 4$ . Указанным параметрам соответствует сильное помутнение атмосферы (табл. 2); при  $\lambda = 400 \text{ нм}$  в этом случае значение  $\delta_\lambda = 0,296$ . В рассматриваемом примере количество малых аэрозольных частиц ( $0,05 \text{ мкм} < r < 0,1 \text{ мкм}$ ) будет равно

$$N_m = \frac{10^{-6}}{3} [(5 \cdot 10^{-6})^{-3} - (10^{-5})^{-3}] = 2,3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}.$$

Количество больших аэрозольных частиц будет равно

$$N_b = \frac{10^{-6}}{3} [(10^{-5})^{-3} - (10^{-4})^{-3}] = 3,3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}.$$

Количество гигантских аэрозольных частиц ( $1,0 \text{ мкм} < r < 20,0 \text{ мкм}$ ) в вертикальном столбе атмосферы сечением  $1 \text{ см}^2$  будет равно

$$N_r = \frac{10^{-6}}{3} [(10^{-4})^{-3} - (20 \cdot 10^{-4})^{-3}] = 3,3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}.$$

В случае малого помутнения атмосферы, когда  $\delta_\lambda = 400 \text{ нм} = 0,050$ ,  $n = 4$  и  $c = 1,7 \cdot 10^{-7}$ , значения  $N_m$ ,  $N_b$  и  $N_r$  на основании формулы (8) будут соответственно равны  $5,5 \cdot 10^{10}$ ,  $5,5 \cdot 10^7$  и  $5,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ . Полученные в результате расчетов величины  $N_b$  оказались близкими к аналогичным величинам, публикуемым в справочнике [2].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гушин Г. П. Исследование атмосферного озона. — Л.: Гидрометеониздат, 1963. — 267 с.
2. Общее содержание атмосферного озона и спектральная прозрачность атмосферы. Справочные данные по станциям СССР за 1972—1973 гг./Под ред. Г. П. Гушина. — Л.: Гидрометеониздат, 1978. — 158 с.
3. Ослабление света в земной атмосфере (визуальная и ультрафиолетовая область спектра). — Алма-Ата: «Наука», 1976. — 116 с.
4. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности/Под ред. К. Я. Кондратьева. — Л.: Гидрометеониздат, 1969. — 564 с.
5. Ультрафиолетовая радиация Солнца и неба/В. А. Белинский, М. П. Гараджа, Л. М. Меженная, Е. И. Незваль. — М.: Изд. МГУ, 1968. — 228 с.
6. Юнге Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы: Пер. с англ. — М.: Мир, 1965. — 424 с.

*Г. П. Гущин, Т. Д. Жуковская, И. И. Штефка*

## **УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПРИБОРА М-83 ОТ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Как известно, в настоящее время в СССР действует 45 озонометрических станций, научно-методическое руководство которыми осуществляет Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова. Все эти станции оборудованы приборами М-83 [1, 2]. В связи с электрификацией всех озонометрических станций появилась необходимость перехода от существующего батарейного питания прибора М-83 к питанию от электросети.

В отличие от батарей, в которых изменение напряжений происходит медленно и плавно, электросеть характеризуется относительно быстрыми колебаниями напряжения (в пределах допуска). Такие колебания, происходящие в период измерений, приводят к дополнительной погрешности. Поэтому необходима стабилизация всех питающих напряжений. Преимущество всех стабилизированных источников также и в том, что они не нуждаются в подстройке, что позволяет уменьшить количество ручек управления и упростить производство наблюдений.

Для обеспечения работоспособности прибора М-83 необходимо а) напряжение 100 В для питания фотоэлемента Ф-4 и анодов двойного триода 6Н16Б (применяется вместо лампы 1НЗС); б) напряжение 6,3 В накала двойного триода 6Н16Б; в) источник напряжения сеточных смещений сеток двойного триода 6Н16Б; г) регулируемое напряжение питания фотоумножителя ФЭУ-18А 700—900 В; д) регулируемое напряжение питания контрольных ламп.

Все перечисленные напряжения (за исключением п. «д») работают на постоянную нагрузку. Поэтому для их стабилизации достаточно стабилизировать входное напряжение. Поскольку использование феррорезонансных фильтров увеличило бы массу и габариты прибора, применена стабилизация предварительно выпрямленного напряжения на входе прибора с последующим его преобразованием на необходимые напряжения.

Электрическая схема блока питания приведена на рис. 1.

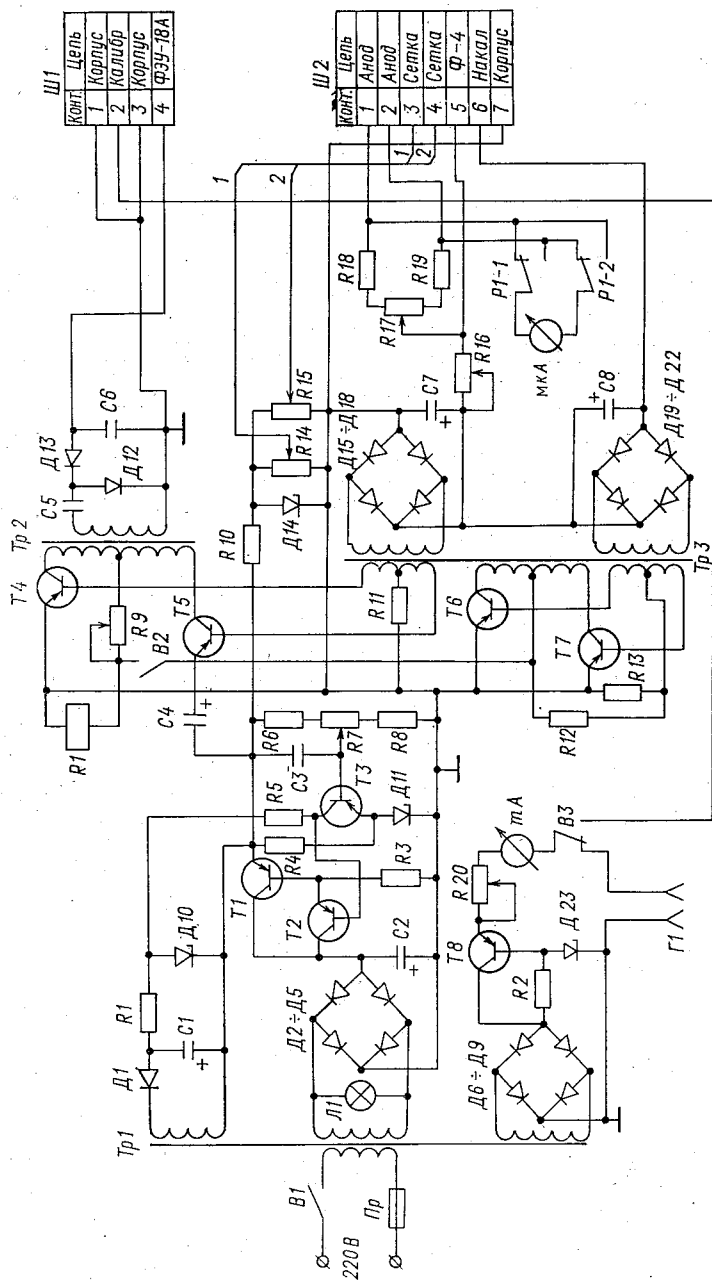


Рис. 1. Электрическая схема прибора М-83 с сетевым электропитанием.

Сетевой трансформатор Тр1 питает основной стабилизатор постоянного напряжения 24 В на транзисторах Т1—Т3 и стабилизатор эталонной лампы на транзисторе Т8. Напряжение 24 В подается на два преобразователя на трансформаторах Тр2 и Тр3. Первый служит для получения анодного напряжения и напряжения накала триодов, второй — для питания фотоумножителя при ночных измерениях. Для уменьшения габаритов и массы преобразо-

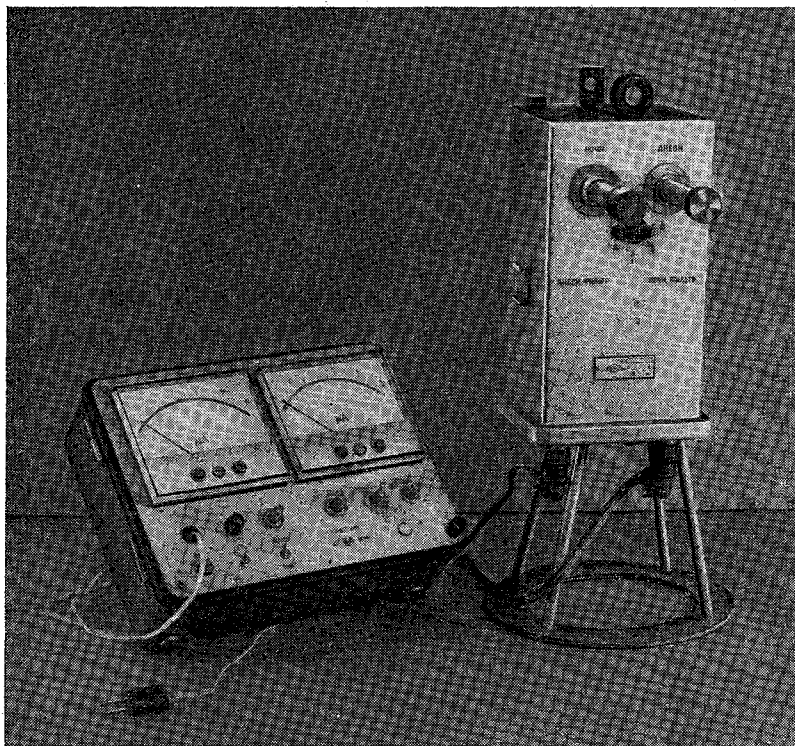


Рис. 2. Общий вид прибора М-83 с блоком для электропитания от сети переменного тока.

вателей и сглаживающих фильтров выпрямителей преобразователи работают на частоте 1000 Гц.

Сеточные напряжения формируются с помощью потенциометров, подключенных к выходу основного стабилизатора 24 В.

Конструктивно блок сетевого электропитания прибора М-83 оформлен в виде ящика с открывающейся крышкой (рис. 2). Данные его электросхемы приведены в табл. 1.

На лицевой панели блока расположены два показывающих прибора, сетевой предохранитель, тумблер включения прибора и сигнальная лампочка, сообщающая о подключении прибора к сети. Там же расположен переключатель контрольной лампы.

а. Данные электросхемы блока питания прибора М-83

Таблица 1

| Обозначения по схеме | Наименование и тип  | Обозначения по схеме | Наименование и тип |
|----------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
|                      | Резисторы           |                      | Конденсаторы       |
| R1                   | МЛТ-0,5-430±10%     | C1                   | К50-6-15-100 мкф   |
| R2                   | МЛТ-0,5-620±10%     | C2                   | К50-6-50-1000 мкф  |
| R3                   | МЛТ-0,25-47 кОм±10% | C3                   | КМ6-1 мкф          |
| R4                   | МЛТ-0,25-6,8 кОм±5% | C4                   | К50-6-50-500 мкф   |
| R5                   | МЛТ-0,25-2 кОм±5%   | C5 — C6              | МБМ-1500-1 мкф     |
| R6                   | ПТМН-0,25-620±0,5%  | C7                   | К50-6-100-20 мкф   |
| R7                   | СП5-2-470±5%        | C8                   | К50-6-15-500 мкф   |
| R8                   | ПТМН-0,25-330±0,5%  |                      | Диоды              |
| R9                   | СП5-2-470±5%        | Д1                   | Д9                 |
| R10                  | МЛТ-0,5-2,2 кОм±10% | Д2 — Д5              | 2Д202М             |
| R11                  | МЛТ-0,25-52±10%     | Д6 — Д9              | Д226               |
| R12                  | МЛТ-0,25-10 кОм±5%  | Д10                  | Д808               |
| R13                  | МЛТ-0,25-1 кОм±5%   | Д11                  | Д810               |
| R14 — R15            | СП5-2-4,7 кОм±5%    | Д12 — Д13            | Д218               |
| R16                  | СП5-2-10 кОм±5%     | Д14                  | КС156              |
| R17                  | СП5-2-1 кОм±5%      | Д15 — Д18            | Д226               |
| R18 — R19            | МЛТ-0,25-30 кОм     | Д19 — Д22            | 2Д202М             |
| R20                  | ППВ-2-22±10%        | Д23                  | КС147              |
|                      |                     |                      | Транзисторы        |
|                      |                     | T1                   | П214А              |
|                      |                     | T2 — T3              | МП25               |
|                      |                     | T4 — T5              | МП26               |
|                      |                     | T6 — T8              | ГТ403Ж             |
|                      |                     |                      | Реле               |
|                      |                     | P1                   | РЭС47 РФ4500 417   |

## 6. Трансформаторы

| Обмотка | Номера выводов | Марка провода и диаметр без изоляции | Количество витков |
|---------|----------------|--------------------------------------|-------------------|
|---------|----------------|--------------------------------------|-------------------|

## Трансформатор Тр1

|     |     |              |      |
|-----|-----|--------------|------|
| I   | 1—2 | ПЭВ-2 Ø 0,16 | 3080 |
| II  | 3—4 | ПЭВ-2 Ø 0,16 | 160  |
| III | 5—6 | ПЭВ-2 Ø 0,47 | 440  |
| IV  | 7—8 | ПЭВ-2 Ø 0,35 | 175  |

## Трансформатор Тр2

|    |     |              |         |
|----|-----|--------------|---------|
| I  | 1—3 | ПЭВ-2 Ø 0,23 | 2 × 104 |
| II | 4—5 | ПЭВ-2 Ø 0,10 | 2210    |

## Трансформатор Тр3

|     |       |              |         |
|-----|-------|--------------|---------|
| I   | 1—3   | ПЭВ-2 Ø 0,35 | 2 × 217 |
| II  | 4—6   | ПЭВ-2 Ø 0,12 | 2 × 28  |
| III | 7—9   | ПЭВ-2 Ø 0,12 | 2 × 28  |
| IV  | 10—11 | ПЭВ-2 Ø 0,12 | 970     |
| V   | 12—13 | ПЭВ-2 Ø 0,59 | 80      |

При положении тумблера «выключено» подается напряжение на гнезда для подключения внешней контрольной лампы, расположенные на боковой стенке прибора рядом с разъемами. При включении тумблера загорается контрольная лампа, встроенная в прибор. Ток контрольной лампы устанавливается при помощи резистора и миллиамперметра, подключенного с правой стороны прибора.

Тумблер для измерений — «измерения» — служит для подачи напряжения на фотоумножитель. В положении «ночи.» подается напряжение на высоковольтный преобразователь. Одновременно срабатывает реле, контакты которого переключают полярность отсчетного микроамперметра.

Напряжение фотоумножителя регулируется ручкой «уст. чувст.» — изменением напряжения, подаваемого на преобразователь.

Ручки установки нуля служат для грубой и плавной установки нуля усилителя постоянного тока, которая осуществляется так же, как и в предыдущих модификациях прибора. Грубая установка нуля производится изменением напряжения смещения сетки одного из триодов усилителя, плавная — изменением соотношения плеч измерительного моста.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 160877 (СССР). Озонометр/Г. П. Гуцин.— Заявл. 14.06.62, № 783014/26—10; опубл. 26.02.64. Бюлл. открытий, изобрет. и промышленных образцов и товарн. знаков, 1964, № 5.
2. Гуцин Г. П. Методические указания по производству и обработке наблюдений за общим содержанием атмосферного озона.— Л.: Гидрометеиздат, 1970.— 65 с.

*Г. П. Гуция, Т. А. Павлюченкова*

## **О ДНЕВНОМ ХОДЕ АЭРОЗОЛЬНОГО ПОМУТНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ**

В настоящее время имеются противоречивые сведения о характере дневных колебаний аэрозольного помутнения всей толщи атмосферы. В монографиях [3, 4] приводятся примеры роста аэрозольного помутнения в полуденные часы. Однако в работе [1] отмечается, что не наблюдается систематического роста аэрозольного помутнения в полуденные часы. Для объяснения причин возможных колебаний аэрозольного помутнения с максимумом в полдень высказывается предположение [4], что эти колебания вызываются суточными колебаниями конвективных движений и турбулентности в нижнем слое атмосферы с максимумом в полдень, что приводит к росту количества аэрозольных частиц в атмосфере в полуденные часы вследствие увлечения этих частиц с поверхности земли и дополнительного их образования (или увеличения размеров) в атмосфере ввиду роста турбулентности и связанных с ней конденсационных процессов.

С целью выяснения вопроса о дневных колебаниях аэрозольного помутнения были проанализированы данные регулярных наблюдений за спектральным показателем аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_\lambda$ , полученные на научно-экспериментальных базах Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова в Воейково (пригород Ленинграда) и Карадаге (вблизи Феодосии). Как известно [1], спектральный показатель аэрозольного ослабления атмосферы представляет собой спектральную оптическую плотность аэрозольных частиц во всей толще атмосферы, рассчитанную на единицу оптической массы, и поэтому является однозначным индикатором колебаний аэрозольной мутности атмосферы. Для анализа были отобраны данные наблюдений за величиной  $\delta_\lambda$  в безоблачные или малооблачные дни за пятилетний период 1973—77 гг.

В качестве примера на рис. 1 и 2 приводятся характерные кривые дневного хода величины  $\delta_\lambda$  в Воейково и Карадаге для двух значений длины волны  $\lambda$ , равных 369 и 530 нм. Из рис. 1 и 2 следует, что в широком диапазоне помутнения атмосферы (от  $\delta_{\lambda=369 \text{ нм}} = 0,060$  до  $\delta_{\lambda=369 \text{ нм}} = 0,430$ ) наблюдается как рост

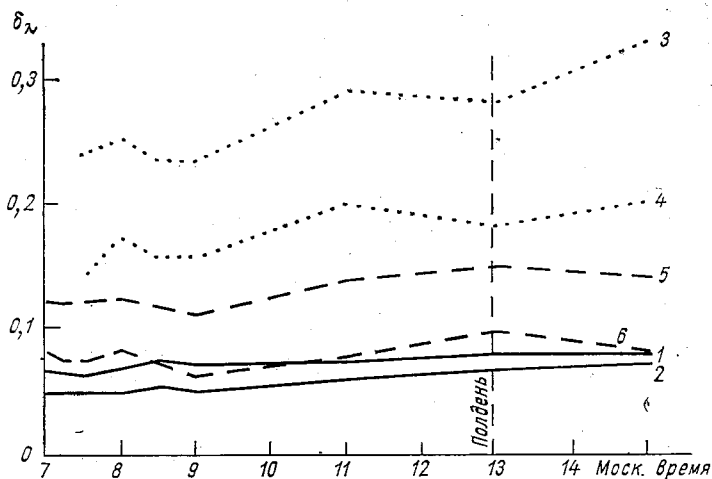


Рис. 1. Значения показателя аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_\lambda$  в зависимости от времени. Воейково, 1977 г.

1) 28 мая,  $\lambda=369$  нм; 2) 28 мая,  $\lambda=530$  нм; 3) 11 июля,  $\lambda=369$  нм;  
4) 11 июля,  $\lambda=530$  нм; 5) 15 июля,  $\lambda=369$  нм; 6) 15 июня,  $\lambda=530$  нм.

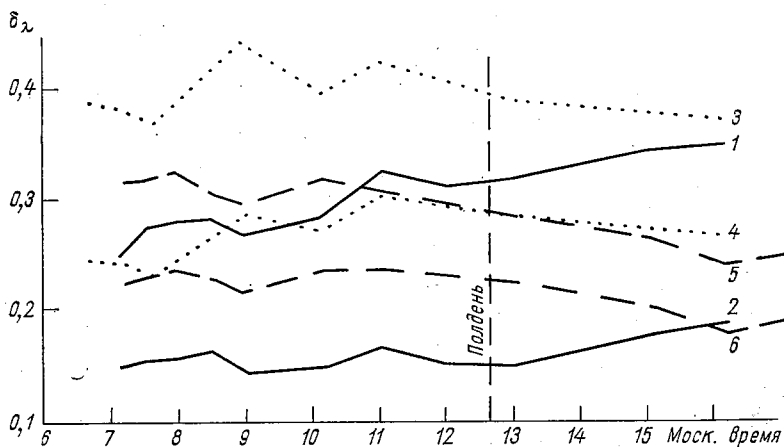


Рис. 2. Значения показателя аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_\lambda$  в зависимости от времени. Феодосия, 1977 г.

1) 10 мая,  $\lambda=369$  нм; 2) 10 мая,  $\lambda=530$  нм; 3) 20 июня,  $\lambda=369$  нм; 4) 20 июня,  $\lambda=530$  нм; 5) 14 августа,  $\lambda=369$  нм; 6) 14 августа,  $\lambda=530$  нм.

аэрозольного помутнения атмосферы в течение дня, так и падение этого помутнения. Кривые на рис. 1 и 2, так же как и в работе [2], не показывают ясно выраженного роста величины  $\delta_\lambda$  в полуденное время.

Более определенные сведения о колебаниях аэрозольного помутнения атмосферы относительно полудня можно получить путем статистической обработки массива данных наблюдений за величиной  $\delta_\lambda$ .

Оценка колебаний аэрозольного помутнения всей толщи атмосферы относительно полудня производилась с помощью величины

$$\eta_\lambda = \frac{\delta_{\lambda, \text{п}} - \delta_{\lambda, \text{ср}}}{\delta_{\lambda, \text{ср}}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $\delta_{\lambda, \text{п}}$  — показатель аэрозольного ослабления атмосферы для длины волны  $\lambda$  в полдень,  $\delta_{\lambda, \text{ср}}$  — средний за день (точнее за период наблюдений в дневное время) показатель аэрозольного ослабления атмосферы для той же длины волны  $\lambda$ . Величина  $\eta_\lambda$  характеризует процентное увеличение или уменьшение спектрального аэрозольного помутнения атмосферы в полдень по отношению к средней за день величине этого помутнения.

Таблица 1

Средние за год значения  $\eta_\lambda$  для разных длин волн  $\lambda$  в Воейково и Карадаге за 1973—1977 гг. (%).  
В скобках — число дней наблюдений

| Год           | $\lambda$ нм |           |            |           |           |
|---------------|--------------|-----------|------------|-----------|-----------|
|               | 344          | 369       | 463        | 530       | 572       |
| Воейково      |              |           |            |           |           |
| 1973          | 8,8 (11)     | 1,5 (13)  | 1,6 (12)   | 2,8 (13)  | 2,4 (13)  |
| 1974          | 13,0 (11)    | 4,7 (12)  | 8,0 (11)   | 15,6 (13) | 12,3 (13) |
| 1975          | 1,7 (5)      | 0,8 (5)   | -2,4 (5)   | 2,5 (4)   | 4,2 (4)   |
| 1976          | -10,2 (11)   | -7,6 (12) | -10,0 (11) | 0,1 (12)  | -5,4 (11) |
| 1977          | 3,8 (8)      | 6,2 (8)   | 7,5 (7)    | 12,8 (8)  | 1,8 (8)   |
| Среднее . . . | 3,4 (46)     | 1,1 (50)  | 0,9 (46)   | 6,8 (50)  | 3,1 (49)  |
| Карадаг       |              |           |            |           |           |
| 1973          | -4,4 (56)    | -2,7 (57) | -5,1 (56)  | -8,7 (56) | -3,6 (57) |
| 1974          | 1,2 (65)     | 4,2 (67)  | 1,3 (67)   | 1,3 (66)  | 7,4 (67)  |
| 1975          | 4,2 (76)     | 4,3 (79)  | 3,0 (79)   | 2,6 (79)  | 5,0 (78)  |
| 1976          | 3,1 (52)     | 3,1 (52)  | 0,8 (52)   | 4,9 (52)  | 4,5 (52)  |
| 1977          | 9,8 (55)     | 7,9 (55)  | 3,3 (56)   | 5,2 (56)  | 5,6 (56)  |
| Среднее . . . | 2,8 (304)    | 3,4 (310) | 0,7 (310)  | 1,1 (309) | 3,8 (310) |

В табл. 1 приводятся средние за год значения величины  $\eta_\lambda$  в Воейково и Карадаге за период 1973—1977 гг. для длин волн 344, 369, 463, 530 и 572 нм. Для расчета величины  $\eta_\lambda$  использовались данные наблюдений за 360 дней. Как видно из табл. 1, наб-

людаются как положительные, так и отрицательные средние за год значения  $\eta_\lambda$ . Средние за пять лет значения  $\eta_\lambda$  для разных длин волн положительные, но не превышают 6,8 % и в основном равны 1—3 %.

Для выявления зависимости  $\eta_\lambda$  от времени года были произведены расчеты этой величины отдельно для летнего (апрель—сентябрь) и зимнего (октябрь—март) периода по данным наблюдений в Карадаге за тот же отрезок времени 1973—1977 гг. В табл. 2 приведены средние значения  $\eta_\lambda$  для зимнего (октябрь—март) и летнего (апрель—сентябрь) полугодий в Карадаге за период 1973—1977 гг. Из таблицы видно, что в зимнее полугодие наблюдаются как положительные, так и отрицательные значения  $\eta_\lambda$ , в летнее полугодие — только положительные. В среднем за пять лет величина  $\eta_\lambda$  не превышает 2,4 % в зимний период и 6,9 % — в летний период.

Таблица 2

Средние значения  $\eta$  для разных длин волн  $\lambda$  за летний и зимний периоды 1973—1977 гг. в Карадаге. (%).  
В скобках — число дней наблюдений

| Год           | $\lambda$ нм |           |            |            |            |
|---------------|--------------|-----------|------------|------------|------------|
|               | 344          | 369       | 463        | 530        | 572        |
| Зимний период |              |           |            |            |            |
| 1973          | −9,4 (22)    | −7,2 (23) | −12,6 (23) | −19,0 (23) | −12,9 (23) |
| 1974          | 0,5 (24)     | −0,2 (25) | −4,4 (25)  | −4,1 (24)  | 2,8 (25)   |
| 1975          | 6,6 (21)     | 4,6 (23)  | 1,5 (23)   | 1,6 (23)   | 6,2 (23)   |
| 1976          | −0,3 (19)    | −0,2 (19) | −2,6 (19)  | 1,9 (19)   | 0,9 (19)   |
| 1977          | 14,6 (24)    | 11,1 (24) | 5,6 (25)   | 5,5 (25)   | 5,9 (25)   |
| Среднее . . . | 2,4 (110)    | 1,6 (114) | −2,5 (115) | −2,8 (114) | 0,6 (115)  |
| Летний период |              |           |            |            |            |
| 1973          | 0,6 (34)     | 1,9 (34)  | 2,5 (33)   | 1,6 (33)   | 5,8 (34)   |
| 1974          | 1,8 (41)     | 8,7 (42)  | 7,1 (42)   | 6,6 (42)   | 12,1 (42)  |
| 1975          | 1,8 (55)     | 3,9 (56)  | 4,5 (56)   | 3,6 (56)   | 3,8 (55)   |
| 1976          | 6,0 (33)     | 5,9 (33)  | 3,6 (33)   | 7,4 (33)   | 7,4 (33)   |
| 1977          | 5,8 (31)     | 5,2 (31)  | 1,4 (31)   | 4,9 (31)   | 5,3 (31)   |
| Среднее . . . | 3,2 (194)    | 5,1 (196) | 3,8 (195)  | 4,8 (195)  | 6,9 (195)  |

Представляет интерес рассчитать относительное число случаев положительных, отрицательных и нулевых значений  $\eta_\lambda$  за период 1973—1977 гг. в среднем по годам и за пять лет, а также соответственно в зимний и летний периоды. В табл. 3 приводится среднее относительное число случаев положительных, отрицательных и нулевых отклонений полуденного значения  $\delta_\lambda$  от среднего за день (т. е.  $\eta_\lambda$ ) за период 1973—1977 гг. в Воейково и Карадаге для длин волн 344, 369, 463, 530 и 572 нм. Как видно из табл. 3, среднее число положительных отклонений величины  $\delta_\lambda$  в основном

Относительное число случаев положительных ( $\eta_{\lambda+}$ ), отрицательных ( $\eta_{\lambda-}$ ) и нулевых ( $\eta_{\lambda 0}$ ) значений  $\eta_{\lambda}$  в Воейково и Карадаге (%)

| Год           | $\lambda$ нм      |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    |
|---------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
|               | 344               |                   |                    | 369               |                   |                    | 463               |                   |                    | 530               |                   |                    |
|               | $\eta_{\lambda+}$ |                   | $\eta_{\lambda-}$  | $\eta_{\lambda+}$ |                   | $\eta_{\lambda-}$  | $\eta_{\lambda+}$ |                   | $\eta_{\lambda-}$  | $\eta_{\lambda+}$ |                   | $\eta_{\lambda-}$  |
|               | $\eta_{\lambda+}$ | $\eta_{\lambda-}$ | $\eta_{\lambda 0}$ | $\eta_{\lambda+}$ | $\eta_{\lambda-}$ | $\eta_{\lambda 0}$ | $\eta_{\lambda+}$ | $\eta_{\lambda-}$ | $\eta_{\lambda 0}$ | $\eta_{\lambda+}$ | $\eta_{\lambda-}$ | $\eta_{\lambda 0}$ |
| Ленинград     |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    |
| 1973          | 81,8              | 18,2              | —                  | 46,2              | 46,2              | 7,7                | 50,0              | 50,0              | —                  | 61,6              | 38,4              | —                  |
| 1974          | 72,7              | 27,3              | —                  | 58,4              | 33,3              | 8,3                | 54,6              | 36,3              | 9,1                | 77,0              | 15,4              | 7,7                |
| 1975          | 40,0              | 60,0              | —                  | 40,0              | 60,0              | —                  | 20,0              | 60,0              | 20,0               | 50,0              | 50,0              | —                  |
| 1976          | 45,4              | 54,6              | —                  | 41,7              | 50,0              | 8,3                | 36,4              | 54,5              | 9,1                | 50,0              | 50,0              | —                  |
| 1977          | 50,0              | 37,5              | 12,5               | 50,0              | 37,5              | 12,5               | 57,2              | 42,8              | —                  | 50,0              | 37,5              | 12,5               |
| Среднее . . . | 58,0              | 39,5              | 2,5                | 47,3              | 45,4              | 7,4                | 43,6              | 48,7              | 7,6                | 57,7              | 38,3              | 4,0                |
| Феодосия      |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    |
| 1973          | 37,5              | 58,9              | 3,6                | 42,1              | 56,2              | 1,8                | 37,5              | 60,7              | 1,8                | 37,5              | 60,7              | 1,8                |
| 1974          | 50,8              | 44,6              | 4,6                | 62,7              | 37,3              | —                  | 49,2              | 49,2              | 1,5                | 56,1              | 39,4              | 4,5                |
| 1975          | 48,7              | 48,7              | 2,6                | 59,5              | 38,0              | 2,5                | 52,3              | 45,6              | 2,5                | 59,5              | 36,7              | 3,8                |
| 1976          | 61,6              | 34,6              | 3,8                | 55,8              | 42,3              | 1,9                | 50,0              | 46,2              | 3,8                | 63,4              | 32,7              | 3,8                |
| 1977          | 74,6              | 23,6              | 1,8                | 67,3              | 32,7              | —                  | 64,3              | 33,9              | 1,8                | 66,1              | 28,6              | 5,4                |
| Среднее . . . | 54,6              | 42,1              | 3,3                | 57,5              | 41,3              | 1,2                | 50,7              | 47,1              | 2,3                | 56,5              | 39,6              | 3,9                |
|               |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    | 45,6              | 52,6              | 1,8                |
|               |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    | 64,2              | 35,8              | —                  |
|               |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    | 56,4              | 37,2              | 6,4                |
|               |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    | 59,6              | 34,6              | 5,8                |
|               |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    | 67,9              | 28,6              | 3,6                |
|               |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    | 58,7              | 37,8              | 3,5                |

Таблица 4

Относительное число случаев положительных ( $\eta_{\lambda+}$ ), отрицательных ( $\eta_{\lambda-}$ ) и нулевых ( $\eta_{\lambda 0}$ ) значений  $\eta_{\lambda}$  в Карадаге в зимний и летний периоды (%)

| Год           | $\lambda$ мм      |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    |
|---------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
|               | 344               |                   |                    | 369               |                   |                    | 463               |                   |                    | 530               |                   |                    |
|               | $\eta_{\lambda+}$ | $\eta_{\lambda-}$ | $\eta_{\lambda 0}$ | $\eta_{\lambda+}$ | $\eta_{\lambda-}$ | $\eta_{\lambda 0}$ | $\eta_{\lambda+}$ | $\eta_{\lambda-}$ | $\eta_{\lambda 0}$ | $\eta_{\lambda+}$ | $\eta_{\lambda-}$ | $\eta_{\lambda 0}$ |
| Зимний период |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    |
| 1973          | 31,8              | 59,1              | 9,1                | 34,8              | 60,9              | 4,3                | 30,4              | 65,2              | 4,4                | 30,4              | 69,6              | —                  |
| 1974          | 45,8              | 45,8              | 8,3                | 52,0              | 48,0              | —                  | 28,0              | 72,0              | —                  | 45,8              | 50,0              | 4,2                |
| 1975          | 61,9              | 33,3              | 4,8                | 56,5              | 34,8              | 8,7                | 47,8              | 52,2              | —                  | 56,5              | 43,5              | —                  |
| 1976          | 57,9              | 42,1              | —                  | 42,1              | 52,6              | 5,3                | 42,1              | 52,6              | 5,3                | 57,9              | 36,8              | 5,3                |
| 1977          | 83,4              | 12,5              | 4,2                | 79,2              | 20,8              | —                  | 64,0              | 32,0              | 4,0                | 68,0              | 20,0              | 12,0               |
| Среднее . . . | 56,2              | 38,6              | 5,3                | 52,9              | 43,4              | 3,7                | 42,5              | 54,8              | 2,7                | 51,7              | 44,0              | 4,3                |
| Летний период |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    |
| 1973          | 41,2              | 58,8              | —                  | 47,0              | 53,0              | —                  | 42,4              | 57,6              | —                  | 42,4              | 54,6              | 3,0                |
| 1974          | 53,6              | 43,9              | 2,4                | 69,0              | 31,0              | —                  | 61,9              | 35,7              | 2,4                | 61,9              | 33,3              | 4,8                |
| 1975          | 43,6              | 54,6              | 1,8                | 60,7              | 39,3              | —                  | 53,6              | 42,9              | 3,6                | 60,7              | 33,9              | 5,4                |
| 1976          | 63,6              | 30,3              | 6,1                | 63,6              | 36,4              | —                  | 54,6              | 42,4              | 3,0                | 66,7              | 30,3              | 3,0                |
| 1977          | 67,7              | 32,3              | —                  | 58,0              | 42,0              | —                  | 64,5              | 35,5              | —                  | 64,5              | 35,5              | —                  |
| Среднее . . . | 53,9              | 44,0              | 2,1                | 59,7              | 40,3              | —                  | 55,4              | 42,8              | 1,8                | 59,2              | 37,5              | 3,2                |
|               |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    | 53,0              | 44,1              | 2,9                |
|               |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    | 71,4              | 28,6              | —                  |
|               |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    | 58,2              | 40,0              | 1,8                |
|               |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    | 63,6              | 33,3              | 3,0                |
|               |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    | 61,3              | 35,5              | 3,2                |
|               |                   |                   |                    |                   |                   |                    |                   |                   |                    | 61,5              | 36,3              | 2,2                |

преобладает над средним числом отрицательных отклонений, за исключением нескольких случаев.

Если рассмотреть относительное число случаев положительных, отрицательных и нулевых значений  $\eta_\lambda$  отдельно в зимний и летний периоды в Карадаге, то, как видно из табл. 4, в летний период положительных значений наблюдается больше, чем в зимний период (за исключением длины волны  $\lambda = 344$  нм). Наоборот, число случаев отрицательных значений  $\eta_\lambda$  больше в основном в зимний период.

Из изложенного выше можно сделать следующие выводы:

1. Не наблюдается регулярного, симметричного по отношению к полудню роста аэрозольного помутнения атмосферы в области спектра 344—572 нм.

2. Отмечается небольшое в среднем увеличение аэрозольного помутнения атмосферы в полдень, составляющее за пять лет для величины показателя аэрозольного ослабления атмосферы 1—3 %.

3. В летний период число случаев положительных отклонений показателя аэрозольного ослабления атмосферы от среднего за день значения превышает в основном число таких случаев в зимний период.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гущин Г. П. Терминология и обозначения, применяемые в атмосферной оптике и озонometriи.—Труды ГГО, 1973, вып. 312, с. 97—120.

2. Гущин Г. П. Некоторые результаты систематических измерений спектральной прозрачности атмосферы и аэрозолей на территории СССР.—Труды ГГО, 1974, вып. 344, с. 83—101.

3. Кондратьев К. Я. Актинометрия.—Л.: Гидрометеониздат, 1965.—691 с.

4. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности/Под ред. К. Я. Кондратьева.—Л.: Гидрометеониздат, 1969.—564 с.

*Г. П. Гущин, Т. А. Павлюченкова, П. А. Александров*

## ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Оптические свойства перистых облаков (Ci) являются в настоящее время объектом исследования геофизиков.

Известно небольшое количество работ [6, 7], в которых приводятся результаты эпизодических исследований оптических характеристик перистых облаков. В настоящей работе приведены результаты систематических исследований оптических свойств перистых облаков в разных географических районах СССР.

Для исследования оптических характеристик перистых облаков в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова был разработан метод измерения этих характеристик с использованием аппаратуры, которая применяется для измерения спектральной прозрачности атмосферы [1, 2].

В качестве оптических характеристик перистых облаков были приняты две следующие величины.

1. Спектральный коэффициент пропускания перистых облаков (или, короче, спектральное пропускание перистых облаков)  $\tau_{\lambda \text{Ci}}$ . Спектральное пропускание перистых облаков представляет собой отношение потока излучения, прошедшего через перистые облака в вертикальном направлении, к потоку излучения, упавшему на границу этих облаков. В некоторых случаях рассматривается спектральное пропускание перистых облаков в наклонном направлении (например, для оптических масс 2, 3, 4 и т. д.). В этих случаях наклонное прохождение луча через перистые облака всегда специально оговаривается и сама величина пропускания обозначается  $\tau_{\lambda \text{Ci}}(\theta)$ , где  $\theta$  — угловая высота центра солнечного диска.

При этом

$$\tau_{\lambda \text{Ci}}(\theta) = \frac{I_{\lambda \text{Ci}}(\theta)}{I_{0\lambda}}, \quad (1)$$

где в рассматриваемом случае  $I_{\lambda \text{Ci}}(\theta)$  и  $I_{0\lambda}$  — прямая солнечная радиация у поверхности земли и на верхней границе атмосферы соответственно.

2. Спектральный показатель ослабления перистых облаков  $\delta_{\lambda C_1}$ . Указанный показатель равен десятичному логарифму величины, обратной спектральному коэффициенту пропускания перистых облаков, рассчитанному на единицу оптической массы, т. е.

$$\delta_{\lambda C_1} = \frac{-\lg \tau_{\lambda C_1}(\theta)}{m}, \quad (2)$$

где  $m$  — оптическая масса перистых облаков (обычно принимается, что  $m$  равно оптической массе атмосферы).

Если рассматривать атмосферу в целом, то в окнах прозрачности будет справедлива известная формула Бугера:

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} \cdot 10^{-(\alpha_{\lambda} \Omega \mu + \beta_{\lambda} m + \delta_{\lambda} m_1 + \delta_{\lambda C_1} m)}, \quad (3)$$

где  $\alpha_{\lambda}$  — показатель поглощения атмосферного озона,  $\Omega$  — суммарный озон;  $\mu$ ,  $m$ ,  $m_1$  — оптические массы озона, атмосферы и слоя аэрозоля соответственно;  $\beta_{\lambda}$  — показатель рэлеевского рассеяния атмосферы;  $\delta_{\lambda}$  — показатель аэрозольного ослабления атмосферы, а аргумент  $\theta$  опущен.

Формула (3) применялась для расчета спектрального показателя ослабления перистых облаков  $\delta_{\lambda C_1}$ .

Использовалось два способа расчета величины  $\delta_{\lambda C_1}$  в случае наземных измерений.

Первый способ заключается в поочередном измерении спектрального пропускания атмосферы с перистыми облаками и спектрального пропускания атмосферы без облаков на диске Солнца при неизменной оптической массе. Такие измерения производятся при высоком угловом положении Солнца в период, близкий к полудню. Промежуток времени между измерениями с облаками и без облаков обычно не превышает 15 мин. Пусть при отсутствии облаков в районе диска Солнца отсчет по спектрофотометрическому прибору, наведенному на центр солнечного диска, равен  $I_{\lambda}$ . Если внеатмосферная постоянная прибора  $I_{0\lambda}$  выражена в тех же единицах, что и отсчет  $I_{\lambda}$ , то на основании (3) для безоблачной атмосферы справедлива формула

$$\lg I_{\lambda} = \lg I_{0\lambda} - \alpha_{\lambda} \Omega \mu - \beta_{\lambda} m - \delta_{\lambda} m_1. \quad (4)$$

При наличии перистых облаков на диске Солнца и при той же оптической массе будем согласно (3) иметь

$$\lg I_{\lambda C_1} = \lg I_{0\lambda} - \alpha_{\lambda} \Omega \mu - \beta_{\lambda} m - \delta_{\lambda} m_1 - \delta_{\lambda C_1} m. \quad (5)$$

Вычитая из выражения (4) выражение (5), получим

$$\lg I_{\lambda} - \lg I_{\lambda C_1} = \delta_{\lambda C_1} m. \quad (6)$$

Отсюда

$$\delta_{\lambda C_1} = \frac{\lg I_{\lambda} - \lg I_{\lambda C_1}}{m}. \quad (7)$$

Формула (7) позволяет вычислить спектральный показатель ослабления перистых облаков без нахождения внеатмосферных постоянных  $I_{0\lambda}$ .

Второй способ измерения спектрального показателя ослабления перистых облаков заключается в поочередном определении спектрального пропускания атмосферы с перистыми облаками на диске Солнца  $\delta_\lambda + \delta_{\lambda Cl}$  и спектрального показателя аэрозольного ослабления атмосферы без облаков на диске Солнца  $\delta_\lambda$  при разных оптических массах. При этом измерения могут производиться с интервалом времени до 1 ч, в течение которого мало вероятно существенное изменение спектрального показателя аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_\lambda$ . Величина  $\delta_{\lambda Cl}$  находится тогда из разности

$$\delta_{\lambda Cl} = (\delta_\lambda + \delta_{\lambda Cl}) - \delta_\lambda. \quad (8)$$

Сумма  $\delta_\lambda + \delta_{\lambda Cl}$  определяется согласно (5) из формулы

$$\delta_\lambda + \delta_{\lambda Cl} = \frac{\lg I_{0\lambda} - \lg I_{\lambda Cl}}{m} - \alpha_\lambda \Omega - \beta_\lambda, \quad (9)$$

где  $I_{\lambda Cl}$  — отсчет по прибору, направленному на центр солнечного диска, покрытого перистыми облаками. При выводе формулы (9) было предположено, что  $\mu = m = m_1$ . Это предположение, как показано в работе [5], выполняется достаточно точно при высоте Солнца более  $10^\circ$  (при высотах Солнца менее  $10^\circ$  наблюдения не проводились). Значение  $\delta_\lambda$  находится согласно (4) из формулы

$$\delta_\lambda = \frac{\lg I_{0\lambda} - \lg I_\lambda}{m'} - \alpha_\lambda \Omega - \beta_\lambda, \quad (10)$$

где  $I_\lambda$  — отсчет по прибору при отсутствии облаков на диске Солнца,  $m'$  — оптическая масса атмосферы в момент измерения (она может отличаться от массы  $m$ ).

Для измерения спектрального пропускания перистых облаков применялся прибор М-83 [1, 2]. В качестве диспергирующей системы в приборе М-83 применяется набор стеклянных светофильтров, характеристики которых показаны в табл. 1.

Представляются важными три следующих обстоятельства при оценке погрешности измерения оптических характеристик перистых облаков прибором М-83:

1) оценка влияния ореола (или боковой засветки) в пределах телесного угла прибора;

2) оценка влияния эффекта Форбса в связи с применением широкополосных светофильтров;

3) оценка погрешности величин внеатмосферных постоянных.

Оценка влияния ореола в пределах телесного угла прибора М-83 производилась экспериментально с помощью специально изготовленных экранов, перекрывающих прямой солнечный свет. Методика работы и устройство с экранами были описаны ранее в работе [4]. Экран, выставляемый перед входным отверстием прибора, закрывал прямой солнечный свет в пределах двух угловых градусов. В этом случае в прибор мог попадать только рассеянный свет

Характеристика светофильтров, применяемых в приборе М-83

| Светофильтр | Марка (толщина, мм)<br>светофильтров               | Длина волны, совпадающая с максимумом спектральной чувствительности, нм | Ширина кривой спектральной чувствительности на половине высоты, нм | Примечание                                                           |
|-------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 1-й         | УФС-2 (3,5) + ЖС-20 (9)                            | 298                                                                     | 21                                                                 | Для измерения озона                                                  |
| 2-й         | УФС-2 (8,5) + ЖС-3 (2) +<br>+СЗС-21 (1) + СС-4 (1) | 326                                                                     | 21                                                                 |                                                                      |
| 3-й         | УФС-2 (8,5) + ЖС-3 (1) +<br>+ СС-5 (1)             | 344                                                                     | 31                                                                 | Для измерения спектральной прозрачности атмосферы и перистых облаков |
| 4-й         | СЗС-9 (2) + УФС-2 (3,5)                            | 369                                                                     | 22                                                                 |                                                                      |
| 5-й         | ЗС-2 (7,5)                                         | 540                                                                     | 60                                                                 |                                                                      |
| 6-й         | ЖС-16 (6) + СС-4 (5)                               | 463                                                                     | 17                                                                 |                                                                      |
| 7-й         | ЗС-2 (2) + ОС-14 (2)                               | 572                                                                     | 33                                                                 |                                                                      |
| 8-й         | СЗС-21 (1) + КС-13 (3)                             | 627                                                                     | 32                                                                 |                                                                      |

от кольцевой зоны с угловыми размерами 2—6° (предельный телесный угол прибора М-83 равен 6°). Для каждого светофильтра определялась величина

$$\eta = \frac{I_0}{I} \cdot 100 \%, \quad (11)$$

где  $I_0$  — отсчет при наличии экрана,  $I$  — отсчет без экрана. Величина  $\eta$  характеризует степень боковой засветки в приборе М-83.

Результаты измерений величины  $\eta$  приводятся в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Влияние боковой засветки на показания прибора М-83 в разных участках спектра. Плотные перистые облака. Карадагская обсерватория

| Номер прибора, дата измерений, высота Солнца $\theta$ | Измеряемая величина | $\lambda$ нм |      |      |     |      |     |
|-------------------------------------------------------|---------------------|--------------|------|------|-----|------|-----|
|                                                       |                     | 344          | 369  | 463  | 530 | 572  | 627 |
| № 9, 25 VII 1976 г.,<br>$\theta = 35 \div 40^\circ$   | $I_0$               | 5            | 1    | 0,5  | 1,0 | 0,5  | 0,5 |
|                                                       | $I$                 | 62           | 59   | 76   | 82  | 77   | 79  |
|                                                       | $\eta \%$           | 8,1          | 1,7  | 0,7  | 1,2 | 0,6  | 0,6 |
| № 99, 26 VII 1976 г.,<br>$\theta = 37 \div 46^\circ$  | $I_0$               | 17           | 11   | 5    | 4   | 2    | 2   |
|                                                       | $I$                 | 80           | 50   | 48   | 65  | 20   | 39  |
|                                                       | $\eta \%$           | 21,1         | 22,0 | 10,4 | 6,2 | 10,0 | 5,1 |

Таблица 3

Влияние боковой засветки на показания прибора М-83 в разных участках спектра. Тонкие перистые облака. Карадагская обсерватория

| Номер прибора, дата измерений, высота Солнца $\theta$ | Измеряемая величина | $\lambda$ нм |     |     |     |     |     |
|-------------------------------------------------------|---------------------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                                       |                     | 344          | 369 | 463 | 530 | 572 | 627 |
| № 99, 26 VII 1977 г.,<br>$\theta=30\div 50^\circ$     | $I_\theta$          | 2            | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 0,5 |
|                                                       | $I$                 | 49           | 63  | 72  | 69  | 80  | 74  |
|                                                       | $\eta \%$           | 4,2          | 0,8 | 1,4 | 0,7 | 1,2 | 0,7 |
|                                                       |                     | $\lambda$ нм |     |     |     |     |     |
|                                                       |                     | 636          | 670 | 728 | 756 | 860 | 960 |
|                                                       | $I_\theta$          | 0,5          | 1   | 0,5 | 0,5 | 1   | 1   |
|                                                       | $I$                 | 60           | 34  | 51  | 32  | 79  | 50  |
|                                                       | $\eta \%$           | 0,8          | 2,9 | 1,0 | 1,6 | 1,3 | 2,0 |

Как видно из табл. 2, для плотных перистых облаков величина боковой засветки  $\eta$  в ряде случаев превышает 10 %, и, следовательно, наличие рассеянного света от плотных перистых облаков в пределах телесного угла прибора заметно искажает измеряемую величину спектрального пропускания этих облаков. Однако для тонких перистых облаков во всех случаях величина боковой засветки меньше 5 % (табл. 3), а для 4—11-го светофильтров в основном не превышает 1 %. Ввиду этого производились измерения спектрального пропускания только тонких и средних по плотности перистых облаков.

Влияние эффекта Форбса на показания прибора М-83 рассчитывалось по методике, подобной той, которая была принята в работе [3]. Определялась близость эффективной прозрачности  $P_{\text{эф}}$ , измеряемой в действительности прибором М-83 при наличии перистых облаков, к спектральной прозрачности  $P_\lambda$ , относящейся к длине волны  $\lambda$ , совпадающей с максимумом спектральной чувствительности прибора. Для расчета использовался критерий применимости закона Бугера к спектрофотометрическому прибору [3]

$$\left| \frac{P_{\text{эф}} - P_\lambda}{P_\lambda} \cdot 100\% \right| < 2\%. \quad (12)$$

Расчеты левой части выражения (12) для 3—8-го светофильтров показали, что при высоте Солнца от 10 до 90° она меньше 2 % и, следовательно, влияние эффекта Форбса на измеряемую величину пропускания атмосферы с перистыми облаками незначительно

(в основном не превышает 1 %) и им можно поэтому пренебречь. При этом также было выяснено, что с увеличением длины волны указанное влияние эффекта Форбса уменьшается.

Оценка погрешности величин внеатмосферной постоянной  $l_{0\lambda} = \lg I_{0\lambda}$  для разных светофильтров производилась согласно методике, принятой в работах [2, 3]. При этом погрешность среднего арифметического значения  $\bar{l}_{0\lambda}$  рассчитывалась по формуле

$$\sigma_{\bar{l}_{0\lambda}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_{0\lambda, i} - \bar{l}_{0\lambda})^2}{n(n-1)}}. \quad (13)$$

Значения величин  $l_{0\lambda, i}$  и  $\sigma_{\bar{l}_{0\lambda}}$  для различных светофильтров (с 3-го по 8-й) и разных станций приводятся в табл. 4.

Таблица 4

Максимальные и минимальные значения внеатмосферных постоянных  $l_{0i}$ , средние значения  $\bar{l}_{0i}$  и их погрешности  $\sigma_{\bar{l}_{0i}}$ . Май—сентябрь 1977 г.

|                | $l_{03}$ | $l_{04}$ | $l_{05}$ | $l_{06}$ | $l_{07}$ | $l_{08}$ |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Большая Елань  |          |          |          |          |          |          |
| $\max l_{0i}$  | 1,99     | 3,37     | 2,67     | 3,09     | 2,94     | 1,50     |
| $\min l_{0i}$  | 1,91     | 3,28     | 2,59     | 3,01     | 2,87     | 1,43     |
| $\bar{l}_{0i}$ | 1,96     | 3,33     | 2,64     | 3,05     | 2,91     | 1,47     |
| $\sigma$       | 0,006    | 0,007    | 0,007    | 0,007    | 0,006    | 0,006    |
| Воронеж        |          |          |          |          |          |          |
| $\max l_{0i}$  | 2,02     | 3,20     | 2,47     | 3,24     | 3,06     | 1,45     |
| $\min l_{0i}$  | 1,90     | 3,02     | 2,32     | 3,12     | 2,96     | 1,34     |
| $\bar{l}_{0i}$ | 1,96     | 3,13     | 2,40     | 3,19     | 3,02     | 1,40     |
| $\sigma$       | 0,010    | 0,014    | 0,011    | 0,010    | 0,008    | 0,009    |
| Сковородино    |          |          |          |          |          |          |
| $\max l_{0i}$  | 2,15     | 3,32     | 3,07     | 3,37     | 3,26     | 2,41     |
| $\min l_{0i}$  | 2,09     | 3,28     | 2,98     | 3,31     | 3,16     | 2,35     |
| $\bar{l}_{0i}$ | 2,13     | 3,30     | 3,01     | 3,34     | 3,20     | 2,37     |
| $\sigma$       | 0,005    | 0,004    | 0,008    | 0,005    | 0,010    | 0,005    |

Как видно из табл. 4, абсолютные погрешности величин  $\bar{l}_{0\lambda}$  для разных светофильтров в основном не превышают 0,010.

Погрешность величин спектрального пропускания перистых облаков  $\tau_{\lambda CI}$  и спектрального показателя ослабления перистых облаков  $\delta_{\lambda CI}$  определяется по методике, принятой в работе [3].

Таблица 5

Средние за период наблюдений значения спектрального показателя ослабления перистых облаков ( $10^{-3} \delta_{\lambda \text{Cl}}$ ) по некоторым станциям. 1977 г.

| Станция                   | Период наблюдений (месяцы) | $\lambda$ нм |     |     |     |     |     |
|---------------------------|----------------------------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                           |                            | 344          | 369 | 463 | 530 | 572 | 627 |
| Большая Елань . . . . .   | I—IX                       | 020          | 022 | 019 | 019 | 020 | 016 |
| Владивосток . . . . .     | V—VI                       | 026          | 025 | 020 | 015 | 021 | 020 |
| Зоронж . . . . .          | III—VIII                   | 027          | 029 | 026 | 022 | 025 | 016 |
| Иркутск . . . . .         | V                          | 052          | 051 | 036 | 042 | 038 | 033 |
| Красноярск . . . . .      | V—VIII                     | 022          | 018 | 012 | 009 | 008 | 008 |
| Ленинград (ГГО) . . . . . | V                          | 026          | 026 | 018 | 019 | 011 | 022 |
| Мурманск . . . . .        | V—VIII                     | 025          | 025 | 024 | 021 | 021 | 022 |
| Одесса . . . . .          | V—VIII                     | 032          | 027 | 023 | 018 | 015 | 022 |
| Свердловск . . . . .      | V—VII                      | 026          | 025 | 016 | 017 | 018 | 013 |
| Сковородино . . . . .     | III—IX                     | 016          | 018 | 017 | 015 | 015 | 013 |
| Теодосия (ГГО) . . . . .  | I—IX                       | 030          | 024 | 020 | 019 | 019 | 017 |
| Тарджу . . . . .          | V—VII                      | 019          | 020 | 009 | 008 | 019 | 032 |

Предельная относительная погрешность величины  $\tau_{\lambda \text{Cl}}$  определяется путем нахождения полного дифференциала выражения (1). Произведя дифференцирование, получим

$$\frac{d\tau_{\lambda \text{Cl}}}{\tau_{\lambda \text{Cl}}} = \left| \frac{dI_{\lambda \text{Cl}}}{I_{\lambda \text{Cl}}} \right| + \left| \frac{dI_{0\lambda}}{I_{0\lambda}} \right|. \quad (14)$$

Отсюда, учитывая, что  $\Delta I_{0\lambda}/I_{0\lambda} = 2,3 \Delta I_{0\lambda}$ , будем иметь  $\Delta \tau_{\lambda \text{Cl}}/\tau_{\lambda \text{Cl}} = 0,02 + 0,023 = 0,043 = 4,3 \%$ .

Следовательно, для средних условий предельная относительная погрешность величины  $\tau_{\lambda \text{Cl}}$  равна 4,3 %.

Для тонких и средних по плотности перистых облаков предельная абсолютная погрешность величины  $\delta_{\lambda \text{Cl}}$  будет близка к предельной абсолютной погрешности величины  $\delta_{\lambda}$ . Как показано в работе [3], предельная абсолютная погрешность величины  $\delta_{\lambda}$  равна 0,02. Следовательно, предельная абсолютная погрешность единичного измерения  $\delta_{\lambda \text{Cl}}$  будет близка к 0,02. При  $n$  измерениях погрешность величины  $\delta_{\lambda \text{Cl}}$  будет уменьшаться обратно пропорционально  $\sqrt{n}$  (если распределение случайных погрешностей близко к гауссовскому распределению).

Для исследования оптических характеристик перистых облаков в различных географических районах СССР была организована небольшая сеть станций (табл. 5).

На сети станций измерение спектрального показателя ослабления перистых облаков и обработка первичных данных производилась в основном по второму способу. В табл. 5 показаны средние за период наблюдений значения спектрального показателя ослабления перистых облаков  $\delta_{\lambda \text{Cl}}$  в шести участках ультрафиолетовой

и видимой области спектра, относящиеся к тонким и средним по плотности перистым облакам. Разброс отдельных значений  $\delta_{\lambda c}$  для указанных разновидностей перистых облаков и длин волн колебался в основном от 0,005 до 0,080.

Проводились сравнения спектрального показателя ослабления перистых облаков  $\delta_{\lambda c}$  с измеренным одновременно показателем аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_{\lambda}$ . Как видно из рис. 1, ослабление аэрозолем атмосферы превышает ослабление, вызываемое тонкими и средними по плотности перистыми облаками.

Средние значения спектрального показателя ослабления перистых облаков  $\delta_{\lambda c}$  в зависимости от длины волны  $\lambda$  для разных станций показаны на рис. 2. Как видно из рисунка, имеется зависимость величины  $\delta_{\lambda c}$  от длины волны  $\lambda$ , заключающаяся в том, что

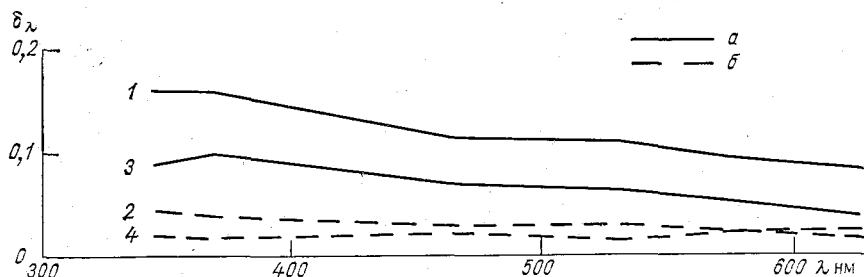


Рис. 1. Показатель аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_{\lambda}$  (а) и показатель ослабления перистых облаков  $\delta_{\lambda c}$  (б) в зависимости от длины волны  $\lambda$ .

Большая Елань, 1977 г.

1 и 2 — 26 II, 3 и 4 — 23 VI.

величина  $\delta_{\lambda c}$  в среднем медленно уменьшается с ростом  $\lambda$ . Такое уменьшение происходит в среднем медленнее, чем уменьшение показателя аэрозольного ослабления атмосферы  $\delta_{\lambda}$ . Это обстоятельство указывает на то, что частицы, образующие перистые облака, относительно более крупные, чем аэрозольные частицы.

Важной особенностью данных, приведенных на рис. 2, является то, что среднее для всех станций значение спектрального показателя ослабления перистых облаков  $\delta_{\lambda c}$  близко к 0,020. Это среднее значение, как уже указывалось, относится к тонким и средним по плотности перистым облакам.

С целью расширения области спектра для измерения спектрального показателя ослабления перистых облаков использовался модифицированный прибор М-83 с фотоэлементом Ф-5 и набором стеклянных светофильтров, выделяющих участки спектра с центрами, совпадающими с длинами волн 636, 670, 728, 756, 860 и 960 нм. На рис. 3 приводятся некоторые результаты измерения спектрального показателя ослабления перистых облаков в расширенном диапазоне спектра для случая тонких и средних по плотности перистых облаков. Заметна зависимость величины  $\delta_{\lambda c}$  от длины волны  $\lambda$ .

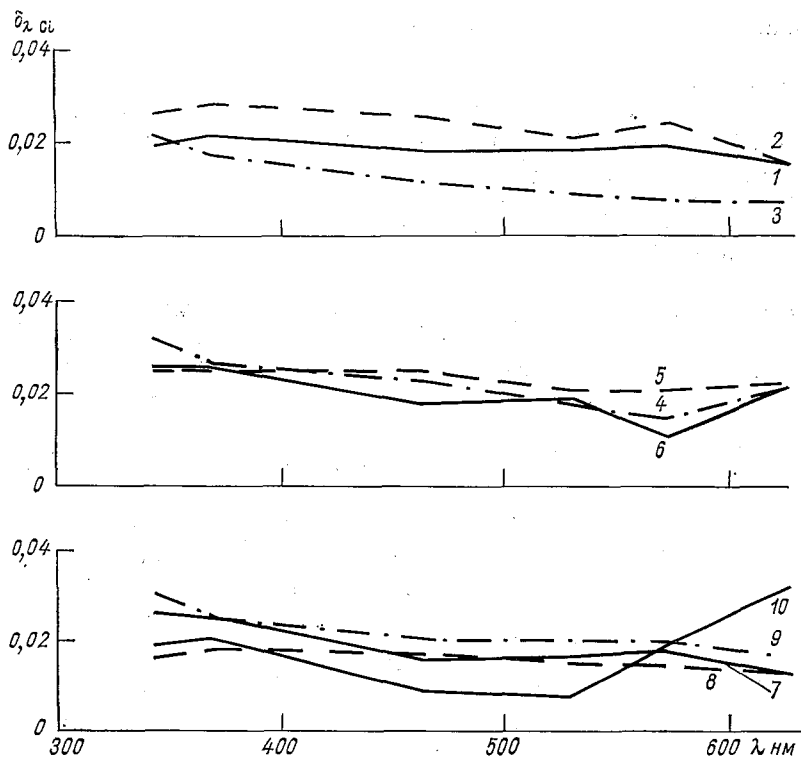


Рис. 2. Средние значения спектрального показателя ослабления перистых облаков  $\delta_{\lambda c_i}$  в зависимости от длины волны  $\lambda$ . 1977 г.

1 — Большая Елань, 2 — Воронеж, 3 — Красноярск, 4 — Ленинград, 5 — Мурманск, 6 — Одесса, 7 — Свердловск, 8 — Сквородино, 9 — Феодосия, 10 — Чарджоу.

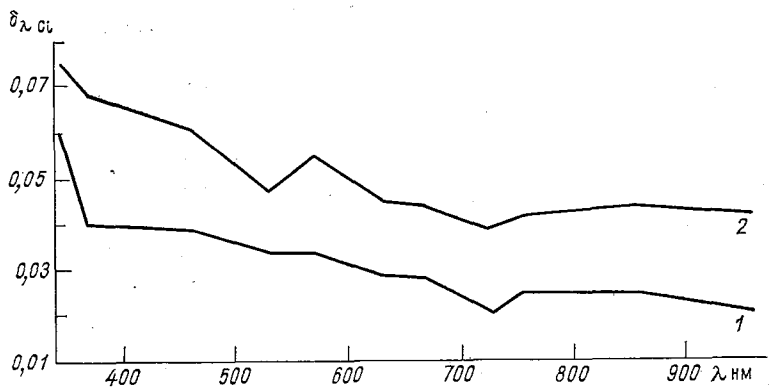


Рис. 3. Спектральный показатель ослабления перистых облаков  $\delta_{\lambda c_i}$  в зависимости от длины волны  $\lambda$ . Карадаг.

1) 2 VIII 1976 г., среднее из 4 серий; 2) 3 VIII 1976 г., среднее из 5 серий.

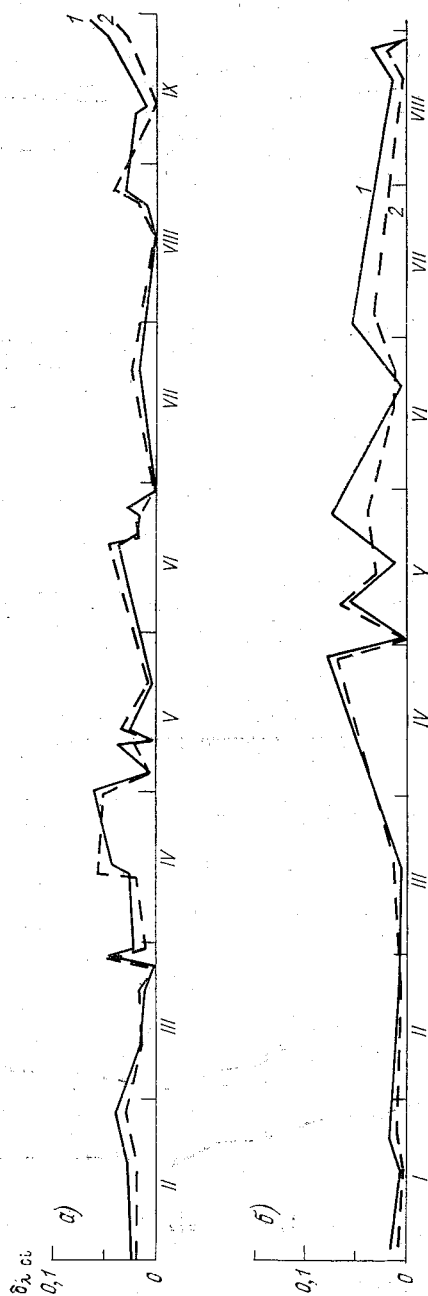


Рис. 4. Средние за день значения спектрального показателя ослабления перистых облаков  $\delta_{\lambda c1}$  · 1977 г.

*a* — Большая Елань, *б* — Феодосия; 1 —  $\lambda = 369 \text{ nm}$ , 2 —  $\lambda = 530 \text{ nm}$ .

Следует заметить, что данные, приведенные на рис. 3, были получены по модифицированному прибору, в котором применялся экран, периодически перекрывающий прямой солнечный свет при оценке влияния ореола. Если бы ореол в пределах телесного угла прибора не учитывался, то показатель  $\delta_{\lambda\text{СИ}}$  в ультрафиолетовой области спектра имел бы меньшее значение и спектральный ход был бы менее заметен.

Для наглядного представления о временной изменчивости средних за день значений величины  $\delta_{\lambda\text{СИ}}$  приводится рис. 4, на котором показаны значения  $\delta_{\lambda\text{СИ}}$  для  $\lambda = 369$  нм и  $\lambda = 530$  нм. Из рис. 4

Таблица 6

Среднее спектральное пропускание перистых облаков  $\tau_{\lambda\text{СИ}}(\theta)$  в различных участках спектра при разных оптических массах  $m$ . 1977 г. (%)

| Пункт наблюдений        | $m$ | $\lambda$ |      |      |      |      |      |
|-------------------------|-----|-----------|------|------|------|------|------|
|                         |     | 344       | 369  | 463  | 530  | 572  | 627  |
| Большая Елань . . . . . | 1   | 95,5      | 95,0 | 95,8 | 95,8 | 95,5 | 96,4 |
|                         | 3   | 87,1      | 85,9 | 97,7 | 87,7 | 87,1 | 89,5 |
|                         | 5   | 79,4      | 77,7 | 80,4 | 80,4 | 79,4 | 83,2 |
| Владивосток . . . . .   | 1   | 94,2      | 94,4 | 95,5 | 96,6 | 95,3 | 95,5 |
|                         | 3   | 83,5      | 84,2 | 87,1 | 90,2 | 86,5 | 87,1 |
|                         | 5   | 74,2      | 75,0 | 79,4 | 84,1 | 78,6 | 79,4 |
| Воронеж . . . . .       | 1   | 94,0      | 93,5 | 94,2 | 95,0 | 94,4 | 96,4 |
|                         | 3   | 83,0      | 81,8 | 83,6 | 85,9 | 84,2 | 89,5 |
|                         | 5   | 73,3      | 71,6 | 74,2 | 77,6 | 75,0 | 83,2 |
| Иркутск . . . . .       | 1   | 88,7      | 89,0 | 92,0 | 90,8 | 91,6 | 92,7 |
|                         | 3   | 69,8      | 70,3 | 78,0 | 74,8 | 76,9 | 79,6 |
|                         | 5   | 55,0      | 55,6 | 66,1 | 61,7 | 64,6 | 68,4 |
| Красноярск . . . . .    | 1   | 95,0      | 95,9 | 97,3 | 98,0 | 98,2 | 98,2 |
|                         | 3   | 95,9      | 88,3 | 92,0 | 94,0 | 94,6 | 94,6 |
|                         | 5   | 77,6      | 81,3 | 87,1 | 90,2 | 91,2 | 91,2 |
| Ленинград . . . . .     | 1   | 94,2      | 94,2 | 95,9 | 95,7 | 97,5 | 95,0 |
|                         | 3   | 83,5      | 83,5 | 88,3 | 87,7 | 92,7 | 85,9 |
|                         | 5   | 74,1      | 74,1 | 81,3 | 80,4 | 88,1 | 77,7 |
| Мурманск . . . . .      | 1   | 94,4      | 94,4 | 94,6 | 95,3 | 95,3 | 97,0 |
|                         | 3   | 84,2      | 84,2 | 84,7 | 86,5 | 86,5 | 91,4 |
|                         | 5   | 75,0      | 75,0 | 75,9 | 78,6 | 78,6 | 86,2 |
| Одесса . . . . .        | 1   | 92,9      | 94,0 | 94,9 | 95,9 | 96,6 | 95,0 |
|                         | 3   | 80,2      | 83,0 | 85,3 | 88,3 | 90,2 | 85,9 |
|                         | 5   | 69,2      | 73,3 | 76,8 | 81,3 | 84,1 | 77,6 |
| Свердловск . . . . .    | 1   | 94,2      | 94,4 | 96,4 | 96,2 | 95,9 | 97,0 |
|                         | 3   | 83,5      | 84,1 | 89,6 | 88,9 | 88,3 | 91,4 |
|                         | 5   | 74,1      | 75,0 | 83,2 | 82,2 | 81,3 | 86,1 |
| Сковородино . . . . .   | 1   | 96,4      | 95,9 | 96,1 | 96,6 | 96,6 | 97,0 |
|                         | 3   | 89,6      | 88,3 | 88,9 | 90,2 | 90,2 | 91,4 |
|                         | 5   | 83,2      | 81,3 | 82,2 | 84,2 | 84,2 | 86,1 |
| Феодосия . . . . .      | 1   | 93,3      | 94,6 | 95,5 | 95,7 | 95,7 | 96,2 |
|                         | 3   | 81,3      | 84,7 | 87,1 | 87,7 | 87,7 | 88,9 |
|                         | 5   | 70,8      | 75,9 | 79,4 | 80,4 | 80,4 | 82,2 |

следует, что тонкие и средние по плотности перистые облака характеризуются значительной изменчивостью спектрального пропускания от 0,005 до 0,080.

Представляет определенный интерес величина среднего спектрального пропускания перистых облаков  $\tau_{\lambda Cl}(\theta)$  при разных оптических массах  $m$ . С целью определения величины  $\tau_{\lambda Cl}(\theta)$  были использованы средние значения  $\delta_{\lambda Cl}$  на различных станциях (табл. 5). Величина  $\tau_{\lambda Cl}(\theta)$  вычислялась по формуле

$$\tau_{\lambda Cl}(\theta) = 10^{-m\delta_{\lambda Cl}}. \quad (15)$$

В табл. 6 приводятся значения среднего спектрального пропускания перистых облаков  $\tau_{\lambda Cl}(\theta)$  на различных станциях. Из таблицы следует, что величина  $\tau_{\lambda Cl}(\theta)$  при  $m = 1$  изменяется от 88,8 до 98,2 %, причем пропускание в основном увеличивается с ростом длины волны  $\lambda$ . С увеличением массы  $m$  (или уменьшением высоты Солнца  $\theta$ ) среднее спектральное пропускание  $\tau_{\lambda Cl}(\theta)$  уменьшается в некоторых случаях вплоть до 55 %.

Таким образом, в результате исследования было выяснено, что с увеличением длины волны в области спектра 320—1000 нм происходит в основном небольшое уменьшение величины спектрального показателя ослабления тонких и средних по плотности перистых облаков, что среднее значение спектрального показателя ослабления тонких и средних по плотности перистых облаков равна 0,020 с пределами колебаний 0,005—0,100, а спектральное пропускание тонких и средних по плотности перистых облаков изменяется в среднем от 88 до 98 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 367375 (СССР). Измеритель спектральной прозрачности атмосферы/ Г. Н. Гушин.— Заявл. 12.07.71, № 1678102/18—10; опубл. 23.01.73.— Бюлл. открытий, изобрет. и промышленных образцов и товарн. знаков, № 8, 1973.
2. Гушин Г. П. Методические указания по производству и обработке наблюдений за спектральной прозрачностью атмосферы и характеристиками атмосферных аэрозолей.— Л.: Гидрометеиздат, 1972.— 53 с.
3. Гушин Г. П. Методика и прибор для измерения спектральной прозрачности атмосферы и характеристик атмосферных аэрозолей.— Труды ГГО, 1974, вып. 324, с. 77—100.
4. Гушин Г. П., Александров П. А. О влиянии рассеянной около-солнечной радиации на показания прибора М-83.— Труды ГГО, 1970, вып. 255, с. 69—72.
5. Гушин Г. П., Жукова М. П. Оптические массы атмосферы и аэрозоля.— Труды ГГО, 1977, вып. 384, с. 32—43.
6. Кондратьев К. Я. Актинометрия.— Л.: Гидрометеиздат, 1965.— 691 с.
7. Попова Л. В., Бадинов И. Я. О некоторых результатах измерения спектральной прозрачности атмосферы в условиях облачности верхнего яруса.— В кн.: Проблемы физики атмосферы/Под ред. К. Я. Кондратьева. Л., 1967, с. 146—153.

*С. И. Зачек*

## **РАСЧЕТ СВЕТОФИЛЬТРОВ К ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИЕМНИКАМ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ**

В настоящее время измерения освещенности осуществляются главным образом приборами, в которых применяются фотоэлектрические приемники излучений [8, 10, 11]. При использовании таких приемников ввиду их селективности и нестабильности возникают трудности, связанные с необходимостью частой поверки их спектральной чувствительности [2]. Кроме того, большинство приборов, выпускаемых промышленностью [8], предназначены в основном для измерений освещенности в помещениях. Эти приборы мало пригодны для регистрации естественной освещенности, так как их конструкции зачастую не приспособлены для длительной работы на открытом воздухе.

В настоящей статье рассматривается возможность применения неселективных или малоселективных термоэлектрических приемников радиации для наблюдений за дневной освещенностью в естественных условиях.

Постановка этой задачи обусловлена тем, что при измерениях энергетических потоков накоплен большой опыт работы с термоэлектрическими приемниками. Применение неселективных приемников для измерений освещенности позволит использовать существующую в актинометрии метрологическую систему. Произойдет разработка термоэлектрических приемников с повышенной чувствительностью [3], что позволит до некоторой степени преодолеть трудности, существующие при использовании низких по чувствительности металлических термопар.

Методика определения освещенности приемниками излучения основана на приведении результата измерения к значению освещенности, определяемому относительной видимостью  $v(\lambda)$ . Освещенность  $E$ , обусловленная сложным энергетическим излучением, при измерении неселективными приемниками, снабженными исправляющими фильтрами, рассчитывается по формуле, аналогичной той, которая приведена в работе [2],

$$E = c \frac{1}{\tau_m} R I_{\tau}, \quad (1)$$

где  $c$  — постоянная, равная 683 лм/Вт,  $\tau_m$  — максимальное значение коэффициента пропускания фильтра,  $I_\tau$  — плотность интегрального энергетического потока излучения после прохождения фильтра (Вт/см<sup>2</sup>),  $R$  — редукиционный множитель.

Редукиционный множитель служит для приведения результата измерения к относительной спектральной чувствительности  $v(\lambda)$  среднеадаптированного глаза и определяется отношением

$$R = \frac{\int_0^\infty v(\lambda) I_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty \tau_{н\lambda} I_\lambda d\lambda}, \quad (2)$$

где  $I_\lambda$  — плотность спектрального энергетического потока перед фильтром,  $\tau_{н\lambda}$  — нормированное значение спектрального коэффициента ослабления  $\tau_\lambda$  фильтра,

$$\tau_{н\lambda} = \frac{\tau_\lambda}{\tau_m}. \quad (3)$$

С целью выявления основных закономерностей изменения редукиционного множителя по формулам (1)–(3) были выполнены модельные расчеты  $R$  для ряда оптических режимов атмосферы а также для потоков, излучаемых абсолютно черным телом при различных температурах.

Редукиционные множители определялись для прямой, рассеянной и суммарной радиации при безоблачном небе с учетом ослабления аэрозолем и водяным паром. В качестве исходных данных о плотности потоков прямой солнечной радиации на перпендикулярную поверхность в зависимости от оптической массы атмосферы  $m$ , оптической толщины  $\tau_0(\lambda_0)$  и содержания водяного пара  $\omega$  были взяты значения  $S_m = I_\lambda$  из таблиц, составленных Авасте Молдау и К. С. Шифриным, для уровня 1000 мбар при безоблачной атмосфере [1]. Значения рассеянной радиации определялись по формуле Берлаге [7]. Спектральное распределение мощности излучения абсолютно черного тела при различных температурах вычислялось по формуле Планка.

В качестве фильтров использовались наборы из желто-зеленого ЖЗС-18, зеленого ЗС-8 и сине-зеленого стекла СЗС-25 [2]. Применение последнего типа стекла несколько улучшает характеристики фильтра по сравнению с ранее применявшимися [10], ввиду того что существенно уменьшается доля инфракрасного излучения. Спектральные коэффициенты фильтра рассчитывались по показателям пропускания (ГОСТ 9411–75) [9] с помощью известных формул [4]. Результаты проведенных на ЭВМ вычислений сведены в табл. 1–3.

В табл. 1 наряду со значениями редукиционного множителя  $R$  приведены значения относительной погрешности  $\delta$ , обусловленной проникновением через фильтр ультрафиолетового излучения и радиации ближней инфракрасной области (отношение этого потока

Таблица 1

Значения редуционного множителя  $R$  и их отклонения ( $\gamma\%$ ) от средних при различных характеристиках светофильтров, оптических режимах атмосферы и значениях осажженной воды  $\omega=0,5; 2,1; 3,0$  см

|                                                                     | Вид радиации |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                     | S.           |       |       | Q     |       |       | D.    |       |       |
|                                                                     | $\tau_0$     |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                                                                     | 0,2          | 0,3   | 0,5   | 0,2   | 0,3   | 0,5   | 0,2   | 0,3   | 0,5   |
| Фильтр 1 ( $d_1=6,0, d_2=5,0, d_3=5,0$ ) <sup>1</sup> $\tau_m=0,50$ |              |       |       |       |       |       |       |       |       |
| $n = 1 R$                                                           | 1,56         | 1,56  | 1,56  | 1,56  | 1,56  | 1,56  | 1,57  | 1,57  | 1,56  |
| $\delta \%$                                                         | 0,002        | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| $\gamma \%$                                                         | 0,27         | 0,41  | 0,86  | 0,08  | 0,09  | 0,10  | -0,45 | -0,34 | -0,17 |
| $n = 2 R$                                                           | 1,56         | 1,56  | 1,57  | 1,56  | 1,56  | 1,56  | 1,57  | 1,56  | 1,56  |
| $\delta \%$                                                         | 0,002        | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| $\gamma \%$                                                         | 0,21         | 0,28  | 0,56  | 0,05  | 0,04  | 0,02  | -0,08 | -0,02 | 0,02  |
| $n = 4 R$                                                           | 1,57         | 1,57  | 1,59  | 1,57  | 1,57  | 1,57  | 1,56  | 1,56  | 1,56  |
| $\delta \%$                                                         | 0,003        | 0,003 | 0,004 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| $\gamma \%$                                                         | -0,015       | -0,25 | -0,61 | -0,06 | -0,08 | -0,08 | 0,24  | 0,17  | 0,08  |
| $n = 6 R$                                                           | 1,58         | 1,59  | 1,61  | 1,57  | 1,57  | 1,57  | 1,56  | 1,56  | 1,56  |
| $\delta \%$                                                         | 0,003        | 0,004 | 0,005 | 0,003 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,001 |
| $\gamma \%$                                                         | -0,79        | -1,10 | -2,05 | -0,17 | -0,13 | -0,04 | 0,36  | 0,20  | 0,01  |
| $R_{cp}$                                                            | 1,57         | 1,57  | 1,58  | 1,56  | 1,57  | 1,57  | 1,56  | 1,56  | 1,56  |
| Фильтр 2 ( $d_1=6,0, d_2=3,0, d_3=3,0$ ) $\tau_m=0,55$              |              |       |       |       |       |       |       |       |       |
| $n = 1 R$                                                           | 1,23         | 1,24  | 1,24  | 1,23  | 1,23  | 1,23  | 1,23  | 1,23  | 1,23  |
| $\delta \%$                                                         | 0,044        | 0,044 | 0,045 | 0,045 | 0,045 | 0,045 | 0,055 | 0,049 | 0,047 |
| $\gamma \%$                                                         | 0,42         | 0,56  | 0,90  | 0,10  | 0,10  | 0,06  | -0,11 | -0,03 | 0,06  |
| $n = 2 R$                                                           | 1,24         | 1,24  | 1,24  | 1,24  | 1,24  | 1,24  | 1,23  | 1,23  | 1,23  |
| $\delta \%$                                                         | 0,044        | 0,045 | 0,046 | 0,045 | 0,045 | 0,046 | 0,049 | 0,046 | 0,045 |
| $\gamma \%$                                                         | 0,23         | 0,23  | 0,50  | 0,04  | 0,02  | -0,02 | 0,01  | 0,05  | 0,06  |
| $n = 4 R$                                                           | 1,24         | 1,25  | 1,26  | 1,24  | 1,24  | 1,24  | 1,23  | 1,23  | 1,23  |
| $\delta \%$                                                         | 0,046        | 0,049 | 0,055 | 0,046 | 0,046 | 0,047 | 0,045 | 0,045 | 0,044 |
| $\gamma \%$                                                         | -0,24        | -0,35 | -0,58 | -0,07 | -0,06 | -0,04 | 0,04  | 0,00  | -0,06 |
| $n = 6 R$                                                           | 1,25         | 1,26  | 1,27  | 1,24  | 1,24  | 1,24  | 1,23  | 1,23  | 1,23  |
| $\delta \%$                                                         | 0,052        | 0,058 | 0,073 | 0,047 | 0,047 | 0,047 | 0,044 | 0,044 | 0,044 |
| $\gamma \%$                                                         | -0,87        | -1,12 | -1,79 | -0,14 | -0,07 | 0,03  | 0,01  | -0,08 | -0,16 |
| $R_{cp}$                                                            | 1,24         | 1,24  | 1,25  | 1,24  | 1,24  | 1,24  | 1,23  | 1,23  | 1,23  |

<sup>1</sup> Здесь и в табл. 2 и 3  $d_1, d_2, d_3$  — толщина пластин в миллиметрах из цветного оптического стекла СЗС-25, ЗС-8, ЖЗС-18 соответственно.

| Вид радиации |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| S            |     |     | Q   |     |     | D   |     |     |
| $\tau_0$     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 0,2          | 0,3 | 0,5 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,2 | 0,3 | 0,5 |

Фильтр 3 ( $d_1=6,0$ ,  $d_2=2,5$ ,  $d_3=2,5$ )  $\tau_m=0,57$

|             |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $m=1 R$     | 1,14  | 1,14  | 1,14  | 1,14  | 1,14  | 1,14  | 1,12  | 1,13  | 1,14  |
| $\delta \%$ | 0,102 | 0,101 | 0,101 | 0,105 | 0,105 | 0,105 | 0,135 | 0,126 | 0,116 |
| $\gamma \%$ | 0,54  | 0,68  | 0,99  | 0,13  | 0,11  | 0,05  | 0,12  | 0,16  | 0,22  |
| $m=2 R$     | 1,14  | 1,14  | 1,15  | 1,14  | 1,14  | 1,14  | 1,12  | 1,13  | 1,13  |
| $\delta \%$ | 0,098 | 0,098 | 0,100 | 0,104 | 0,105 | 0,106 | 0,126 | 0,119 | 0,116 |
| $\gamma \%$ | 0,27  | 0,32  | 0,49  | 0,04  | 0,01  | -0,03 | 0,06  | 0,09  | 0,09  |
| $m=4 R$     | 1,15  | 1,15  | 1,16  | 1,14  | 1,14  | 1,14  | 1,13  | 1,13  | 1,13  |
| $\delta \%$ | 0,097 | 0,101 | 0,111 | 0,105 | 0,106 | 0,108 | 0,116 | 0,110 | 0,107 |
| $\gamma \%$ | -0,32 | -0,43 | -0,63 | -0,08 | 0,07  | -0,01 | -0,03 | -0,11 | -0,13 |
| $m=6 R$     | 1,15  | 1,16  | 1,17  | 1,14  | 1,14  | 1,14  | 1,13  | 1,13  | 1,13  |
| $\delta \%$ | 0,105 | 0,114 | 0,142 | 0,103 | 0,109 | 0,110 | 0,109 | 0,107 | 0,106 |
| $\gamma \%$ | -1,00 | -1,22 | -1,78 | -0,13 | 0,04  | 0,08  | -0,21 | -0,27 | -0,32 |
| $R_{cp}$    | 1,14  | 1,15  | 1,15  | 1,14  | 1,14  | 1,14  | 1,13  | 1,13  | 1,13  |

Фильтр 4 ( $d_1=6,0$ ,  $d_2=1,7$ ,  $d_3=2,2$ )  $\tau_m=0,60$

|             |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $m=1 R$     | 1,04  | 1,04  | 1,04  | 1,04  | 1,04  | 1,04  | 1,02  | 1,02  | 1,02  |
| $\delta \%$ | 0,338 | 0,334 | 0,326 | 0,360 | 0,359 | 0,358 | 0,541 | 0,485 | 0,453 |
| $\gamma \%$ | 0,56  | 0,65  | 0,85  | 0,12  | 0,10  | 0,02  | 0,40  | 0,38  | 0,36  |
| $m=2 R$     | 1,04  | 1,04  | 1,04  | 1,04  | 1,04  | 1,04  | 1,02  | 1,02  | 1,03  |
| $\delta \%$ | 0,309 | 0,304 | 0,298 | 0,351 | 0,352 | 0,357 | 0,498 | 0,458 | 0,421 |
| $\gamma \%$ | 0,24  | 0,27  | 0,35  | 0,02  | -0,01 | -0,04 | 0,12  | 0,13  | 0,10  |
| $m=4 R$     | 1,05  | 1,05  | 1,05  | 1,04  | 1,04  | 1,03  | 1,02  | 1,03  | 1,03  |
| $\delta \%$ | 0,296 | 0,280 | 0,291 | 0,349 | 0,354 | 0,368 | 0,445 | 0,414 | 0,389 |
| $\gamma \%$ | -0,34 | -0,42 | -0,53 | -0,08 | -0,05 | 0,02  | -0,24 | -0,22 | -0,21 |
| $m=6 R$     | 1,05  | 1,05  | 1,06  | 1,04  | 1,04  | 1,03  | 1,03  | 1,03  | 1,03  |
| $\delta \%$ | 0,277 | 0,291 | 0,341 | 0,357 | 0,366 | 0,376 | 0,412 | 0,392 | 0,379 |
| $\gamma \%$ | -0,86 | -1,00 | -1,23 | -0,08 | 0,01  | 0,13  | -0,48 | -0,45 | -0,37 |
| $R_{cp}$    | 1,04  | 1,04  | 1,05  | 1,04  | 1,04  | 1,03  | 1,02  | 1,02  | 1,03  |

к интегральному потоку излучения после фильтра). В ней также даны отклонения значений редукионного множителя от их средних значений  $\gamma$  в зависимости от оптических масс, характеристик фильтра и прозрачности атмосферы.

В табл. 2а показан ход изменения редукионных множителей для спектра излучения абсолютно черного тела при температуре, изменяющейся от температуры искусственных источников света (примерно 3000 К) до температуры солнечной фотосферы (6000 К). В табл. 2б приведены редукионные множители для условий облачной атмосферы.

Таблица 2а

Редукионные множители  $R$  при разных температурах черного излучателя

| Т К                                       | Толщина фильтров      |                           |                           |                           |
|-------------------------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                                           | $d_1=6, d_2=5, d_3=5$ | $d_1=6, d_2=2,5, d_3=2,5$ | $d_1=6, d_2=2,2, d_3=2,2$ | $d_1=6, d_2=1,7, d_3=2,2$ |
| Т К                                       |                       |                           |                           |                           |
| 6000                                      | 1,561                 | 1,134                     | 1,027                     | 1,033                     |
| 5500                                      | 1,562                 | 1,137                     | 1,031                     | 1,036                     |
| 5000                                      | 1,565                 | 1,141                     | 1,036                     | 1,039                     |
| 4500                                      | 1,569                 | 1,146                     | 1,041                     | 1,043                     |
| 4000                                      | 1,577                 | 1,152                     | 1,048                     | 1,048                     |
| 2500                                      | 1,590                 | 1,161                     | 1,057                     | 1,054                     |
| 3000                                      | 1,614                 | 1,161                     | 1,067                     | 1,061                     |
| 2500                                      | 1,658                 | 1,173                     | 1,080                     | 1,068                     |
| 2000                                      | 1,746                 | 1,222                     | 1,096                     | 1,077                     |
| $\frac{R_{3000} - R_{6000}}{R_{6000}} \%$ | 3,4                   | 2,3                       | 3,8                       | 2,7                       |

Таблица 2б

Редукионные множители и отношения  $I_\lambda/\tau_m$  в условиях сплошной облачности (10 баллов St, нижняя граница 0,4 км, верхняя 0,85 км) при нисходящем потоке  $I_\lambda = 56,30$  мкал/(см<sup>2</sup>·мин) и освещенности  $E = 25,7$  клк на высоте 200 м при высоте Солнца 54,6°

| Характеристика     | $d_1=6, d_2=5, d_3=5$ | $d_1=6, d_2=3, d_3=3$ | $d_1=6, d_2=2,5, d_3=2,5$ | $d_1=6, d_2=1,7, d_3=2,2$ |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|
| $R$                | 1,554                 | 1,230                 | 1,311                     | 1,028                     |
| $I_\lambda/\tau_m$ | 36,24                 | 45,84                 | 49,71                     | 54,58                     |

В табл. 3 для спектра прямой солнечной радиации стандартной актинометрической атмосферы и различных фильтров даны значения плотностей потоков  $I_0$ , ответственных за световое ощущение, нормированной плотности излучения  $I_\tau/\tau_m$  после фильтра

и нормированной плотности потока  $\Delta I_{\tau}/\tau_m$  за пределами относительной кривой видности (примерно  $\lambda < 430$  нм,  $\lambda > 720$  нм).

Таблица 3

Значения световых и энергетических потоков (мккал/(см<sup>2</sup>·мин))  
для стандартной актинометрической атмосферы  $\tau_0=0,3$ ,  $\omega=2,1$  см

|                                                            | <i>m</i> |        |        |        |        |       |       |
|------------------------------------------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
|                                                            | 1        | 1,5    | 2,0    | 2,5    | 3,0    | 4,0   | 6,0   |
| Фильтр 1 ( $d_1=6$ , $d_2=5$ , $d_3=5$ ) $\tau_m=0,5$      |          |        |        |        |        |       |       |
| $I_{\tau}/\tau_m$                                          | 134,28   | 114,13 | 96,95  | 82,44  | 70,09  | 50,64 | 26,63 |
| $\Delta I_{\tau}/\tau_m$                                   | 0,003    | 0,003  | 0,002  | 0,002  | 0,002  | 0,002 | 0,001 |
| <i>R</i>                                                   | 1,563    | 1,563  | 1,565  | 1,566  | 1,568  | 1,573 | 1,586 |
| Фильтр 2 ( $d_1=6$ , $d_2=3$ , $d_3=3$ ) $\tau_m=0,55$     |          |        |        |        |        |       |       |
| $I_{\tau}/\tau_m$                                          | 169,89   | 144,28 | 122,50 | 104,12 | 88,49  | 63,91 | 33,64 |
| $\Delta I_{\tau}/\tau_m$                                   | 0,075    | 0,063  | 0,054  | 0,045  | 0,038  | 0,029 | 0,018 |
| <i>R</i>                                                   | 1,235    | 1,236  | 1,238  | 1,239  | 1,242  | 1,246 | 1,256 |
| Фильтр 3 ( $d_1=6$ , $d_2=2,5$ , $d_3=2,5$ ) $\tau_m=0,57$ |          |        |        |        |        |       |       |
| $I_{\tau}/\tau_m$                                          | 184,34   | 156,46 | 132,79 | 112,82 | 95,84  | 69,20 | 36,42 |
| $\Delta I_{\tau}/\tau_m$                                   | 0,184    | 0,152  | 0,126  | 0,107  | 0,091  | 0,067 | 0,039 |
| <i>R</i>                                                   | 1,138    | 1,140  | 1,142  | 1,144  | 1,146  | 1,151 | 1,160 |
| Фильтр 4 ( $d_1=6$ , $d_2=1,7$ , $d_3=2,2$ ) $\tau_m=0,60$ |          |        |        |        |        |       |       |
| $I_{\tau}/\tau_m$                                          | 202,37   | 171,72 | 195,72 | 123,0  | 105,18 | 75,99 | 40,08 |
| $\Delta I_{\tau}/\tau_m$                                   | 0,669    | 0,538  | 0,436  | 0,359  | 0,295  | 0,206 | 0,111 |
| <i>R</i>                                                   | 1,037    | 1,039  | 1,041  | 1,043  | 1,044  | 1,482 | 1,054 |
| $I_0$                                                      | 209,83   | 178,41 | 151,70 | 129,11 | 109,88 | 79,66 | 42,26 |
| <i>E</i>                                                   | 98,7     | 85,2   | 72,3   | 61,6   | 52,4   | 38,0  | 20,1  |

Полученные данные позволяют отметить некоторые особенности изменений редукионного множителя. Обнаруживается малая зависимость его от различных радиационных режимов безоблачной атмосферы. Отклонения *R* от его средних значений колеблются (табл. 1) от  $-2,05$  до  $+0,86$  % (фильтр 1), от  $-1,79$  до  $+0,9$  % (фильтр 2), от  $-1,78$  до  $+0,99$  % (фильтр 3), от  $-1,23$  до  $+0,85$  % (фильтр 4).

Ясно видно, что происходит сокращение пределов изменения *R* по мере приближения его значений к единице.

При понижении температуры источника излучения от 6000 до 3000 К (температура, близкая к цветовой температуре образцовых ламп) наблюдается повышение редукионного множителя. В рассматриваемом случае этот множитель изменяется на 2,7—3,4 %

в зависимости от толщины образующих фильтр стекол (табл. 2а).

Сопоставление значений  $R$ , вычисленных для реального спектра излучения [6] при сплошной облачности (табл. 2б), с данными табл. 1 показывает, что в обоих случаях значения редуцированного множителя довольно близки друг к другу.

Из других особенностей полученных данных следует отметить малую зависимость  $R$  от содержания водяного пара, изменяющегося от 0,5 до 3 см осажденной воды.

Из табл. 1 видно, что доля  $\delta$  инфракрасного и ультрафиолетового излучения, проникающая через фильтр, колеблется в пределах: 0,0014—0,0050 % (фильтр 1), 0,055—0,073 % (фильтр 2), 0,105—0,135 % (фильтр 3), 0,277—0,485 % (фильтр 4), т. е. эта доля увеличивается при уменьшении толщины фильтра за счет стекол ЗС-8 и ЖЗС-18. В целом же для выбранной комбинации цветных стекол величина инфракрасного излучения невелика и есть основание считать, что это излучение не окажет существенного влияния на результаты измерения освещенности.

Проведенные модельные расчеты  $R$  позволяют сделать вывод о возможности измерения дневной освещенности с помощью неселективных термоэлектрических приемников с узкополосными светофильтрами, редуциционные множители которых могут быть больше единицы. Можно заметить, что этот вывод подкрепляется данными эксперимента [5].

В табл. 3 для стандартной актинометрической атмосферы даны оценки значений энергетических потоков и соответствующих им освещенностей. Уровни сигнала после фильтра, как видно из таблицы, достаточно велики и могут быть измерены термоэлектрическими приемниками, особенно полупроводниковыми.

Результаты расчетов указывают на две возможности в части метрологического обеспечения измерений дневной освещенности. Одна из них состоит в том, что приборы, в том числе и контрольные, могут градуироваться по эталонам силы света Госстандарта СССР. Переход к шкале естественных освещенностей может быть осуществим посредством редуцированных множителей, приведенных к температуре Солнца и условиям стандартной актинометрической атмосферы.

Другая возможность метрологического обеспечения реализуется на основе использования образцовых актинометрических приборов для градуировки неселективных приемников, определения спектральных коэффициентов пропускания фильтра и последующего расчета редуцированных множителей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авасте О. и др. Спектральное распределение прямой и рассеянной радиации/О. Авасте, Х. Молдау, К. С. Шифрин.— Исследования по физике атмосферы, 1962, № 3, с. 44—52.
2. Белова И. А. и др. Световые измерения с помощью абсолютных термоэлектрических приемников излучения/И. А. Белова, В. Е. Карташевская, Л. Ф. Литвинова.— Труды ГГО, 1976, вып. 213, с. 70—73.

3. О возможностях создания актинометрических приборов на основе полупроводниковых термоэлементов/С. И. Зачек, В. Ф. Капустин, В. Г. Карпов и др.—Труды ГГО, 1977, вып. 384, с. 54—61.

4. Кругер М. Я. и др. Справочник конструктора оптико-механических приборов.—Л.: Машиностроение, 1968.—70 с.

5. Луцько Л. В., Вайсбанд Р. Ф. О соотношении прямой солнечной радиации с освещенностью.—Труды ГГО, 1968, вып. 213, с. 21—24.

6. Полный радиационный эксперимент/Под ред. К. Я. Кондратьева и Н. Е. Тер-Маркрянц.—Л.: Гидрометеиздат, 1976.—240 с.

7. Сивков С. И. Методы расчета характеристик солнечной радиации.—Л.: Гидрометеиздат, 1968.—97 с.

8. Справочник по электроизмерительным приборам/Ред. К. К. Илюнин.—Л.: Энергия, 1977.—703 с.

9. ГОСТ 9411—75. Стекло оптическое цветное—М.: Изд-во стандартов, 1976, с. 24.

10. Тиходеев П. М. Световые измерения в светотехнике.—М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962.

11. Science Associates Inc N 8, Instruments and systems for the atmosphere and environment, p. 86.

*С. И. Зачек, Ю. Д. Горбенко,  
Д. А. Тайц, Л. В. Луцко*

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ**

Успехи в области технологии полупроводниковых термопар дают основание рассматривать их как перспективную элементную базу для создания актинометрических приборов сетевого и специального назначения.

Проведенный анализ возможностей разработанных ГСКБ ТФП полупроводниковых термоэлектрических преобразователей теплового потока (ПТП) как чувствительных элементов приемников радиации, а также опыт применения их в конкретных актинометрических приборах [1, 4, 2] показывают значительные преимущества этих полупроводниковых ПТП по сравнению с металлическими (высокая чувствительность, технологичность, небольшое внутреннее сопротивление).

Однако полупроводниковые ПТП наряду с их положительными качествами имеют один недостаток, заключающийся в том, что их коэффициент термо-ЭДС (чувствительность) заметно зависит от температуры окружающей среды (0,3—0,5 % на 1 °C). Данные, полученные в ГСКБ ТФП, показывают, что величина чувствительности  $\bar{e}$  имеет квадратично-параболическую зависимость, которую в некоторых практических случаях можно аппроксимировать линейной зависимостью от температуры  $t$ ,

$$\bar{e} = \bar{e}_0 (1 + \alpha t), \quad (1)$$

где  $\bar{e}_0$  — чувствительность при  $t = 0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  — температурный коэффициент чувствительности (средний), равный  $4 \cdot 10^{-3} (^\circ\text{C})^{-1}$  для температуры от  $-40$  до  $40^\circ\text{C}$ .

Существует несколько способов учета или уменьшения температурной зависимости чувствительности ПТП. К ним следует отнести широко известную в технике измерений параметрическую термокомпенсацию, введение (автоматически или вручную)

поправок на температуру, применение компенсации и термостатирования [1]. При современном уровне измерительной техники и микроэлектроники каждый из перечисленных способов может быть практически реализован. Выбор способа уменьшения влияния на чувствительность ПТП температуры окружающей среды определяется назначением прибора, точностью измерения, предъявляемыми к ним эксплуатационными требованиями.

Целью данной работы является изложение методики расчета параметрической термокомпенсации, которую ввиду ее простоты и надежности целесообразно применять для актинометрических приборов сетевого применения (пиранометров, актинометров, балансомеров).

Рассмотрим электрическую схему актинометрического приемника (рис. 1), состоящую из генератора термо-ЭДС  $\varepsilon$  с внутрен-

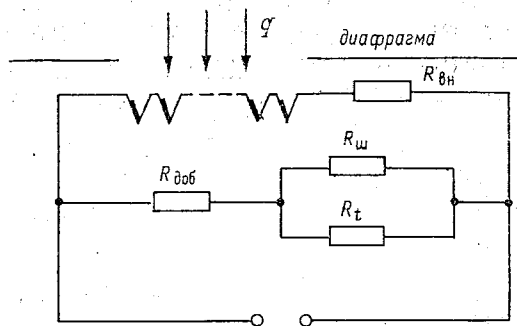


Рис. 1. Электрическая схема актинометрического полупроводникового элемента.

ним сопротивлением  $R_{вн}$ , компенсирующего контура на резисторах  $R_{ш}$  и  $R_{доб}$ , терморезистора  $R_t$ . В этом приборе падающая радиация  $q$  на поверхности приемника превращается в теплоту, которая в свою очередь создает разность температур между холодными и горячими спаями полупроводниковой термобатареи. Возникает термо-ЭДС прямо пропорциональная падающему радиационному потоку.

Способ подключения резисторов обусловлен характером зависимости чувствительности полупроводниковой термобатареи и терморезисторов от температуры. Температурный коэффициент чувствительности (ТКЧ) положителен, а температурный коэффициент сопротивления (ТКС) терморезисторов отрицателен. В схеме внутреннее сопротивление  $R_{вн}$  термобатареи имеет положительный ТКС.

При отрицательном ТКЧ термобатареи (металлических термопар) включение термокомпенсирующего контура осуществляется вне цепи съема напряжения [3].

Зависимость выходного напряжения схемы от ЭДС термобатареи при условии, что входное сопротивление вторичного измери-

тельного прибора велико, может быть представлена в виде следующего выражения:

$$u_n = \varepsilon \frac{R_{\text{доб}} + \frac{R_{\text{ш}} R_t}{R_{\text{ш}} + R_t}}{R_{\text{вн}} + R_{\text{доб}} + \frac{R_{\text{ш}} R_t}{R_{\text{ш}} + R_t}}. \quad (2)$$

Выразим параметры  $\varepsilon$ ,  $R_{\text{вн}}$  и  $R_t$  в виде следующих соотношений:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 f_\varepsilon; \quad (3)$$

$$R_{\text{вн}} = R_{\text{вн}0} f_\sigma; \quad (4)$$

$$R_t = R_{t0} f_T, \quad (5)$$

где  $f_\varepsilon$ ,  $f_\sigma$ ,  $f_T$  — температурные функции термо-ЭДС внутреннего сопротивления термобатареи и терморезистора;  $\varepsilon_0$ ,  $R_{\text{вн}0}$ ,  $R_{t0}$  — значения  $\varepsilon$ ,  $R_{\text{вн}}$ ,  $R_t$  при нормальной температуре (например,  $t = 0^\circ\text{C}$ ).

После подстановки (3) — (5) в (2) и формальных преобразований получим

$$u_n = \varepsilon_0 \frac{R_{\text{доб}} + \frac{R_{\text{ш}} R_{t0}}{R_{\text{ш}} + R_{t0}}}{R_{\text{вн}} + R_{\text{доб}} + \frac{R_{\text{ш}} R_{t0}}{R_{\text{ш}} + R_{t0}}} \cdot \frac{[(R_{\text{вн}} + R_{\text{доб}})(R_{\text{ш}} + R_{t0}) + R_{\text{вн}} R_{t0}]}{[R_{\text{доб}}(R_{\text{ш}} + R_{t0}) + R_{\text{ш}} R_{t0}]} \times \\ \times \frac{[R_{\text{доб}}(R_{\text{ш}} + R_{t0} f_T) + R_{\text{ш}} R_{t0} f_T] f_\varepsilon}{[(R_{\text{вн}} f_\sigma + R_{\text{доб}})(R_{\text{ш}} + R_{t0} f_T) + R_{\text{ш}} R_{t0} f_T]}. \quad (6)$$

Введем обозначения

$$M = \frac{R_{\text{доб}} + \frac{R_{\text{ш}} R_{t0}}{R_{\text{ш}} + R_{t0}}}{R_{\text{вн}} + R_{\text{доб}} + \frac{R_{\text{ш}} R_{t0}}{R_{\text{ш}} + R_{t0}}}, \quad (7)$$

где  $M$  — коэффициент передачи напряжения в схеме при нормальной температуре;

$$N_1 = [(R_{\text{вн}} + R_{\text{доб}})(R_{\text{ш}} + R_{t0}) + R_{\text{вн}} R_{t0}] \times \\ \times [R_{\text{доб}}(R_{\text{ш}} + R_{t0} f_T) + R_{\text{ш}} R_{t0} f_T] f_\varepsilon; \quad (8)$$

$$N_2 = [R_{\text{доб}}(R_{\text{ш}} + R_{t0}) + R_{\text{ш}} R_{t0}] \times \\ \times [(R_{\text{вн}} f_\sigma + R_{\text{доб}})(R_{\text{ш}} + R_{t0} f_T) + R_{\text{ш}} R_{t0} f_T]. \quad (9)$$

Подставив (7) — (9) в выражение (6), получим

$$u_n = \varepsilon_0 M \frac{N_1}{N_2}. \quad (10)$$

Из формулы (10) видно, что независимость выходного напряжения от изменений температуры окружающей среды могла бы существовать при условии равенства  $N_1$  и  $N_2$ . Однако такое равенство для всех значений температур в заданном диапазоне не может быть достигнуто, так как отношение  $N_1/N_2$  зависит от температуры.

Последнее обстоятельство вынуждает решать задачу температурной компенсации приближенно и добиваться таких условий, при которых отношение  $N_1/N_2$  отличается от единицы на величину, не превышающую допустимого уровня, определяемого заданной погрешностью измерения.

Простейшим с математической точки зрения методом, позволяющим реализовать указанный выше подход, является метод наименьших квадратов, с помощью которого можно рассчитать оптимальные параметры схемы, исходя из минимума средней квадратической ошибки в заданном диапазоне температур среды.

Анализируемая схема будет оптимальна по температурной погрешности (в заданном интервале), если минимально выражение

$$Q = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{N_{1i}}{N_{2i}}\right)^2, \quad (11)$$

где  $i = 1, \dots, n$  — точки, соответствующие температурам  $t = t_1, \dots, t_n$ , в которых определяются отклонения отношения  $N_1/N_2$  от единицы.

Минимизация выражения (11) производится по трем параметрам  $R_{t0}$ ,  $R_{\text{ш}}$  и  $R_{\text{доб}}$ , хотя в принципе эта операция вполне возможна и по всем параметрам схемы. Выбор указанных трех параметров в качестве изменяемых обусловлен прежде всего тем, что варьируя их, можно менять кривизну желаемой эквивалентной температурной функции цепи  $R_{t0}$ ,  $R_{\text{ш}}$  и  $R_{\text{доб}}$ . Кроме того, имеется технологическая возможность относительно легко менять или подгонять значения этих сопротивлений в соответствии с расчетом по данным термобатареи. Что же касается параметров самой термобатареи, то возможности их изменений практически ограничены, как конкретной конструкцией прибора, так и тем, что предполагается во всех актинометрических приборах применять по технологическим соображениям один только тип тепломеров.

Для выявления основных закономерностей изменения погрешности температурной компенсации

$$\gamma = \left(1 - \frac{N_1}{N_2}\right) 100 \%, \quad (12)$$

были проведены численные эксперименты по минимизации функции при различных параметрах схемы. В качестве исходных соотношений использовались эмпирические выражения температурных функций, приведенных в работе [1], и известная экспоненциальная зависимость сопротивления терморезисторов от температуры, а именно:

$$f_s = \frac{1 + 0,266 \cdot 10^{-2}t + 0,537 \cdot 10^{-5}t^2}{1 - 0,275 \cdot 10^{-2}t + 1,8 \cdot 10^{-3}t^2}; \quad (13)$$

$$f_c = a(1 + 0,004t) + b \frac{1}{1 - 0,574 \cdot 10^{-2}t + 0,251 \cdot 10^{-4}t^2}; \quad (14)$$

$$f_r = \exp \left[ B \left( \frac{1}{273 + t} - \frac{1}{273} \right) \right], \quad (15)$$

где  $a$  и  $b$  — доли сопротивления перемычек (медь) коммутации и самих термоэлементов, удовлетворяющие условию  $a+b=1$ ,  $B$  — постоянная (К).

Формула (13) является комплексной температурной функцией, так как она определяется температурными функциями коэффициента термо-ЭДС (числитель) и термической проводимостью (знаменатель) термобатарей и имеет приближенное значение.

Ввиду сложности выражения (11) и трудности отыскания оптимальных значений  $R_{ш}$ ,  $R_{t0}$  и  $R_{доб}$  посредством дифференцирования этого выражения минимизация указанной функции была проведена методом прямого поиска [3] по программе для ЭВМ БЭСМ-6. При расчете задавался массив числовых данных, ограниченных пределами (технологическим и др.) возможных изменений параметров схемы.

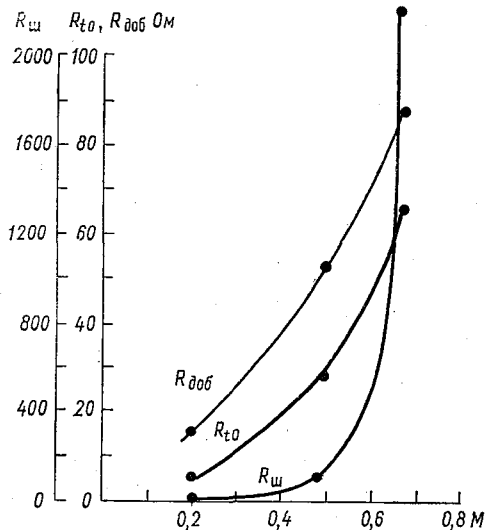


Рис. 2. Значения  $R_{ш}$ ,  $R_{t0}$  и  $R_{доб}$  в зависимости от  $M$  для прибора с  $R_{вн}=80$  Ом при  $B=2060$  К.

Были приняты следующие пределы:  $R_{доб}=0\div1000$  Ом;  $R_{t0}=10\div2210$  Ом (пределы определены ГОСТ 10688—63);  $B=2060\div4300$  К;  $R_{ш}=10\div2000$  Ом;  $n=1\div51$ , что соответствует  $t$  от  $-50$  до  $+50$  °С с шагом 2 °С;  $a=0,75$ ,  $b=0,25$ .

Вычисления проводились для черно-белого пиранометра, у которого  $R_{вн}=80$  Ом, для трех значений  $B$ : 2060, 3180 и 4300 К. В результате этих расчетов были получены ряды оптимальных значений  $R_{доб}$ ,  $R_{t0}$ ,  $R_{ш}$  и соответствующие им коэффициенты передачи напряжения  $M$ . Одновременно для каждой комбинации указанных значений рассматривалась погрешность температурной компенсации через 5 °С, что позволило оценить точность оптимизации схемы.

Результаты расчета для  $R_{вн}=80$  Ом и  $B=2060$  К в сокращенном виде представлены графически на рис. 2. Анализируя рис. 2, можно отметить, что коэффициент передачи напряжения температурно-скомпенсированной схемы определяется оптимальными значениями  $R_{доб}$ ,  $R_{t0}$  и  $R_{ш}$ , т. е. каждому значению  $M$

соответствуют строго определенные значения этих трех величин, ни одно из которых не повторяется при других  $M$ .

По мере роста  $M$  растут и соответствующие ему оптимальные значения  $R_{доб}$ ,  $R_{t0}$  и  $R_{ш}$ , причем сопротивление  $R_{ш}$  растет значительно быстрее двух других сопротивлений и становится много больше их при  $M > 0,5$ . Отсюда можно сделать вывод, что при

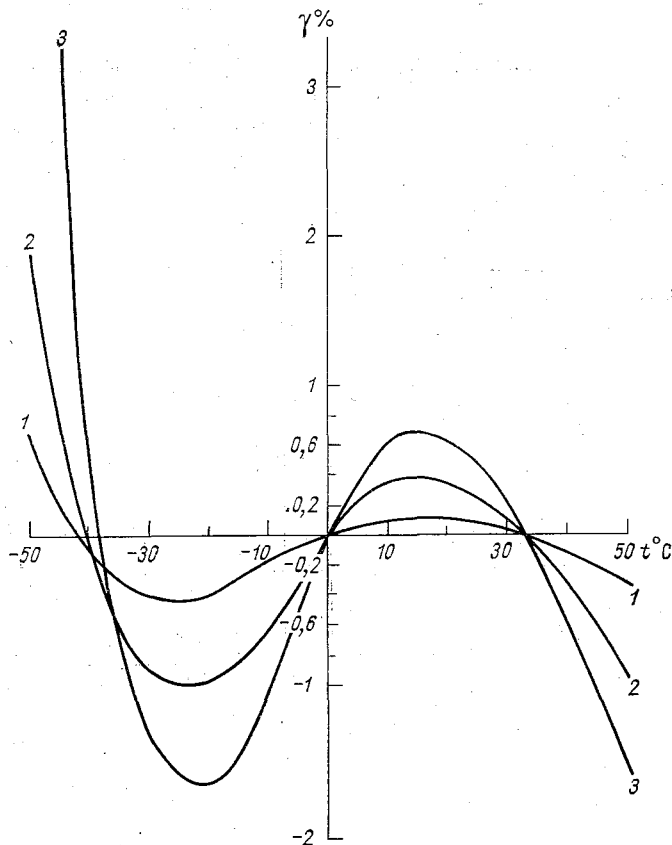


Рис. 3. Погрешности  $\gamma$  в зависимости от температуры при значениях  $B$ , равных 2060 (1), 3180 (2) и 4300 К (3).

больших значениях коэффициента передачи роль шунтирующего сопротивления теряется и схема термокомпенсирующего контура упрощается.

При положительных значениях температуры погрешность  $\gamma$  в среднем примерно в 2 раза ниже, чем при отрицательных. В целом же для  $B = 2060 \div 2500$  К термокомпенсация при  $t$  от  $-50$  до  $+50$  °С обеспечивает изменение  $\gamma$  от 1 до  $-0,5$  %, что можно считать вполне удовлетворительным результатом. Вместе с тем из сопоставления погрешностей компенсации при различных значениях  $B$  и примерно равных коэффициентах передачи  $M$  (рис. 3)

видно, что происходит заметное возрастание погрешности  $\gamma$  по мере увеличения постоянной  $B$ . Отсюда напрашивается вывод о целесообразности использования терморезисторов с меньшим постоянным  $B$ . Рост погрешности объясняется тем, что по мере роста  $B$  увеличивается кривизна температурной функции терморезистора.

Изложенная выше методика оптимизации электрических схем, содержащих полупроводниковые термопары, пригодна только для исследовательских целей и, очевидно, не приемлема для инженерных расчетов и в производственной практике из-за больших расходов времени для расчета на ЭВМ БЭСМ-6. Например, для того чтобы рассчитать табл. 1 по данной методике, требуется более 1 ч машинного времени.

Таблица 1

Результаты расчета  $\gamma$  при заданных значениях параметров схемы

| Параметры схемы  |          |                |        | $t^{\circ}\text{C}$ |       |       |       |       |
|------------------|----------|----------------|--------|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| $R_{\text{доб}}$ | $R_{t0}$ | $R_{\text{ш}}$ | $M$    | -50                 | -40   | -30   | -20   | -10   |
| Ом               |          |                |        |                     |       |       |       |       |
| 64,2             | 40       | 212            | 0,5502 | 0,93                | -0,08 | -0,46 | -0,43 | -0,22 |
| 72,4             | 50       | 408            | 0,5938 | 1,01                | -0,08 | -0,50 | -0,47 | -0,24 |
| 79,6             | 60       | 928            | 0,6296 | 1,10                | -0,07 | -0,52 | -0,49 | -0,26 |
| 86,4             | 70       | 748            | 0,6607 | 1,17                | -0,07 | -0,54 | -0,52 | -0,27 |

| Параметры схемы  |          |                |        | $t^{\circ}\text{C}$ |      |      |      |       |       |
|------------------|----------|----------------|--------|---------------------|------|------|------|-------|-------|
| $R_{\text{доб}}$ | $R_{t0}$ | $R_{\text{ш}}$ | $M$    | 0                   | 10   | 20   | 30   | 40    | 50    |
| Ом               |          |                |        |                     |      |      |      |       |       |
| 64,2             | 40       | 212            | 0,5502 | 0                   | 0,13 | 0,13 | 0,03 | -0,16 | -0,37 |
| 72,4             | 50       | 408            | 0,5938 | 0                   | 0,14 | 0,15 | 0,04 | -0,16 | -0,39 |
| 79,6             | 60       | 928            | 0,6296 | 0                   | 0,16 | 0,18 | 0,07 | -0,14 | -0,39 |
| 86,4             | 70       | 748            | 0,6607 | 0                   | 0,17 | 0,19 | 0,08 | -0,14 | -0,40 |

Упрощение расчетов может быть достигнуто за счет уменьшения числа параметров, по которым оптимизируется схема. Уже отмечалось, что существует однозначная зависимость  $M$  от  $R_{\text{доб}}$ ,  $R_{t0}$ ,  $R_{\text{ш}}$ . Такая особенность схемы позволяет выбирать значения  $R_{t0}$  в соответствии с номенклатурой, и поэтому оптимизировать эту схему следует по двум другим параметрам. Результаты такого расчета приведены в табл. 1. Время счета при правильном выборе исходных значений величин можно сократить до 1 мин, в результате чего методика становится пригодной для практических расчетов.

Рассмотрим кратко пути реализации полученных результатов. Здесь имеются некоторые затруднения. Дело в том, что

выражения для температурных функций, особенно это касается параметров термобатарей, являются, как уже говорилось, эмпирическими и получены для некоторых средних значений. В каждом конкретном случае возможен разброс параметров, и поэтому, если не учитывать этого разброса, возможны ошибки. Кроме того, температурная функция коэффициента термо-ЭДС была составлена из простого соображения, что она должна быть равна отношению температурных функций коэффициента термо-ЭДС к теплопроводности материала (ветвей термобатареи) [1]. В реальном приборе возможны значительные отклонения ввиду того, что указанная функция не учитывает теплоотдачу приемника радиации за счет конвективного теплообмена и теплопроводности клеевых прослоек.

Естественным способом преодоления этой трудности является определение температурной функции коэффициента термо-ЭДС уже в готовых конструкциях приемников излучения. Сущность этого способа заключается в нахождении коэффициентов в формуле

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (1 + \alpha t + \beta t^2), \quad (16)$$

где  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_0$  — отсчеты по прибору при текущей и исходной температурах.

Для этой цели измеряется поток стабилизированного излучения актинометрическим прибором, помещенным в климатическую камеру (точность поддержания температуры  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ ), при трех температурах ( $-50, 0, 50^\circ\text{C}$ ), что позволяет найти  $\varepsilon_0$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  путем решения системы линейных уравнений.

Аналогичным образом может быть найдена и температурная функция терморезистора  $f_T$ . Необходимость в таких измерениях вызывается тем, что терморезисторы обладают существенным разбросом параметров  $R_{10}$  и  $B$ . Такая же методика применима и для определения температурной функции  $f_\sigma$  (внутреннего сопротивления термопары).

Найденные температурные функции позволяют осуществлять оптимизацию схем реальных приемников актинометрических приборов по изложенной выше методике.

Для конкретных актинометрических приборов был проведен расчет и подбор элементов электрической схемы компенсации на ЭВМ. Подгонка компенсирующего контура производилась для каждого типа актинометрических приборов с учетом разброса электрических параметров применяемых элементов (табл. 2). Эффект температурной компенсации проверялся в термокамере при температуре от  $-40$  до  $+40^\circ\text{C}$ . При этом электрическая схема температурной компенсации обеспечивала постоянство выходного напряжения с термобатареи при изменении температуры окружающей среды при постоянном радиационном потоке. В соответствии со схемой на рис. 1 выходное напряжение определится выражением

$$u_{\text{ВЫХ}} = \frac{\varepsilon(t) R_K(t)}{R_{\text{ВН}}(t) R_K(t)}, \quad (17)$$

где  $\varepsilon(t)$  — термо-ЭДС,  $R_k$  — сопротивление компенсирующего контура;  $R_{вн}$  — внутреннее сопротивление термобатареи.

Таблица 2

Значения коэффициента передачи напряжения  $M$ , постоянной  $B$  и сопротивлений  $R_{доб}$ ,  $R_{t0}$  и  $R_{ш}$  в омах у разных типов актинометрических приборов

| Тип прибора          | $M$    | $B$  | $R_{доб}$ | $R_{t0}$ | $R_{ш}$ |
|----------------------|--------|------|-----------|----------|---------|
| Актинометр . . . . . | 0,4636 | 2060 | 49,8      | 25,2     | 83,2    |
| Пиранометр . . . . . | 0,4638 | 3180 | 54,4      | 20,6     | 52,4    |
| Балансомер . . . . . | 0,4522 | 4300 | 54,4      | 16,8     | 37,8    |

Из уравнения (17) находим

$$R_k(t) = \frac{u_{\text{вых}} R_{\text{вн}}(t)}{\varepsilon_0(t) - u_{\text{вых}}} \quad (18)$$

Экспериментальное определение характеристики термокомпенсирующего контура  $R_k(t)$  производится в термокамере с переменной температурой при постоянном радиационном потоке ( $q = \text{const}$ ). Контроль  $q$  осуществлялся по контрольному прибору. В процессе эксперимента на магазинах сопротивлений подбирался такой контур, который обеспечивал постоянство выходного сигнала с нужной точностью.

При этом определялась характеристика термокомпенсирующего контура  $R_k(t)$  от температуры окружающей среды при  $u_{\text{вых}}$ , равном постоянному значению. Эксперимент показал, что при использовании компенсирующего контура (рис. 1) температурную компенсацию можно обеспечить с точностью до 3 % во всем температурном диапазоне (от  $-40$  до  $40^\circ\text{C}$ ) при скорости изменения температуры на  $20^\circ\text{C}$  за 1 ч. При этом чувствительность прибора с компенсирующим контуром снижается на 30 %. Так как выходной сигнал  $u_{\text{вых}}$  пропорционален числу термопар, то практически можно подобрать компенсирующий контур, где значения параметров подбираемых элементов также будут кратны числу

Таблица 3

Параметры приборов с различным количеством термопар

| Тип прибора          | Число термопар | Номинальные значения схемы, Ом |                  |                |          | $\gamma_{\text{макс}} \%$ |
|----------------------|----------------|--------------------------------|------------------|----------------|----------|---------------------------|
|                      |                | $R_{\text{вн}}$                | $R_{\text{доб}}$ | $R_{\text{ш}}$ | $R_{t0}$ |                           |
| Актинометр . . . . . | 4              | 32                             | 48,2             | 105            | 10       | 0,57                      |
| Пиранометр . . . . . | 8              | 64                             | 88,7             | 150            | 33       | 0,25                      |
| Балансомер . . . . . | 16             | 128                            | 184              | 345            | 50       | 0,1                       |
|                      | 18             | 144                            | 204              | 368            | 60       | 0,2                       |

тепломеров. Это дает возможность рассчитывать различные варианты и типы актинометрических приборов, если известны расчетные данные для одного тепломера (табл. 3). Можно подобрать нормализованный компенсирующий контур  $R_k$ , отнесенный к одному термоэлементу. В этом случае при изменении числа термоэлементов не требуется производить новый подбор  $R_k$ , достаточно взять номиналы подобранных сопротивлений пропорционально нормализованному.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О возможностях создания актинометрических приборов на основе полупроводниковых термоэлементов/С. И. Зачек, В. Ф. Капустин, В. Г. Карпов и др.—Труды ГГО, 1977, вып. 384, с. 54—61.
2. Радиационный полупроводниковый балансомер и его исследования/В. Ф. Капустин, Д. А. Тайц, В. А. Рыбин, Т. К. Ястребова.—Труды ГГО, 1977, вып. 384, с. 62—73.
3. Collins B. G., Walton E. W. Temperature compensation of Moll—Gorczynski pyranometer. Meteorological Magazine, vol. 96, N 1141, p. 225—228, November, 1967.
4. Däke C. U. Über ein neues Modell des Strahlungsbilanzmessers nach Schulze. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr 126 (Band 16), Offenbach a. M., 1972.
5. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование.—М.: Мир., 1975.

*В. М. Игнатенко, В. А. Ковалев, Е. В. Рыбаков*

### **ВЛИЯНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ НА ТОЧНОСТЬ ЛИДАРНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ**

При оценке погрешностей измерения прозрачности атмосферы с помощью лидаров необходимо учитывать не только методические, но и инструментальные погрешности, обусловленные несовершенством используемой аппаратуры. Этим вопросам посвящен ряд работ, например [1, 2, 4], однако в них основной акцент сделан на погрешностях методического характера, обусловленных, в частности, неоднородностью атмосферы, разбросом значений параметра индикатрисы, влиянием ее априорного выбора, влиянием фона многократного рассеяния и т. д.

В данной работе анализируются инструментальные погрешности, вызванные несовершенством используемой аппаратуры. В практике лидарных измерений для регистрации эхо-сигналов обычно используется запоминающий осциллограф, а обработка осциллограмм производится по фотоотпечаткам. В последнее время ведется целый ряд разработок устройств стробирования эхо-сигналов с дальнейшим представлением данных в цифровом коде, пригодном для непосредственной обработки на ЭВМ. Принципиально и в первом, и во втором случаях мы имеем ряд погрешностей измерения, обусловленных: а) конечной величиной шага квантования уровня сигнала в АЦП или погрешностью отсчета ординат по осциллограмме  $\Delta P$ , б) сдвигом нулевого уровня отсчета  $\Delta P^*$  и в) сдвигом начала отсчета  $z^*$  относительно истинного отсчета, вызванным, например, нестабильностью запуска развертки осциллографа (рис. 1).

Погрешности, обусловленные неоднородностью атмосферы и многократным рассеянием, здесь мы рассматривать не будем. Примем, что атмосфера на трассе зондирования однородна, а параметр индикатрисы есть величина постоянная. Такой подход позволит нам выделить влияние инструментальных погрешностей на результат измерения прозрачности в чистом виде. Запишем

уравнение локации в приближении однократного рассеяния и чисто рассеивающей атмосферы,

$$P(z) = k \cdot x(\pi) \cdot \alpha \cdot \frac{1}{z^2} \cdot e^{-2\alpha z}, \quad (1)$$

где  $P(z)$  — ордината сигнала, полученного с расстояния  $z$  от ло-  
катора,  $x(\pi)$  — параметр индикатрисы под углом  $180^\circ$  (лидарное  
отношение),  $\alpha$  — показатель ослабления,  $k$  — параметр преобразо-  
вания, определяемый параметрами приемно-передающего тракта  
лидара и регистрирующей аппаратуры.

Основные существующие методы обработки отраженных сигна-  
лов лазерного лоатора (при всем их многообразии) сводятся либо  
к логарифмированию, либо к интегрированию сигнала  $P(z)$ , скор-

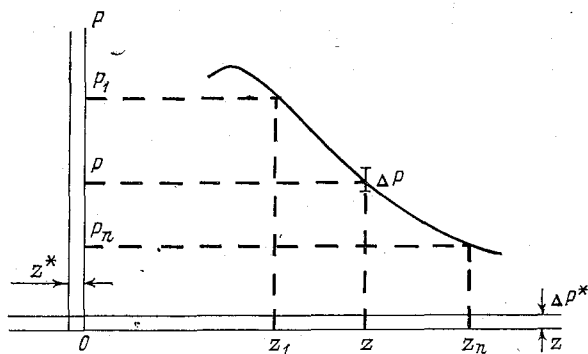


Рис. 1. Инструментальные погрешности, возникающие при обработке эхо-сигнала лидара.

ректированного на квадрат расстояния. Основное выражение при  
логарифмическом преобразовании эхо-сигнала и выполнении по-  
ставленных выше условий имеет вид

$$\ln S(z) = \ln A - 2\alpha z, \quad (2)$$

где

$$A = k \cdot x(\pi) \cdot \alpha,$$

$$S(z) = P(z) \cdot z^2. \quad (3)$$

Поскольку параметр  $A$  неизвестен, величину  $\alpha$  можно определить  
следующим образом.

1. По двум ординатам  $z_1$  и  $z_n$ :

$$\alpha = \frac{1}{2\Delta z} \ln \frac{S(z_1)}{S(z_n)}, \quad (4)$$

где  $\Delta z = z_n - z_1$ .

2. Методом наименьших квадратов (МНК), когда линейный  
участок функции  $\ln S(z)$  имеет достаточную протяженность. С уче-  
том дисперсии величины  $\ln S(z)$ , определяемой в виде  $\delta_i = \Delta P/P_i$ ,

выражение для  $\alpha$ , рассчитываемое по МНК, имеет следующий вид [5]:

$$\alpha = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n P_i^2 \ln S_i \right] \left[ \sum_{i=1}^n P_i^2 z_i \right] - \left[ \sum_{i=1}^n P_i^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^n P_i^2 z_i \ln S_i \right]}{2 \left\{ \left[ \sum_{i=1}^n P_i^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^n P_i S_i \right] - \left[ \sum_{i=1}^n P_i^2 z_i \right]^2 \right\}}, \quad (5)$$

где  $n$  — количество выбранных равноотстоящих точек на отрезке  $\Delta z = z_n - z_1$ .

Для обработки отраженных сигналов лазерного лоатора могут быть использованы разные варианты интегрального метода. В условиях однородной атмосферы для простоты используем следующее выражение:

$$\alpha = \frac{1}{\Delta z} \ln \frac{\int_{z_1}^{z_k} S(z) dz}{\int_{z_k}^{z_n} S(z) dz}, \quad (6)$$

где  $z_k$  — точка, соответствующая середине отрезка  $\Delta z$ .

Наконец, рассмотрим алгоритм обработки, предложенный в 1967 г. в работе [6], записанный ниже в несколько видоизмененной форме

$$\alpha(z) = \frac{S(z)}{\frac{S(z_1)}{\alpha_1} - 2 \int_{z_1}^z S(z) dz}. \quad (7)$$

Здесь  $\alpha_1$  и  $\alpha(z)$  — коэффициенты ослабления в точках  $z_1$  и  $z$  соответственно.

Алгоритм, записанный в таком виде, может быть использован и для неоднородной атмосферы, но при условии постоянства параметра индикатрисы на трассе зондирования.

Рассмотрим, как сказываются на точности измерения  $\alpha(z)$  указанные выше инструментальные погрешности при использовании приведенных выше алгоритмов обработки.

Погрешность величины  $\alpha$ , вызываемая погрешностью определения ординат  $\Delta P/P$ , рассчитывается по следующим формулам.

При логарифмическом методе определения  $\alpha$  по двум точкам:

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \frac{\delta P_1}{2\alpha \Delta z} \sqrt{1 + \frac{z_n^4}{z_1^4} e^{4\alpha \Delta z}}, \quad (8)$$

где  $\delta P_1 = \Delta P/P_1$  — относительная погрешность определения ординаты  $P_1$  в начальной точке  $z_1$ . При выводе этой и последующих формул погрешностей принимается, что абсолютная погрешность  $\Delta P$  в пределах участка  $\Delta z$  неизменна по величине.

При использовании МНК:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{\delta P_1}{z_1^2 e^{2\alpha z_1} 2\alpha} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n z_i^{-4} e^{-4\alpha z_i}}{\left(\sum_{i=1}^n z_i^{-4} e^{-4\alpha z_i}\right) \left(\sum_{i=1}^n z_i^{-2} e^{-4\alpha z_i}\right) - \left(\sum_{i=1}^n z_i^{-3} e^{-4\alpha z_i}\right)^2}}. \quad (9)$$

При использовании интегрального метода:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{2\delta P_1}{(n-1) z_1^2 (1 - e^{-\alpha \Delta z})} \times \sqrt{\sum_{i=2}^{k-1} z_i^4 + \frac{z_1^4 + z_k^4}{4} + e^{2\alpha \Delta z} \left(\sum_{k+1}^{n-1} z_i^4 + \frac{z_k^4 + z_n^4}{4}\right)}, \quad (10)$$

где  $(n-1)/2 = k$ ,  $n$  — нечетное, точка  $k$  соответствует середине отрезка  $\Delta z$ .

При использовании метода определения профиля [6]:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \delta P_1 \cdot \frac{z_n^2}{z_1^2} \cdot e^{2\alpha \Delta z} \times \sqrt{1 + \frac{z_1^4 + 4\alpha_1^2 h^2 \left(\sum_{i=2}^{n-1} z_i^4 + \frac{z_1^4 + z_n^4}{4}\right)}{z_n^4}}, \quad (11)$$

где  $h = \Delta z/n - 1$  — шаг численного интегрирования. При выводе формул (9)–(11) предполагалось, что погрешности расчета  $P_i$  распределены по нормальному закону.

Результаты расчетов погрешностей  $\Delta\alpha/\alpha$  для  $\delta P_1 = 1\%$  приведены в табл. 1–2. (Чтобы найти  $\Delta\alpha/\alpha$  при  $\delta P_1 = p\%$ , все значения  $\Delta\alpha/\alpha\%$  в таблицах должны быть умножены на  $p$ .) Как показывают приведенные в табл. 1–2 результаты, влияние погрешностей  $\Delta P/P$  на ход ошибок измерения  $\alpha$  разными методами сказывается по-разному.

Проанализируем полученные результаты.

1. Погрешность измерения  $\alpha$  логарифмическим и интегральным методами возрастает при малых и больших  $\Delta z$  и имеет минимальное значение при некоторых его средних значениях, т. е. кривая ошибок  $\Delta\alpha/\alpha$  имеет типичную U-образную форму.

2. Погрешность определения  $\alpha$  методом [6] монотонно возрастает с увеличением  $\Delta z$  и имеет минимальное значение при малых  $\Delta z$ . При этом, однако, предполагается, что  $\alpha_1$  в начальной точке  $z_1$  определено абсолютно точно ( $\Delta\alpha_1/\alpha_1 = 0$ ). В реальных условиях погрешность  $\Delta\alpha/\alpha$  при малых  $\Delta z$  будет стремиться к фактическому значению ( $\Delta\alpha_1/\alpha_1 \neq 0$ ). Отметим, что при определении  $\alpha$  методом

Таблица 1

Значения  $\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$  % при  $\delta P_1=1$  % и различных  $z_1$ ,  $\alpha$  и  $\Delta z$ , определенные разными методами

| $\Delta z$ км | $\alpha = 0,3 \text{ км}^{-1}$ |     |     |     | $\alpha = 3 \text{ км}^{-1}$ |     |  |
|---------------|--------------------------------|-----|-----|-----|------------------------------|-----|--|
|               | $z_1$ км                       |     |     |     |                              |     |  |
|               | 0,25                           | 0,5 | 1,0 | 0,1 | 0,3                          | 0,5 |  |

## Логарифмический метод (по 2 точкам)

|      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,05 | 60,5 | 54,1 | 50,4 | 12,0 | 7,0  | 6,4  |
| 0,10 | 38,5 | 30,4 | 27,1 | 12,2 | 5,7  | 4,6  |
| 0,20 | 31,6 | 20,3 | 15,9 | 24,9 | 7,7  | 5,5  |
| 0,40 | 36,1 | 17,6 | 11,3 | >100 | 25,0 | 14,9 |
| 0,75 | 55,8 | 21,9 | 10,9 | —    | >100 | >100 |
| 1,50 | >100 | 43,7 | 24,5 | —    | —    | —    |

Метод определения профиля [6] ( $n=11$ )

|      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,05 | 1,8  | 1,6  | 1,5  | 3,3  | 2,3  | 2,1  |
| 0,10 | 2,3  | 1,9  | 1,7  | 7,6  | 3,7  | 3,2  |
| 0,20 | 3,8  | 2,5  | 2,0  | 30,6 | 10,1 | 7,5  |
| 0,40 | 8,7  | 4,3  | 2,8  | >100 | 66,2 | 41,1 |
| 0,75 | 25,2 | 10,0 | 5,1  | —    | >100 | >100 |
| 1,50 | >100 | 39,8 | 15,8 | —    | —    | —    |

Таблица 2

Значения  $\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$  % при  $\delta P_1=1$  % и различных  $n$ ,  $z_1$ ,  $\alpha$  и  $\Delta z$ , определенные разными методами

| $\Delta z$ км | $\alpha = 0,3 \text{ км}^{-1}$ |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
|---------------|--------------------------------|----|----|----|-----|----|----|----|-----|----|----|----|
|               | $z_1 \text{ км}$               |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
|               | 0,25                           |    |    |    | 0,5 |    |    |    | 1,0 |    |    |    |
|               | $n$                            |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
|               | 5                              | 11 | 19 | 39 | 5   | 11 | 19 | 39 | 5   | 11 | 19 | 39 |

## Метод наименьших квадратов

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,05 | 51,7 | 38,9 | 30,8 | 22,1 | 47,2 | 35,6 | 28,1 | 20,1 | 45,0 | 33,9 | 26,8 | 19,2 |
| 0,10 | 31,2 | 23,4 | 18,5 | 13,3 | 26,3 | 19,8 | 15,6 | 11,2 | 24,0 | 18,0 | 14,3 | 10,2 |
| 0,20 | 21,6 | 16,1 | 12,7 | 9,1  | 16,1 | 12,1 | 9,5  | 6,8  | 13,6 | 10,2 | 8,1  | 5,8  |
| 0,40 | 18,5 | 13,4 | 10,6 | 7,6  | 11,6 | 8,6  | 6,8  | 4,9  | 8,6  | 6,4  | 5,1  | 3,6  |
| 0,75 | 19,9 | 13,6 | 10,8 | 7,8  | 10,5 | 7,6  | 6,0  | 4,3  | 6,7  | 4,9  | 3,9  | 2,8  |
| 1,50 | 27,6 | 16,5 | 12,9 | 9,4  | 12,2 | 8,2  | 6,5  | 4,7  | 6,6  | 4,7  | 3,7  | 2,7  |

## Интегральный метод

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,05 | 71,6 | 49,6 | 37,9 | 26,5 | 64,8 | 44,9 | 34,3 | 24,0 | 61,6 | 42,7 | 32,6 | 22,8 |
| 0,10 | 44,2 | 30,6 | 23,4 | 16,3 | 36,4 | 25,2 | 19,7 | 13,5 | 32,9 | 22,8 | 17,4 | 12,2 |
| 0,20 | 32,9 | 22,8 | 17,4 | 12,2 | 22,9 | 15,9 | 12,1 | 8,5  | 18,8 | 13,0 | 9,9  | 7,0  |
| 0,40 | 32,5 | 22,5 | 17,2 | 12,0 | 17,8 | 12,3 | 9,4  | 6,6  | 12,3 | 8,5  | 6,5  | 4,5  |
| 0,75 | 43,7 | 30,0 | 23,0 | 16,1 | 18,8 | 12,9 | 9,9  | 6,9  | 10,4 | 7,2  | 5,5  | 3,8  |
| 1,50 | 87,1 | 59,8 | 45,8 | 32,1 | 30,1 | 20,7 | 15,8 | 11,1 | 12,8 | 8,8  | 6,8  | 4,7  |

| $\Delta z$ км | $\alpha = 3 \text{ км}^{-1}$ |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
|---------------|------------------------------|----|----|----|-----|----|----|----|-----|----|----|----|
|               | $z_1 \text{ км}$             |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
|               | 0,1                          |    |    |    | 0,3 |    |    |    | 0,5 |    |    |    |
|               | $n$                          |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
|               | 5                            | 11 | 19 | 39 | 5   | 11 | 19 | 39 | 5   | 11 | 19 | 39 |

Метод наименьших квадратов

|      |      |      |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
|------|------|------|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| 0,05 | 7,7  | 5,7  | 4,5 | 3,3 | 5,8  | 4,3 | 3,4 | 2,5 | 5,4  | 4,1 | 3,2 | 2,3 |
| 0,10 | 6,4  | 4,7  | 3,7 | 2,7 | 4,0  | 2,9 | 2,3 | 1,7 | 3,5  | 2,6 | 2,1 | 1,5 |
| 0,20 | 7,2  | 5,0  | 3,9 | 2,8 | 3,6  | 2,6 | 2,0 | 1,5 | 2,9  | 2,1 | 1,7 | 1,2 |
| 0,40 | 10,8 | 6,3  | 4,9 | 3,6 | 4,3  | 3,0 | 2,4 | 1,7 | 3,3  | 2,3 | 1,8 | 1,3 |
| 0,75 | 22,0 | 8,7  | 6,4 | 4,7 | 6,9  | 3,8 | 3,0 | 2,2 | 4,8  | 2,9 | 2,3 | 1,7 |
| 1,50 | 95,0 | 16,9 | 9,3 | 6,2 | 21,3 | 5,6 | 3,9 | 2,9 | 12,9 | 4,1 | 3,0 | 2,3 |

Интегральный метод

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,05 | 11,2 | 7,8  | 5,9  | 4,2  | 8,0  | 5,6  | 4,3  | 3,0  | 7,5  | 5,2  | 4,0  | 2,8  |
| 0,10 | 10,7 | 7,4  | 5,6  | 3,9  | 5,7  | 4,0  | 3,0  | 2,1  | 5,0  | 3,4  | 2,6  | 1,8  |
| 0,20 | 16,4 | 11,3 | 8,7  | 6,1  | 5,9  | 4,1  | 3,1  | 2,2  | 4,5  | 3,1  | 2,4  | 1,7  |
| 0,40 | 49,6 | 34,1 | 26,1 | 18,3 | 12,1 | 8,3  | 6,4  | 4,5  | 7,7  | 5,3  | 4,1  | 2,8  |
| 0,75 | >100 | >100 | >100 | >100 | 56,2 | 38,7 | 29,6 | 20,7 | 30,3 | 20,9 | 16,0 | 11,2 |
| 1,50 | —    | —    | —    | —    | >100 | >100 | >100 | >100 | >100 | >100 | >100 | >100 |

асимптотического сигнала [3], который здесь не рассматривается, ход ошибок будет такой же, как и при использовании метода [6], только погрешность  $\Delta\alpha/\alpha$  при малых значениях  $\Delta z$  будет определяться отклонением найденного максимального уровня накопленного сигнала от его истинного значения.

3. При увеличении прозрачности атмосферы погрешность измерения  $\alpha$  логарифмическим и интегральным методами имеет тенденцию к возрастанию и уменьшается при использовании метода [6]. Необходимо, однако, иметь в виду, что это утверждение справедливо для определенного диапазона помутнений, поскольку все методы имеют ограничение по точности определения  $\alpha$  как при больших, так и при малых значениях  $\alpha$ .

4. При определении  $\alpha$  любым из рассмотренных выше методов увеличение  $z_1$  приводит (при тех же значениях  $\delta P_1$ ) к некоторому сдвигу кривых в область меньших значений  $\Delta\alpha/\alpha$ , причем форма кривой ошибок сохраняется. При этом минимум погрешностей при использовании интегрального и логарифмического методов смещается в область больших значений  $\Delta z$ .

5. Увеличение числа точек при всех методах определения  $\alpha$  приводит к уменьшению погрешности  $\Delta\alpha/\alpha$  (при методе [6] — к весьма незначительному), при этом ход кривой и положение минимума погрешности сохраняются.

В табл. 3 приведены значения погрешностей  $\Delta\alpha/\alpha$ , рассчитанные методом [6], обусловленные неточным определением начального значения  $\alpha_1$  и рассчитанные по формуле

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{1}{e^{-2\alpha_1 \Delta z} (\alpha_1 / \Delta\alpha_1 + 1) - 1}, \quad (12)$$

где  $\Delta\alpha_1$  — абсолютная погрешность определения величины  $\alpha_1$ ,  
 $\Delta z = z - z_1$ .

Таблица 3

Значения  $\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \%$  за счет погрешности определения  $\alpha_1$  методом [6]

| $\Delta z$ км | $\alpha = 0,3 \text{ км}^{-1}$        |      |      | $\alpha = 3 \text{ км}^{-1}$ |      |      |
|---------------|---------------------------------------|------|------|------------------------------|------|------|
|               | $\frac{\Delta \alpha_1}{\alpha_1} \%$ |      |      |                              |      |      |
|               | 5                                     | 10   | 30   | 5                            | 10   | 30   |
| 0,05          | 5,2                                   | 10,3 | 31,2 | 6,9                          | 14,0 | 45,2 |
| 0,10          | 5,3                                   | 10,7 | 32,5 | 9,5                          | 19,9 | 72,6 |
| 0,20          | 5,7                                   | 11,4 | 35,2 | 18,8                         | 43,2 | >100 |
| 0,40          | 6,4                                   | 13,1 | 41,5 | >100                         | >100 | —    |
| 0,75          | 8,1                                   | 16,6 | 56,7 | —                            | —    | —    |
| 1,50          | 13,3                                  | 28,8 | >100 | —                            | —    | —    |

Характерной особенностью метода [6] (как и метода [3]) является существенное увеличение всех погрешностей при ухудшении видимости, или, точнее говоря, при увеличении толщины зондируемого слоя  $\alpha \cdot \Delta z$ , когда знаменатель выражения (7) представляет из себя малую величину, получаемую как разность двух больших, близких по значению чисел. В этом случае малые исходные погрешности величин  $S(z_1)/\alpha_1$  и  $2 \int_{z_1}^z S(z) dz$  могут привести к весьма большим погрешностям показателя ослабления  $\alpha(z)$ .

Погрешности  $\Delta\alpha/\alpha$ , вызываемые постоянным сдвигом нулевого уровня  $\Delta P^*$  и сдвигом начала отсчета расстояний  $z^*$ , всеми методами определялись по формулам:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} (\Delta P^*) = \frac{\alpha(P + \Delta P^*) - \alpha(P)}{\alpha(P)}, \quad (13)$$

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} (z^*) = \frac{\alpha(z + z^*) - \alpha(z)}{\alpha(z)}, \quad (14)$$

где  $\alpha(P)$  — значение  $\alpha$ , определенное соответствующим методом при  $\Delta P^* = 0$ ;  $\alpha(P + \Delta P^*)$  — значение  $\alpha$ , определенное тем же методом при  $\Delta P^* \neq 0$ . Аналогично  $\alpha(z)$  — значение  $\alpha$  при  $z^* = 0$ ;  $\alpha(z + z^*)$  — значение  $\alpha$ , вычисленное тем же методом при наличии сдвига  $z^* \neq 0$ .

В табл. 4—5 приведены погрешности  $\Delta\alpha/\alpha$  при данных значениях  $\Delta P^*/P_1$  и  $z^*$ , обработанные разными методами. Знаки отклонений  $z^*$  и  $\Delta P^*$  соответствуют положениям, показанным на рис. 1. Расчеты показали, что изменение знаков  $z^*$  и  $\Delta P^*$  на абсолютном значении погрешности  $\Delta\alpha/\alpha$  при малых ее значениях сказывается

Значения  $\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \%$ , вызываемые постоянным сдвигом нулевого уровня  $\Delta P^*$   
и определяемые различными методами.  $\frac{\Delta P^*}{P_1} = 2 \%$

| $\Delta z$ км | $\alpha=0,3 \text{ км}^{-1}$ |     |     |     | $\alpha=3 \text{ км}^{-1}$ |     |     |
|---------------|------------------------------|-----|-----|-----|----------------------------|-----|-----|
|               | $z_1 \text{ км}$             |     |     |     |                            |     |     |
|               | 0,1                          | 0,3 | 0,7 | 1,5 | 0,1                        | 0,3 | 0,7 |

## Логарифмический метод (по 2 точкам)

|      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,05 | 85,1 | 26,2 | 11,9 | 6,6  | 13,1 | 5,4  | 3,6  |
| 0,10 | >100 | 28,8 | 12,6 | 6,8  | 19,4 | 7,2  | 4,4  |
| 0,20 | —    | 34,1 | 14,0 | 7,3  | 37,4 | 12,5 | 7,0  |
| 0,40 | —    | 45,8 | 17,1 | 8,4  | 77,2 | 32,0 | 17,3 |
| 0,75 | —    | 67,9 | 23,7 | 10,8 | >100 | 69,3 | 47,7 |
| 1,50 | —    | >100 | 41,8 | 17,8 | —    | 96,1 | 81,8 |

Интегральный метод ( $n=11$ )

|      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,05 | 85,1 | 26,2 | 11,9 | 6,6  | 12,9 | 5,4  | 3,6  |
| 0,10 | >100 | 28,7 | 12,6 | 6,8  | 18,7 | 7,0  | 4,4  |
| 0,20 | —    | 34,0 | 14,0 | 7,3  | 34,6 | 11,3 | 6,5  |
| 0,40 | —    | 45,4 | 17,0 | 8,4  | 75,9 | 26,4 | 13,8 |
| 0,75 | —    | 67,0 | 23,1 | 10,5 | <100 | 65,3 | 38,0 |
| 1,50 | —    | >100 | 39,7 | 16,6 | —    | >100 | 84,4 |

Логарифмический метод (МНК,  $n=11$ )

|      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,05 | 82,8 | 26,2 | 11,5 | 4,2  | 12,2 | 5,3  | 3,5  |
| 0,10 | 95,3 | 28,2 | 12,2 | 6,4  | 15,6 | 6,5  | 4,2  |
| 0,20 | >100 | 32,3 | 13,7 | 7,3  | 21,5 | 8,9  | 5,6  |
| 0,40 | —    | 39,1 | 16,0 | 8,1  | 34,5 | 13,2 | 8,3  |
| 0,75 | —    | 49,0 | 19,7 | 9,7  | 69,5 | 24,5 | 13,6 |
| 1,50 | —    | 67,5 | 26,5 | 13,0 | >100 | 66,9 | 41,7 |

## Метод определения профиля [6]

|      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,05 | 2,6  | 0,8  | 0,4  | 0,2  | 4,6  | 1,9  | 1,2  |
| 0,10 | 6,6  | 1,8  | 0,8  | 0,4  | 16,3 | 5,8  | 3,6  |
| 0,20 | 19,0 | 4,4  | 1,8  | 0,9  | >100 | 28,9 | 15,7 |
| 0,40 | 70,0 | 13,0 | 4,7  | 2,3  | —    | >100 | >100 |
| 0,75 | >100 | 45,4 | 13,8 | 6,1  | —    | —    | —    |
| 1,50 | —    | >100 | 76,7 | 26,7 | —    | —    | —    |

Таблица 5

Значения  $\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$  %, вызываемые постоянным сдвигом начала отсчета  $z^*$

( $z^*=0,01$  км)

| $\Delta z$ км | $\alpha=0,3 \text{ км}^{-1}$ |     |     |     | $\alpha=3 \cdot \text{км}^{-1}$ |     |     |
|---------------|------------------------------|-----|-----|-----|---------------------------------|-----|-----|
|               | $z_1$ км                     |     |     |     |                                 |     |     |
|               | 0,1                          | 0,3 | 0,7 | 1,5 | 0,1                             | 0,3 | 0,7 |

Логарифмический метод по 2 точкам

|      |      |      |     |     |      |     |     |
|------|------|------|-----|-----|------|-----|-----|
| 0,05 | >100 | 30,8 | 6,3 | 1,4 | 20,5 | 3,1 | 0,6 |
| 0,10 | —    | 27,0 | 5,9 | 1,4 | 15,5 | 2,7 | 0,6 |
| 0,20 | —    | 21,6 | 5,2 | 1,4 | 10,4 | 2,2 | 0,5 |
| 0,40 | 62,9 | 15,5 | 4,3 | 1,2 | 6,3  | 1,6 | 0,4 |
| 0,75 | 37,2 | 10,4 | 3,2 | 1,0 | 3,7  | 1,0 | 0,3 |
| 1,50 | 19,8 | 6,1  | 2,1 | 0,7 | 1,9  | 0,6 | 0,2 |

Логарифмический метод (МНК,  $n=11$ )

|      |      |      |     |     |      |     |     |
|------|------|------|-----|-----|------|-----|-----|
| 0,05 | >100 | 31,1 | 6,4 | 1,5 | 21,7 | 3,1 | 0,6 |
| 0,10 | —    | 27,6 | 6,0 | 1,3 | 18,5 | 2,8 | 0,6 |
| 0,20 | —    | 23,2 | 5,3 | 1,2 | 16,6 | 2,5 | 0,6 |
| 0,40 | —    | 19,0 | 4,6 | 1,2 | 16,3 | 2,4 | 0,5 |
| 0,75 | —    | 16,3 | 3,9 | 1,1 | 15,3 | 2,4 | 0,5 |
| 1,50 | —    | 15,0 | 3,4 | 0,9 | 12,0 | 2,3 | 0,5 |

Интегральный метод ( $n=11$ )

|      |      |      |     |     |      |     |     |
|------|------|------|-----|-----|------|-----|-----|
| 0,05 | >100 | 30,7 | 6,2 | 1,4 | 20,3 | 3,1 | 0,6 |
| 0,10 | —    | 26,7 | 5,9 | 1,4 | 15,0 | 2,7 | 0,6 |
| 0,20 | 92,3 | 21,1 | 5,2 | 1,3 | 9,7  | 2,2 | 0,5 |
| 0,40 | 49,0 | 14,4 | 4,2 | 1,2 | 5,7  | 1,6 | 0,4 |
| 0,75 | 24,7 | 8,9  | 3,1 | 1,0 | 3,5  | 1,1 | 0,3 |
| 1,50 | 11,0 | 4,6  | 1,9 | 0,7 | 2,2  | 0,7 | 0,3 |

Метод определения профиля [6] ( $n=11$ )

|      |      |      |     |      |      |      |      |
|------|------|------|-----|------|------|------|------|
| 0,05 | 6,1  | 0,9  | 0,2 | 0,04 | 7,0  | 1,0  | 0,2  |
| 0,10 | 9,2  | 1,7  | 0,4 | 0,08 | 12,5 | 2,2  | 0,5  |
| 0,20 | 12,6 | 2,7  | 0,7 | 0,2  | 23,7 | 5,0  | 1,0  |
| 0,40 | 16,3 | 4,2  | 1,2 | 0,3  | 51,4 | 13,8 | 3,4  |
| 0,75 | 20,8 | 6,2  | 1,9 | 0,6  | 87,8 | 13,6 | 4,4  |
| 1,50 | 29,9 | 10,1 | 3,5 | 1,0  | 98,5 | >100 | >100 |

Примечание. Погрешности  $\Delta\alpha/\alpha$  при  $0,005 \leq z^* \leq 0,03$  км меняются пропорционально изменению  $z^*$ .

незначительно, существенные расхождения в погрешностях отмечаются лишь при больших  $\Delta\alpha/\alpha$ . Проанализируем полученные результаты.

1. Постоянный сдвиг нулевого уровня  $\Delta P^*$  вызывает погрешность в определении  $\alpha$ , монотонно возрастающую при всех рассмотренных методах определения при увеличении  $\Delta z$ , причем этот рост происходит тем быстрее, чем ближе к локатору берется начальная точка отсчета  $z_1$ .

2. При  $\Delta P^*/P_1 = \text{const}$  погрешность  $\alpha$  за счет сдвига  $\Delta P^*$  тем больше, чем ближе к локатору берется начальная точка  $z_1$ .

3. Погрешность определения  $\alpha$  логарифмическим и интегральным методами при данном значении  $\Delta P^*/P_1$  тем больше, чем выше прозрачность атмосферы.

4. При  $\Delta P^* > 0$  (нулевая ось сдвинута вверх) кривая  $\ln S(z)$  приобретает U-образный вид, в этом случае наибольшее занижение  $\alpha$  дает логарифмический метод по двум точкам, меньшее занижение — МНК, наименьшее (в точке  $z_1$ ) — метод логарифмической производной. При  $\Delta P^* < 0$  (нулевая ось сдвинута вниз) кривая  $\ln S(z)$  монотонно падает с ростом  $z_1$ .

5. При методе [6] сдвиг нулевого уровня  $\Delta P^*$  приводит к существенной погрешности определения  $\alpha$ , особенно при ухудшенной видимости, когда знаменатель выражения (7) представляет малую величину, получаемую как разность двух больших по величине чисел. Наличие сдвигов  $\Delta P^*$  (или  $z^*$ ) в этом случае может привести к тому, что в каких-то точках знаменатель выражения (7) может обратиться в нуль либо стать отрицательным.

6. Наличие постоянного сдвига начала отсчета  $z^*$  при всех методах определения  $\alpha$  вызывает погрешность тем большую, чем ближе к локатору определяется  $\alpha$  (т. е. чем меньше  $z_1$ ).

7. Влияние сдвига  $z^*$  на точность определения  $\alpha$  логарифмическим и интегральным методами сказывается сильнее при высокой прозрачности атмосферы, методом [6] — при малой прозрачности атмосферы.

8. Увеличение протяженности зондируемого участка  $\Delta z$  уменьшает влияние сдвига  $z^*$  при логарифмическом и интегральном методах. При методе [6] увеличение  $\Delta z$ , наоборот, приводит к возрастанию влияния этого сдвига.

9. Погрешность  $\alpha$ , получаемая при интегральном и логарифмическом (с использованием МНК) методах обработки, вызываемая сдвигами  $\Delta P^*$  и  $z^*$ , практически не зависит от количества точек  $n$ , выбранных на исследуемом отрезке  $\Delta z$ . Значения погрешности  $\alpha$ , вызываемой сдвигами  $\Delta P^*$  и  $z^*$ , в этих случаях практически одинаковы и зависят не только от метода обработки, но и от реализуемых значений  $\Delta P^*$  и  $z^*$ ,  $\alpha$ ,  $z_1$  и  $\Delta z$ . Это положение в целом остается справедливым при работе в условиях высокой прозрачности атмосферы и использовании метода [6]. Однако при малой прозрачности и  $z^* \neq 0$  изменение числа точек (при расчете интеграла в знаменателе (7) по методу трапеций) приводит к существенным колебаниям рассчитываемой величины  $\alpha$ , что объясняется

как упоминалось выше, неустойчивостью решения (7) при малости его знаменателя.

Проведенные расчеты показывают существенное влияние инструментальных погрешностей на результат определения  $\alpha$  лидарными методами. Из расчетов следует, что определение  $\alpha$  в близкой к локалатору зоне, где амплитуда сигналов достаточно велика, сопровождается, к сожалению, существенными погрешностями из-за несовершенства используемой аппаратуры. Кроме того, расчеты показывают, что даже незначительные значения  $\Delta P^*$ ,  $z^*$ ,  $\Delta P/P$  могут приводить к весьма существенным погрешностям определения  $\alpha$ , и на эту особенность следует обратить такое же серьезное внимание, как и на другие источники погрешностей, о которых мы упоминали в начале нашей работы и которым до сих пор уделялось гораздо большее внимание (нестабильность индикатрисы, фон многократного рассеяния и т. д.). Для получения сколь-нибудь достоверных лидарных данных о прозрачности атмосферы необходимо тщательнейшим образом совершенствовать используемую при экспериментах аппаратуру, поскольку именно здесь, а также в пренебрежении методическими вопросами лежит, по нашему мнению, причина больших расхождений результатов лазерного зондирования, получаемых в тех или иных условиях.

В заключение авторы благодарят В. М. Пашкову за существенную помощь в обработке полученных результатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров А. Д., Степаненко В. Д. Анализ погрешностей различных методов определения коэффициента ослабления атмосферы с помощью лидаров.— 3 кн.: Радиофизические исследования атмосферы, Л., 1977, с. 43—52.
2. Ковалев В. А. Анализ методов обработки сигналов лазерных локалаторов при измерении прозрачности атмосферы.— Труды ГГО, 1976, вып. 357, с. 121—139.
3. Ковалев В. А. Об одном способе обработки сигналов лазерного локалатора.— Труды ГГО, 1973, вып. 312, с. 128—133.
4. Теоретические аспекты проблемы лазерного зондирования облаков/ В. Е. Зуев, Г. М. Креков, М. М. Крекова, И. Э. Наац.— В кн.: Вопросы лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск, 1976, с. 3—33.
5. Худсон Д. Статистика для физиков.— М.: Мир, 1970.— 296 с.
6. Barret E. W., Ben-Dov O. Application of the lidar to air pollution measurements.— J. Appl. Met., 1967, vol. 6, N 3, p. 500—515.

*В. А. Ковалев, А. Г. Кузьмин*

## **ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ АПРИОРНЫХ ДОПУЩЕНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ**

Уравнение лазерной локации ввиду своей многопараметричности не может быть решено однозначно относительно какого-либо из этих параметров без того или иного априорного допущения о характере изменения остальных. Непосредственные измерения этих величин прямыми методами представляют, как правило, трудную задачу и поэтому проводятся крайне редко. Наиболее простое допущение, используемое, например, при зондировании в горизонтальном направлении, заключается в предположении однородности атмосферы (а точнее — постоянства коэффициента ослабления и индикатрисы рассеяния) либо на всей зондируемой трассе, либо на ее отдельных участках. Критерием для оценки правильности такого допущения, хотя и недостаточно строгим, является линейность кривой логарифма скорректированного на квадрат расстояния эхо-сигнала на приемнике лидара [8]. В ряде случаев, например, при зондировании облаков, используют некоторое среднее значение параметра индикатрисы рассеяния, наиболее типичное для данного вида облаков, считая его внутри облака постоянным [1]. При использовании интегрального асимптотического метода обработки используются два допущения: наличие «насыщенного» сигнала и равенство средних интегральных значений параметра индикатрисы на двух участках зондируемой трассы различной протяженности [3]. В методе, изложенном в работе [6], априорным допущением является равенство показателей ослабления и параметра индикатрисы рассеяния в двух перекрывающихся зондируемых объемах; в работах [2, 5] предполагается наличие горизонтально стратифицированной атмосферы и т. д. Другими словами каждый раз в зависимости от условий и объекта зондирования выбираются разные априорные допущения. Однако в любом случае такие допущения неизбежны, а следовательно, и достоверность полученного результата находится в прямой связи с их достоверностью.

Сложившийся подход к интерпретации сигналов лазерных ло-  
каторов, по-видимому, совершенно неизбежен, однако нам пред-  
ставляется, что принятие того или иного априорного допущения и  
расчет на его основе интересующего нас параметра атмосферы мо-  
гут служить лишь одним из этапов. Другим обязательным этапом  
должна быть та или иная, прямая или косвенная оценка справед-  
ливости принятых допущений с последующим выводом об их ист-  
инности или ложности и соответственно либо подтверждением  
полученного результата, либо его опровержением. Поэтому насущ-  
ной задачей в настоящее время является разработка алгоритмов  
решения лазерного уравнения, основанных на использовании тех  
или иных допущений, и допускающих возможность последующей  
проверки достоверности этих допущений. Возможным вариантом  
решения этой задачи может быть использование не одного, а не-  
скольких алгоритмов с последующим сопоставлением полученных  
результатов. Один из примеров такого подхода к решению этой  
задачи мы и рассмотрим ниже. Обратимся к алгоритму решения  
уравнения лазерной локации относительно коэффициента ослабле-  
ния  $\alpha(z)$  на расстоянии  $z$  от локатора, приведенному в работе [7],

$$\alpha(z) = \frac{S(z)}{k \cdot x(z) \cdot T_0^2 - 2 \int_{z_0}^z S(z) dz}. \quad (1)$$

Здесь  $S(z) = P(z) \cdot z^2$ ;  $P(z)$  — ордината кривой эхо-сигнала  
в точке  $z$ ;  $x(z)$  — параметр индикатрисы в точке  $z$ ;  $k$  — постоян-  
ная прибора;  $z_0$  — точка, соответствующая началу исследуемого  
участка;  $T_0^2 = \exp \left[ -2 \int_0^{z_0} \alpha \cdot dz \right]$ . Заметим, что соотношение (1)

справедливо при условии, что  $x(z) = \bar{x}(z_0, z)$ , где  $\bar{x}(z_0, z)$  — сред-  
нее интегральное значение параметра индикатрисы в слое  $z_0 - z$ .  
Перепишем выражение (1) в виде

$$A = \frac{S(z)}{\alpha(z)} + 2 \int_{z_0}^z S(z) dz, \quad (2)$$

где  $A = k \cdot x(z) \cdot T_0^2$ .

Если каким-либо методом, например известным методом логарифмической производной, определить в некоторой точке значение  $x(z)$ , то по формуле (2) можно непосредственно найти постоянный (при данном  $z_0$ ) параметр  $A$ . Естественно, точность определения этого параметра будет зависеть от точности найденного значения  $x(z)$ , которая в свою очередь определяется как инструментальными погрешностями, так и степенью однородности слоя атмосферы вблизи точки  $z$ .

Аналогично сказанному, для любой точки  $z_i$  можно записать

$$A_i = \frac{S(z_i)}{\alpha(z_i)} + 2 \int_{z_0}^{z_i} S(z) dz \quad (2a)$$

и, определив, как и ранее, соответствующие значения  $\alpha(z_i)$ , найти параметр  $A_i$ . Если бы значения  $\alpha(z_i)$  были бы определены идеально правильно, а индикатриса  $x(z)$  в пределах рассматриваемого слоя  $z_0 - z$  была бы постоянна, то во всех случаях из формулы (2а) мы должны были получить одно и то же значение, т. е.  $A_i = A = \text{const}$ , и постоянство параметра  $A_i$  может служить первым критерием правильности выбранных допущений. В реальных случаях, однако, мы будем получать параметр  $A$  с тем или иным разбросом. Если окажется, что полученные значения  $A$  распределены по нормальному закону, то можно рассчитать среднее значение параметра  $\bar{A} = \frac{1}{n} \sum A_i$  и, подставив его в формулу (1),

определить ход функции  $\alpha(z)$  на всей зондируемой трассе, включая и те участки, где определение  $\alpha(z)$  методом логарифмической производной было невозможно из-за неоднородности помутнения. При нахождении  $\alpha(z)$  методом логарифмической производной следует, естественно, выбирать участки трассы с однородным помутнением, используя обычный критерий линейности графика функции  $\ln S$  от  $z$ . При этом степень однородности рассматриваемого участка трассы может оцениваться по значениям дисперсий ординат кривой  $\ln S$  относительно аппроксимирующей кривой, рассчитанной, например, по методу наименьших квадратов [4]. Естественно, для расчетов значений  $A_i$  надо использовать лишь те участки, где дисперсия минимальна. Если при этом разброс полученных значений  $A_i$  относительно среднего  $\bar{A}$  невелик и  $\bar{A}$  не имеет систематического хода, например, при изменении числа точек, по которым определяется  $\alpha(z)$ , то это может служить дополнительным критерием достоверности полученных результатов, которая может оцениваться, например, дисперсией параметра  $\bar{A}$ . Если же дисперсия параметра  $\bar{A}$  велика или  $\bar{A}$  имеет систематический ход при изменении числа точек, используемых при расчетах  $\alpha(z)$  по методу наименьших квадратов, то это является признаком того, что какие-то исходные условия не выполняются, например, зондируемая трасса не имеет сколь-нибудь протяженных однородных по прозрачности участков, меняется параметр индикатрисы  $x(z)$  и т. п.

На рис. 1 приводятся примеры рассчитанных на ЭВМ профилей  $\alpha(z)$  по осциллограммам эхо-сигналов лазерного локатора на длине волны 0,6943 мкм, полученным при зондировании в горизонтальных направлениях. Сначала путем последовательных сдвигов начальной точки по методу наименьших квадратов с учетом дисперсий сигналов рассчитывался профиль  $\alpha(z)$ , причем такой расчет был проведен последовательно для разного числа точек  $n$ . Для расчетов  $\bar{A}$  при данном фиксированном  $z_0$  были отобраны  $\alpha(z)$  на участках, где дисперсия ординат  $\ln S$  относительно аппроксимирующей прямой не превышала определенного значения. Другими словами, выбирались такие участки трассы, где значения ор-

динат функции  $\ln S$  хорошо ложились на прямую линию, что давало основание сделать вывод об однородности помутнения на данном участке. По отобранным  $\alpha(z)$  и формуле (2а) рассчитывались значения параметра  $A_i$  и затем среднее взвешенное  $\bar{A}$  и его дисперсия. Далее это среднее  $\bar{A}$  подставлялось в формулу (1) и

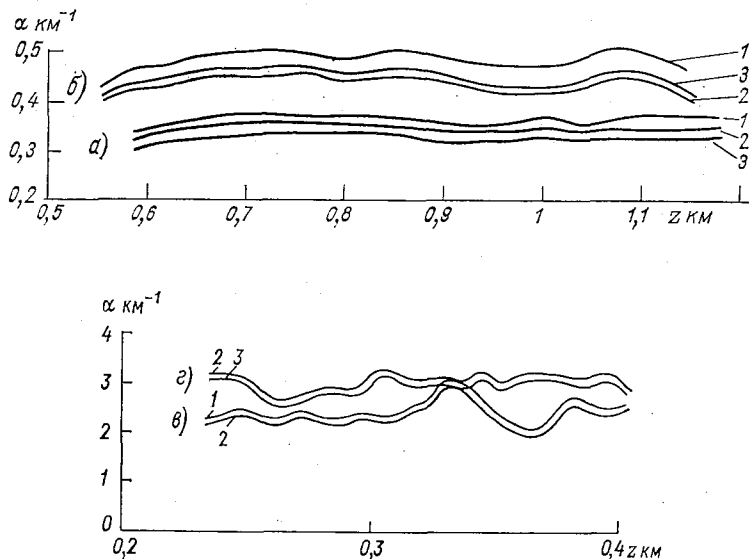


Рис. 1. Примеры профилей коэффициента ослабления на длине волны 0,6943 мкм при зондировании в горизонтальных направлениях.

а) 9 III 1977 г., 15 ч 48 мин, видимость 10—15 км, б) 9 III 1977 г., 16 ч 13 мин, видимость 10—15 км, в) 16 III 1977 г., 10 ч 47 мин, видимость 1 км, г) 17 III 1977 г., 9 ч 43 мин, видимость 0,5—1 км; 1)  $n=5$ , 2)  $n=11$ , 3)  $n=17$ .

определялся уточненный профиль коэффициента ослабления  $\alpha(z)$ .

Каждый профиль рассчитывался отдельно для  $n=5, 11$  и  $17$ . Рассмотренная методика обработки, не являясь универсальной, пригодной для всех случаев помутнений, имеет то несомненное преимущество, что позволяет в определенной степени оценивать достоверность полученных результатов, исключать сомнительные случаи и использовать при последующем анализе данные, наиболее достоверные из всего полученного материала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаров В. М., Костко О. К. Лазеры и метеорология.—Л.: Гидрометеиздат, 1972.—60 с.
2. Зуев В. Е. и др. Исследование приземного слоя атмосферы и облаков методом лазерной локации/В. Е. Зуев, И. В. Самохвалов, Ю. С. Валин.—Изв. вузов. Физика, 1972, № 5, с. 125—128.

3. Ковалев В. А. Об одном способе обработки сигналов лазерного лока-  
тора.— Труды ГГО, 1973, вып. 312, с. 128—133.

4. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов экспери-  
мента.— М.: Наука, 1971.— 192 с.

5. Скрелин А. Л. и др. Изучение возможностей восстановления верти-  
кального профиля показателя рассеяния чистой и облачной атмосферы из данных  
лазерного зондирования/А. Л. Скрелин, И. С. Хутко, Л. В. Николаев.— В кн.:  
Тезисы докладов III Всесоюз. симпозиума по лазерному зондированию атмо-  
сферы. Томск, 1974, с. 112—116.

6. Степаненко В. Д., Васильев В. В. Об оптико-локационном  
определении прозрачности атмосферы.— Труды ГГО, 1973, вып. 281, с. 101—108.

7. Barret E. W., Ben-Dov O. Application of the lidar to air pollution  
measurements.— J. Appl. Meteorol., 1967, vol. 6, N 3, p. 500—515.

8. Brown R. T., Hazel R. F., Laudon H. Sistem for measuring extinc-  
tion coefficients in the atmosphere utilising backscatter signals. Pat. USA  
N 3519354, 1970.

*Е. Л. Махоткина*

## **О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПО ПРИЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПИРАНОМЕТРА**

Пиранометр конструкции Ю. Д. Янишевского [12] является в СССР основным прибором для измерения суммарной, рассеянной и отраженной радиации. Исследованию этого прибора посвящен целый ряд работ [1, 4, 6, 7, 9, 11], в которых в основном рассматриваются вопросы, связанные с методикой наблюдений и их обработкой. Вместе с тем вопросы о формировании выходного сигнала в двуцветном пиранометре и особенно о распределении чувствительности по его приемной поверхности оставались недостаточно проработанными экспериментально.

Элементарная теория пиранометра, представленная в монографии [5], дает возможность проанализировать наиболее существенные источники ошибок измерений. Для оценки этих ошибок требуется сделать ряд допущений, а сравнительно простое соотношение имеется лишь между показанием гальванометра и величиной разности потоков радиаций, поглощаемых черными и белыми клетками приемной поверхности.

Экспериментальное исследование чувствительности однотипных клеток пиранометра проводилось в естественных условиях, причем для выделения клеток с одинаковой закраской была использована специальная насадка, которая навинчивалась на основание пиранометра вместо стеклянного колпака. Насадка позволяла устанавливать над термобатареей пиранометра специальную маску, затеняющую либо все белые, либо все черные клетки. При проведении измерений приемная поверхность пиранометра устанавливалась перпендикулярно к солнечным лучам, для чего пиранометр с насадкой помещался в поворочной трубе ПО-11, в качестве контрольного прибора использовался актинометр. Так как для определения чувствительности однотипных клеток производились серии следующих друг за другом измерений с последовательным затенением клеток то одного, то другого цвета, можно считать, что в обоих случаях температура холодных (т. е. затененных) спаев была одинаковой. Полученные результаты являются типичными и приведены в табл. 1 для двух пиранометров.

Чувствительности пиранометров ( $K$ ), черных ( $K_{\text{ч}}$ ) и белых ( $K_{\text{б}}$ ) клеток  
( $\text{мВ} \cdot \text{кал}^{-1} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мин}$ )

Без колпака

| Пиранометр | $K$   | $K_{\text{ч}}$ | $K_{\text{б}}$ | $\frac{K}{K_{\text{ч}} - K_{\text{б}}}$ | $\frac{K_{\text{ч}}}{K_{\text{б}}}$ |
|------------|-------|----------------|----------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|
| № 274      | 10,60 | 11,75          | 1,62           | 1,05                                    | 7,2                                 |
| № 27       | 11,56 | 13,11          | 1,80           | 1,02                                    | 7,3                                 |

Из табл. 1 видно, что разность чувствительностей черных и белых клеток с точностью до нескольких процентов равна непосредственно определенной общей чувствительности термобатарей. Эти же измерения позволили установить, что стеклянный колпак снижает чувствительность термобатареи в среднем на 6—7 %, что в общем согласуется с данными Молдау о пропускании колпаков пиранометров [7].

Чувствительность белых клеток отдельных экземпляров приборов колеблется от 1,2 до 1,9  $\text{мВ} \cdot \text{кал}^{-1} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мин}$  и в среднем в 7 раз меньше чувствительности черных клеток (10—13  $\text{мВ} \cdot \text{кал}^{-1} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мин}$ ). Оценка соотношения чувствительностей черных и белых клеток, вообще говоря, может быть получена также совершенно другим способом по данным о спектральной отражательной способности покрытий, применяемых для окраски термобатареи пиранометра. Согласно данным, приведенным в статье [8], это отношение равно примерно 5, так как значения отражательной способности для черного и белого покрытий, осредненные для рабочего диапазона пиранометра, составляют соответственно 0,04 и 0,80. Необходимо заметить, что если отражение от черной поверхности определяется достаточно надежно, то результаты, относящиеся к однотипным белым покрытиям, в ряде случаев значительно расходятся. Например, в работе [2] для характеристики спектрального отражения магнезии с целлулоидом приведены две кривые, расхождение между которыми составляет примерно 15 %. Вместе с тем некоторые белые краски обладают высокой отражательной способностью,  $R \approx 0,9$  [3], так что при использовании их в паре с черным покрытием соотношение чувствительностей черных и белых клеток может приблизиться к 10.

Для подтверждения того, что общая чувствительность двучетного пиранометра полностью определяется чувствительностью его отдельных клеток, описанный эксперимент был проведен на макетах пиранометров, единственное отличие которых от стандартных состояло в том, что в качестве парной к стандартным покрытиям краски была использована киноварь. Выбор киновари был обусловлен тем, что она имеет весьма своеобразную характеристику спектрального отражения [10], существенно отличную от спектральных характеристик покрытий приемников актинометрических

приборов. Исследование макетов пиранометров с красными и белыми, с красными и черными клетками, результаты которого представлены в табл. 2, показало, что общая чувствительность двухцветного пиранометра определяется разностью чувствительностей ( $\Delta K$ ) его одноименных клеток.

Таблица 2

Чувствительности пиранометров ( $K$ ), черных ( $K_{\text{ч}}$ ), красных ( $K_{\text{к}}$ ), белых ( $K_{\text{б}}$ ) клеток ( $\text{мВ} \cdot \text{кал}^{-1} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мин}$ )  
Без колпака

| Пиранометр | $K$  | $K_{\text{б}}$ | $K_{\text{к}}$ | $K_{\text{ч}}$ | $\frac{K}{\Delta K}$ |
|------------|------|----------------|----------------|----------------|----------------------|
| № 12770    | 3,81 | 1,61           | 5,27           | —              | 1,04                 |
| № 7820     | 5,42 | —              | 4,94           | 10,10          | 1,05                 |
| № 365      | 6,90 | —              | 4,66           | 11,57          | 1,00                 |

Остановимся теперь на вопросе о распределении чувствительности по площади термобатареи. Известно, что термобатарея пиранометра представляет собой систему термоэлементов из спаянных друг с другом полосок манганина и константана. Батарея укрепляется на специальной подложке так, чтобы термоспаи располагались между теплоотводящими ребрами. Это дает возможность предположить, что распределение чувствительности по клетке термобатареи должно характеризоваться резко выраженной асимметрией. Общая теория термоэлектрических измерителей лучистой энергии, рассмотренная в [5], в первом приближении описывает распределение температуры вдоль полоски единичного термоэлемента. В результате решения уравнения теплового баланса была получена формула для распределения температуры  $t(x)$ , характеризующего в некоторой степени и распределение чувствительности вдоль полоски (по оси  $x$ ),

$$t(x) = \frac{F'}{2h_0} \left[ 1 - \frac{\text{ch } x \sqrt{A}}{\text{ch } \frac{L}{2} \sqrt{A}} \right], \quad (1)$$

где параметр

$$A = \frac{2(b+d)}{bd}; \quad F' = \frac{F}{\lambda_0 d}; \quad (2)$$

$L$  — длина,  $b$  — ширина,  $d$  — толщина полоски,  $F$  — интенсивность радиации,  $h_0$  и  $\lambda_0$  — коэффициенты теплообмена и теплопроводности. Перейдя к относительным единицам и пронормировав  $t(x)$  по максимуму, а переменную  $x$  по  $L/2$ , можно написать

$$t'(x) = \frac{\text{ch } a - \text{ch } ax}{\text{ch } a - 1}, \quad (3)$$

где параметр

$$a = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{L}{d}} \sqrt{\frac{Lh_0}{\lambda_0}}$$

по расчету для существующих пиранометров равен примерно 0,8. Представляет интерес рассмотреть изменения функции  $t'(x)$  при предельных значениях параметра  $a$  (т. е. при  $a \rightarrow 0$  и  $a \rightarrow \infty$ ). Для малых  $L$  можно принять  $\text{ch } L = 1 + \frac{L^2}{2}$ , откуда

$$t'(x) \approx 1 - x^2, \quad (4)$$

и, наоборот, при больших  $a$ , если пренебречь единицей в знаменателе, так как тогда  $\text{ch } a \approx e^a$ ,

$$t'(x) \approx 1 - e^{-a(1-x)}. \quad (5)$$

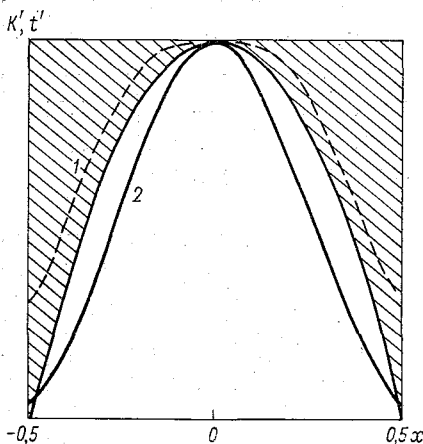


Рис. 1. Характеристика теоретического изменения температуры вдоль термоэлемента и измеренные распределения чувствительностей вдоль (1) и поперек (2) клеток пиранометра (относительно ребер).

Область, в пределах которой располагаются теоретические кривые изменения температуры, заштрихована на графике. Все кривые даны в относительных единицах.

Отсюда следует, что в пределе при  $a \rightarrow \infty$  функция  $t(x)$  стремится к 1 при  $0 \leq x < 1$  и равняется нулю при  $x = 1$ , а при малых  $a$  эта функция представляет собой параболу (рис. 1). Полученный результат говорит о том, что функция  $t'(x)$  довольно слабо изменяется в зависимости от значения параметра  $a$ .

Для экспериментального исследования среднего распределения чувствительности по клеткам пиранометра была изготовлена насадка, аналогичная описанной выше, на которой укреплялась специальная маска с четырьмя длинными параллельными щелями, расположенными на расстояниях, равных ширине клетки пиранометра, тогда как ширина каждой щели была в 11 раз меньше ширины клетки. Эта маска могла перемещаться с помощью

винта, один оборот которого вызывал передвижение щелей на  $\frac{1}{10}$  ширины клетки. При проведении каждой серии измерений приемная поверхность пиранометра ориентировалась перпендикулярно к солнечным лучам, а щели в одних сериях устанавливались параллельно теплоотводящим ребрам, в других — перпендикулярно к ребрам. В течение каждого опыта, продолжавшегося около 1 ч, все показания прибора при последовательном перемещении щелей отдельными шагами, между которыми приемная поверхность затенялась для отметки нуля, регистрировались самописцем Н-39.

В результате обработки полученных данных было обнаружено, что кроме ожидаемого большого изменения чувствительности при перемещении щелей параллельно теплоотводящим ребрам заметное изменение чувствительности наблюдается и при установке щелей перпендикулярно к ребрам. Сопоставляя полученные кривые

с теоретически возможными изменениями распределения температуры (рис. 1), можно отметить, что в среднем эти кривые близки к кривой для случая, когда преобладающее значение имеет теплопроводность (коэффициент  $\alpha$  близок к нулю). Примерное распределение чувствительности по площади клетки, полученное по данным проведенных измерений (рис. 2), оказывается не таким резко асимметричным, как можно было ожидать. Таким образом,

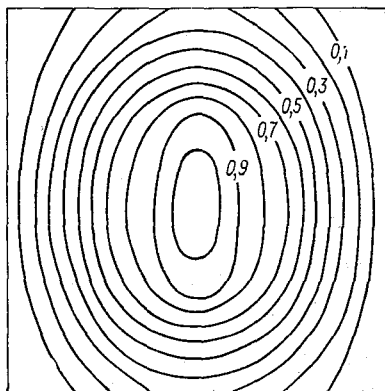


Рис. 2. Распределение чувствительности по площади клетки приемной поверхности пиранометра (нормированное по максимуму).

общая закраска клетки приводит к существенному объединению отдельных полосок и к появлению тенденции к осесимметричному распределению чувствительности по поверхности клетки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние спектральных характеристик приемных поверхностей приборов на точность измерения радиационных потоков/А. Н. Броунштейн, К. Д. Лебедева, С. И. Сивков.— В кн.: Актинометрия и оптика атмосферы. Таллин, Валгус, 1968, с. 218—226.
2. Войтикова Т. Д. Некоторые данные о диффузном отражении покрытий приемников актинометрических приборов.— Труды ГГО, 1965, вып. 170.
3. Зайцева Н. А. Актинометрическое радиозондирование атмосферы.— Труды ЦАО, 1976, вып. 117, с. 138—145.
4. Козырев Б. П., Бученков В. А. Измерение спектральной чувствительности пиранометров и балансомеров.— Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1966, т. 2, № 5, с. 540—544.
5. Кондратьев К. Я. Лучистая энергия Солнца.— Л.: Гидрометеиздат, 1965.
6. Махоткина Е. Л. К вопросу об определении спектральных поправок пиранометра Янишевского.— Труды ГГО, 1974, вып. 324, с. 134—143.
7. Молдау Х. О спектральной чувствительности пиранометра Янишевского и балансомера Шульца.— В кн.: Исследования по физике атмосферы. Тарту, 1967, с. 141—158.
8. Некоторые результаты исследования спектральных характеристик черных и белых покрытий, применяемых для приемных поверхностей актинометрических приборов/А. М. Броунштейн, Б. П. Козырев, К. Д. Лебедева, С. И. Сивков.— Труды ГГО, 1968, вып. 213.
9. Росс Ю. К. Об измерении радиации пиранометрами Янишевского.— Изв. АН ЭССР, серия техн. и физ., 1957, т. 1, № 1, с. 3—8.
10. Шаронов В. В. Свет и цвет.— М.: Физматгиз, 1961.— 311 с.
11. Янишевский Ю. Д. Вопросы методики измерения пиранометрами и рассеянная радиация в Павловске.— Труды ГГО, 1951, вып. 26 (88), с. 5—45.
12. Янишевский Ю. Д. Актинометрические приборы и методы наблюдений.— Л.: Гидрометеиздат, 1957.— 415 с.

*Н. Н. Парамонова, А. М. Броунштейн*

## **О НЕПРЕРЫВНОМ ОСЛАБЛЕНИИ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В ИК ОКНАХ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ**

1. В течение ряда лет в Воейково производились измерения пропускания всей толщи атмосферы в ИК окнах прозрачности. Ранее были опубликованы исследования селективной части ослабления [4, 5, 6]. В настоящее время наибольший интерес представляет изучение непрерывного ослабления ИК радиации, которое вносит существенный вклад в общее ослабление в окнах прозрачности атмосферы.

Количественные закономерности, а также механизмы процессов непрерывного ослабления радиации в ИК области спектра до настоящего времени остаются не до конца выясненными особенно в окне 8—12 мкм. В этом окне вклад в непрерывное ослабление может вносить как поглощение в континууме водяного пара, так и аэрозольное ослабление. Интерпретируя результаты натурных измерений, исследователи в ряде случаев приходят к противоположным выводам относительно того, какой из указанных двух факторов является решающим [10, 14, 8].

Между тем представляется достаточно очевидным, что соотношение этих вкладов существенно зависит от состояния атмосферы (влажность, температура, количество и состав аэрозоля). Поэтому большой интерес представляет выяснение количественного соотношения указанных факторов при различных атмосферных условиях.

В настоящей работе приводятся некоторые результаты измерений непрерывного ослабления солнечной радиации всей толщиной атмосферы в ИК окнах прозрачности. Основное внимание уделено области спектра 8—12 мкм, для которой проведены расчеты поглощения в континууме водяного пара по данным опубликованных в последнее время лабораторных исследований. На основе сопоставления результатов натурных измерений и указанных расчетов выбраны лабораторные данные, больше соответствующие натурным измерениям.

Проведенная по этим данным оценка вклада за счет континуума водяного пара в полученные в реальных условиях величины полного непрерывного ослабления дает возможность выделить

эрозольную составляющую ослабления и судить о соотношении двух компонент непрерывного ослабления в окне 8—12 мкм в охваченных экспериментом условиях.

2. Измерения пропускания атмосферы проводились в течение 1971—1976 гг. на установке ИКАУ-1. Аппаратура и методика измерений описана в работе [3]. Спектры солнечной радиации записывались в области окон прозрачности атмосферы 2,0—2,2; 4—4,0; 8—12 мкм со спектральным разрешением 4,0; 1,5; 2,0 см<sup>-1</sup> соответственно.

Одновременно с записью спектров производились измерения актинометрической прозрачности  $P_{\text{аэп}}$  и содержания водяного пара  $W_z$  [7], а также относительного солнечного ореола. Актинометрическая прозрачность использовалась для характеристики аэрозольного состояния атмосферы, причем вклад определяемое актинометром пропускание атмосферы за счет оглошения солнечной радиации водяным паром вычитался согласно расчетной формуле, приведенной в работе [9]. Для анализа также были привлечены данные радиозондирования, которое производят в Воейково на расстоянии 500 м от места наблюдений. Естественная оптическая плотность непрерывного ослабления  $D_\lambda$  для вертикального столба атмосферы определялась, как обычно, из узких малоселективных участков спектра на основе закона Бугера

$$I_\lambda = I_{0\lambda} e^{-D_\lambda m}. \quad (1)$$

Здесь  $I_\lambda$  — регистрируемый прибором поток солнечной радиации, выделяемый спектральном интервале с центром у  $\lambda$ ,  $I_{0\lambda}$  — соответствующий поток на верхней границе атмосферы,  $m$  — число атмосферных масс.

Внеатмосферные значения  $I_{0\lambda}$  определялись долгим методом Бугера в оптически стабильные дни, которые выбирались по устойчивости содержания водяного пара на пути луча, актинометрической прозрачности, а в последние 3 года и относительного солнечного ореола.

Для каждого года определялись свои внеатмосферные значения  $I_{0\lambda}$  поскольку изменялось состояние аппаратуры (переалюминирование зеркал, смена источника излучения в спектрофотометре, изменение ослабителей солнечного потока).

Из выражения (1) следует, что ошибка определения  $D_\lambda$  равна

$$\Delta D_\lambda = \frac{1}{m} \left( \frac{\Delta I_{0\lambda}}{I_{0\lambda}} + \frac{\Delta I_\lambda}{I_\lambda} \right), \quad (2)$$

где  $\Delta I/I_\lambda$  — ошибка измерения потока солнечной радиации, приходящего к прибору. Согласно подробной оценке этой ошибки, проведенной в работе [5], значение  $\Delta I/I$  составляет примерно  $\pm 3,5\%$ . Это приводит к вкладу в общую погрешность  $\Delta D$  от 0,017 до 0,006 при числе атмосферных масс 2 и 8 соответственно. Оценки, полученные из анализа разброса данных наблюдений в оптически стабильные дни, находятся в согласии с расчетными оценками.

Ошибка в определении внеатмосферных значений  $I_{0\lambda}$  оценивалась нами по их разбросу, полученному по нескольким стабильным дням в пределах каждого периода измерений. Как правило, разброс не превышал  $\pm 2\%$  относительно среднего значения  $\bar{I}_0$ . Поскольку измерения производились в основном при  $m \geq 2$ , то вклад этой погрешности в  $\Delta D_\lambda$  составляет не более  $\pm 0,01$ . Ошибка во внеатмосферных значениях является систематической для каждого отдельного периода измерений, однако в общем массиве данных использовалось 6 наборов значений  $I_{0\lambda}$ , и эту ошибку, по-видимому, целесообразно рассматривать как случайную. Поскольку указанные ошибки являются независимыми, то их сложение дае

$$\Delta D = \pm \sqrt{(0,017)^2 + (0,01)^2} = \pm 0,02.$$

Здесь оценка произведена для  $m=2$ , при  $m \geq 2$   $\Delta D$  будет согласно выражению (2) иметь несколько меньшее значение.

В настоящей работе не ставилась задача статистического анализа всего полученного за 1971—1976 гг. массива данных. Мы стремились как можно более точно оценить вклад за счет поглощения водяным паром в величину измеренного в натуральных условиях непрерывного ослабления и выделить аэрозольную составляющую ослабления. Для корректного учета вклада водяного пара на основе лабораторных измерений поглощения  $H_2O$  необходимо знать распределение с высотой температуры, влажности и давления. Поэтому для анализа использовались только те спектры, которые записывались во время запусков радиозонда, которые производятся 2 раза в день (в 14 и 20 ч). Допускался сдвиг по времени между записью спектра и запуском радиозонда не более 1 ч. Время записи одного полного спектра составляет 40 мин. Таким образом, из всего массива данных, полученных за день, можно было использовать только 1 или 2 спектра.

Кроме того, из экспериментальных данных были отобраны наиболее надежные, полученные в дни, когда производились не одиночные измерения, а целые серии наблюдений (от 4 до 10 в день). Это позволяет исключить возможные промахи и достаточно объективно оценивать качество используемого материала. Составленная на основе указанных критериев выборка содержит 40 спектров, которые используются здесь для дальнейшего анализа. Распределение спектров по условиям измерений приведено в табл. ( $P_{\text{аэр}}$  — прозрачность по актинометру, приведенная к  $m=2$  с поправкой на поглощение водяным паром).

3. Остановимся кратко на вопросе об искажающем влиянии слабого селективного ослабления в прозрачных интервалах, используемых при изучении непрерывного ослабления.

Для определения  $D_\lambda$ , обусловленного только непрерывным ослаблением, всеми исследователями выделяются так называемые «чистые» участки спектра, где вклад селективного ослабления предполагается пренебрежимо малым. Между тем инфракрасная область спектра насыщена линиями поглощения атмосферных га-

Таблица 1

## Распределение спектров по условиям измерений

| $W_z$ см H <sub>2</sub> O | $P_{\text{аэр}}$ |          |          |      |
|---------------------------|------------------|----------|----------|------|
|                           | 0,4—0,6          | 0,6—0,65 | 0,65—0,7 | >0,7 |
| <0,50                     | —                | 2        | 9        | 4    |
| 0,50—1,00                 | 1                | 3        | 7        | 1    |
| 1,00—1,50                 | —                | 2        | 3        | —    |
| 1,50—2,00                 | 2                | 2        | —        | —    |
| >2,00                     | 3                | 1        | —        | —    |

ов (5—20 линий на  $1 \text{ см}^{-1}$  в относительно чистых спектральных интервалах). При среднем разрешении спектрального прибора несколько  $\text{см}^{-1}$ , с которым, как правило, проводятся исследования пропускания, например [14, 15, 17], в выделенные относительно чистые спектральные интервалы всегда попадают линии поглощения атмосферных газов.

С целью количественного определения возможных искажений, носимых этими линиями, был проведен прямой расчет селективной части пропускания с использованием параметров тонкой структуры спектра атмосферных газов [11]. Необходимые для расчета параметры линий были взяты из работы [19]. На основе проведенных расчетов были найдены значения поправок определения  $D_\lambda$ , возникающие из-за вклада селективного ослабления. В статье [11] указанные поправки приведены в зависимости от разрешения спектрального прибора ( $\Delta\nu = 1, 3, 5 \text{ см}^{-1}$ ), влажности ( $e = 5, 10, 5, 25 \text{ мбар}$ ) и диапазона атмосферных масс, используемого при проведении прямых Бугера ( $\Delta m = 1,5—10; 4—10; 1,5—4$ ) для всех чистых спектральных интервалов, используемых различными авторами при определении непрерывного ослабления.

Значения поправок в  $D_\lambda$  различны для разных спектральных интервалов и в некоторых из них доходят до 0,06, что составляет заметную величину, если принять во внимание, что в среднем  $D_\lambda$  имеет порядок 0,1. Учитывать вклад селективного ослабления необходимо как для получения правильных значений  $D_\lambda$ , так и для устранения искажений спектрального хода непрерывного ослабления. Используя результаты [11], в рассматриваемые в настоящее время данные натурных измерений мы ввели соответствующие поправки.

4. Разделение измеренного полного ослабления в окне 8—2 мкм на компоненты, обязанные водяному пару и аэрозольному ослаблению, осуществлялось на основе лабораторных исследований непрерывного поглощения водяным паром. Этот метод применялся нами и ранее [4, 6].

В лабораторных исследованиях континуума водяного пара в окне 3—12 мкм [2, 16, 18, 20] обнаружена зависимость коэффициента

поглощения от парциального давления пара. Результаты лабораторных измерений обычно аппроксимируются формулой, предложенной Бигнеллом [16],

$$D_{\lambda W} = (k_1 P + k_{2\lambda} e) W \quad (6)$$

или другими выражениями, которые могут быть приведены к этому виду.

В формуле (3)  $D_{\lambda W}$  — оптическая плотность водяного пара,  $W$  — содержание водяного пара на пути луча,  $P$  — общее давление,  $e$  — парциальное давление водяного пара,  $k_1$  и  $k_{2\lambda}$  — коэффициенты, определяемые при аппроксимации экспериментальных данных указанной зависимости. В работах, где производились измерения поглощения водяным паром при разных температурах [2, 16, 18] была обнаружена значительная отрицательная температурная зависимость коэффициента  $k_2$ . Во всех указанных выше независимых лабораторных исследованиях получены близкие закономерности. Этот факт является веским доводом в пользу применения их для расчетов ослабления водяным паром при анализе натуральных измерений непрерывного ослабления.

Количественное сравнение лабораторных данных о поглощении водяным паром, полученных разными авторами, проведено в [12].

Самые последние данные содержатся в работе Арефьева и Динанова-Клокова [1], а также в работе Робертса [21], в которой анализируются результаты новых измерений Берча. В табл. 2 даны результаты расчетов оптической плотности для непрерывного ослабления водяным паром для  $\nu = 962 \text{ см}^{-1}$ .

Таблица

Сравнение результатов расчета по лабораторным данным [1] ( $D_A$ ) и [21] ( $D_P$ ) по поглощению водяным паром

|                                  | $W \text{ см}$ |       |       |       |       |
|----------------------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|
|                                  | 0,50           | 1,00  | 1,54  | 2,04  | 2,57  |
| $D_P (T = 296 \text{ К})$        | 0,005          | 0,021 | 0,049 | 0,090 | 0,157 |
| $D_P$                            | 0,011          | 0,035 | 0,070 | 0,122 | 0,194 |
| $D_{A, k_2} (T = 296 \text{ К})$ | 0,005          | 0,019 | 0,046 | 0,084 | 0,147 |
| $D_{A, k_2}$                     | 0,016          | 0,040 | 0,079 | 0,133 | 0,198 |
| $D_{A, k_1}$                     | 0,021          | 0,042 | 0,066 | 0,087 | 0,111 |
| $D_A$                            | 0,037          | 0,082 | 0,145 | 0,220 | 0,309 |

Расчеты проведены по 5 конкретным радиозондам. Из таблицы видно, что значения  $D_P$  и  $D_A$  существенно различаются. Основной причиной расхождений является отсутствие члена с  $k_1$  в данных Берча. Как указано в [21], Берч не смог зафиксировать  $k_1$  из-за

его малости. Приведенная же в [1] формула для коэффициента поглощения водяного пара в смеси с азотом содержит член с  $k_1$ . Вклад этого члена в общую величину  $D_A$  приведен в табл. 2 — величина  $D_{A, k_1}$ . Видно, что первый член формулы (3) в данном случае играет существенную роль.

Кроме того, данные [1] и [21] различаются по температурной зависимости. В табл. 2 приведены значения второго члена формулы (3) с учетом температурной зависимости  $D_P$  и  $D_{A, k_2}$  и без нее  $D_P$  ( $T = 296$  K) и  $D_{A, k_2}$  ( $T = 296$  K) для данных [21] и [1] соответственно. Видно, что температурная зависимость в [1] более сильная. Однако расхождения между  $D_P$  и  $D_m$  в основном вызваны не различием в температурной зависимости, а наличием члена с  $k_1$  в [21]. Без него (см.  $D_P$  и  $D_{A, k_2}$ ) данные [1] и [21] дают хорошее совпадение.

Следует отметить, что лабораторные исследования поглощения водяным паром как в [1], так и в [19, 21] проводились при положительной температуре (20—50 и 20—70 °C), а величина  $k_1$  в [1] определялась при одном значении общего давления. Представляется целесообразным уточнить температурную зависимость в области отрицательных температур, что особенно важно при анализе данных натурных измерений на наклонных трассах, и произвести измерения при различном общем давлении для более точного определения коэффициента  $k_1$ .

5. На рис. 1 приведены результаты сопоставления рассчитанных по данным работ [1] и [22] (рис. 1 б и а) значений оптической плотности  $D_p$ , обусловленной поглощением водяным паром, и полученных в настоящей работе на наклонных трассах величин полной оптической плотности для непрерывного ослабления  $D_o$ . Расчеты были сделаны по данным радиозондирования, проводящегося одновременно с записью спектров. Поскольку дополнительный вклад в  $D_o$  может вносить аэрозольное ослабление, то следует ожидать, что точки на рис. 1 должны находиться вблизи прямой  $D_o = D_p$  или выше нее.

Разброс точек на рис. 1 свидетельствует о том, что измерения проводились в условиях, когда присутствовало добавочное аэрозольное ослабление. Действительно, полученный разброс, достигающий до 0,1, нельзя объяснить ни ошибками эксперимента при определении  $D_o$ , ни ошибками расчета  $D_p$ , так как расчет проводился для каждой экспериментальной точки по конкретному, имеющему место в момент записи спектра вертикальному распределению давления, влажности и температуры.

На рис. 1 выделены точки, полученные в условиях сильно запыленной атмосферы ( $P_{aep} < 0,55$ ). В эти дни было повышенное аэрозольное ослабление у 2 и 4 мкм. Это видно из рис. 3. В этих условиях следует ожидать заметное аэрозольное ослабление и у 10 мкм. При использовании для оценки вклада за счет континуума водяного пара данных [1] (рис. 1 б) аэрозольное ослабление для точек, полученных в условиях сильно запыленной

атмосферы, отсутствует и, кроме того, большая часть экспериментальных значений оказывается ниже расчетных. Соотношение  $D_a$  и  $D_p$ , полученное при использовании для расчета данных [21] (рис. 1 а) представляется более правильным. Следует отметить, что в [21] проводятся также сравнения данных Берча с результатами натурных измерений на приземной трассе длиной 20 км, которые подтверждают данные Берча. Таким образом, результаты анализа, проведенного в настоящей работе и в [21], дают основания считать, что для расчетов целесообразно использовать данные, приведенные в [21].

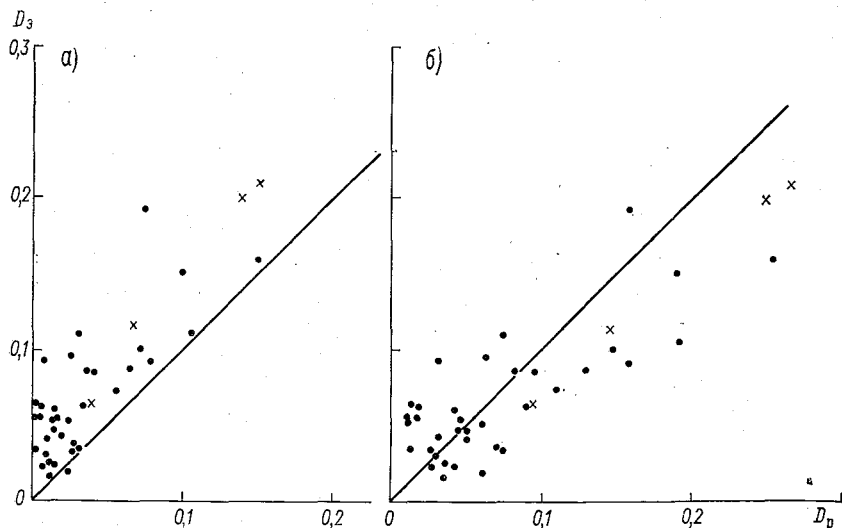


Рис. 1. Сопоставление рассчитанных значений оптической плотности  $D_p$ , обусловленной водяным паром, с получаемыми в эксперименте на наклонных трассах величинами полной оптической плотности для непрерывного ослабления  $D_a$  ( $\lambda=10,39$  мкм,  $\nu=962$  см $^{-1}$ ).

а — расчет по данным [22], б — расчет по данным [1].

6. На основе выбранных лабораторных данных [21], проведено разделение двух компонент непрерывного ослабления и получен спектральный ход аэрозольной оптической плотности. На рис. 2 приведен средний спектральный ход измеренных значений полной оптической плотности для непрерывного ослабления, спектральный ход, получаемый после введения поправок на селективность, и спектральный ход аэрозольного ослабления. На этом же рисунке показан средний спектральный ход полной оптической плотности для непрерывного ослабления, определенный по данным, опубликованным в работе [14]. Данные [14] также были исправлены на селективное ослабление. Видно, что увеличение измеренной оптической плотности непрерывного ослабления в коротковолновой части окна прозрачности атмосферы 8—12 мкм вызвано добавочным селективным ослаблением. На рис. 3 приведены зависимости

аэрозольной оптической плотности в ИК области спектра от аэрозольной составляющей актинометрической прозрачности.

В области 2 мкм эта зависимость довольно хорошо выражена, что говорит о том, что в этой области спектра непрерывное ослабление вызвано в основном аэрозолем, ослабляющим в видимой области спектра или хорошо с ним коррелирующим. В области 4 мкм связь несколько нарушается, что может быть связано с воздействием других фракций аэрозоля, хуже коррелирующим с эффек-

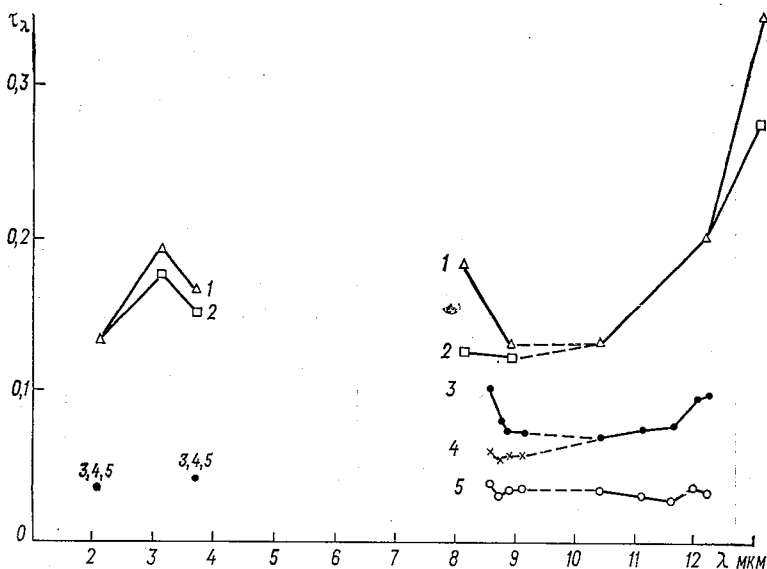


Рис. 2. Спектральный ход оптической плотности непрерывного ослабления.

1 — по данным [14], 2 — данные [14] с учетом поправок на селективное ослабление, 3 — данные настоящей работы, 4 — данные настоящей работы с учетом поправок на селективное ослабление, 5 — спектральный ход аэрозольного ослабления по данным настоящей работы.

тивным в видимой области спектра аэрозолем. В области 10 мкм для остаточного аэрозольного ослабления такой зависимости не наблюдается, хотя если коррелировать полное непрерывное ослабление  $D_\lambda$  с  $D_{\text{аэр}}$ , как это делалось в [14], то связь проявляется (рис. 3 г). Она скорее всего обусловлена зависимостью обеих этих величин от влажности. Рассматривая натурные и лабораторные данные, можно сделать вывод о существенном влиянии в окне 8—12 мкм как поглощения в континууме водяного пара, так и аэрозольного ослабления. В условиях северо-запада средней полосы СССР, где проводились измерения, аэрозольное ослабление обеспечивает оптическую плотность вертикального столба атмосферы, не превышающую в сравнительно широком диапазоне условий 0,1. Это значение основано на использовании лабораторных данных о континууме водяного пара [21], являющихся в настоящее время

наиболее достоверными, хотя и требующих дальнейшего уточнения.

Средний ход аэрозольного ослабления с длиной волны для данной климатической зоны и охваченного диапазона условий ока-

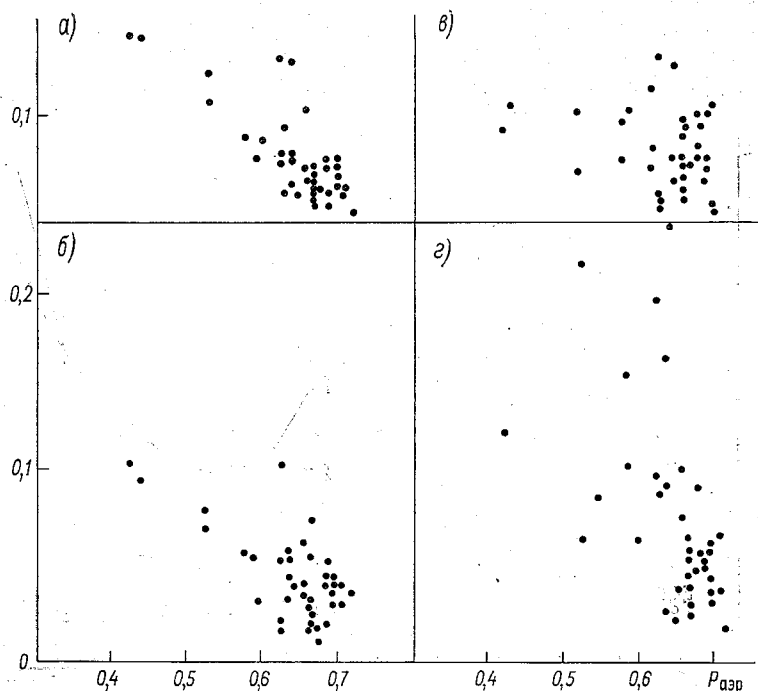


Рис. 3. Зависимость оптической плотности непрерывного ослабления в ИК области спектра от величины аэрозольной составляющей актинометрической прозрачности.

а)  $\lambda=2,2$  мкм, б)  $\lambda=3,7$  мкм, в) остаточное аэрозольное ослабление,  $\lambda=10,4$  мкм, г) полное ослабление,  $\lambda=10,4$  мкм.

зывается нейтральным. Значение оптической плотности аэрозольного ослабления в среднем составляет около 0,04. Оптическая же плотность, обусловленная поглощением в континууме водяного пара, сильно возрастает при увеличении  $W_z$  и становится преобладающей при  $W_z > 1$  см  $H_2O$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арефьев В. Н., Дианов-Клоков В. И. Ослабление излучения 10,6 мкм водяным паром и роль димеров ( $H_2O$ ).— Оптика и спектроскопия. 1977, т. 42, № 5.
2. Арефьев В. Н. и др. Лабораторные измерения ослабления излучения  $CO_2$  — лазера чистым водяным паром. Оптика и спектроскопия. 39, № 5, 1975.
3. Богданов С. С. и др. Аппаратура и методика измерений спектральной прозрачности атмосферы в инфракрасной области спектра.— Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1973, № 1.

4. Богданов С. С. и др. Экспериментальное исследование спектральной прозрачности атмосферы в области 8—12 мкм.— Труды ГГО, 1976, вып. 369.
5. Богданов С. С. и др. Исследование спектральной прозрачности атмосферы в области 3,4—4,0 мкм.— Труды ГГО, 1973, вып. 312.
6. Богданов С. С. Прозрачность атмосферы в некоторых участках ИК области спектра/С. С. Богданов, А. М. Броунштейн, А. Д. Фролов— Труды ГГО, 1971, вып. 279.
7. Броунштейн А. М., Казакова К. В. Об оптическом определении общего содержания водяного пара в атмосфере.— Труды ГГО, 1969, вып. 237.
8. Дианов-Клоков В. И., Иванов В. М. Об ослаблении радиации 8—13 мкм водяным паром атмосферы при различных метеоусловиях.— Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана.— 1978, т. 14, № 8, 847 с.
9. Зверева С. В. О поглощении солнечной радиации атмосферным водяным паром. Актинометрия и оптика атмосферы.— В кн.: Труды VI междуведомственного совещания по актинометрии и оптике атмосферы. Таллин, Изд. Валгус, 1968.
10. Малкевич М. С. Оптические исследования атмосферы со спутников.— М.: Наука, 1973.
11. Парамонова Н. Н., Броунштейн А. М., Фролов А. Д. О систематических ошибках в определении спектрального пропускания всей толщи атмосферы и компонентов непрерывного ослабления в ИК области спектра.— Труды ГГО, 1978, вып. 406, с. 101—114.
12. Парамонова Н. Н. К вопросу об ослаблении радиации в континууме водяного пара в окне 8—12 мкм/Н. Н. Парамонова, К. В. Казакова, А. М. Броунштейн.— Труды ГГО, вып. 369.
13. Розенберг Г. В. и др. Субмикронная фракция аэрозоля и поглощение света в окне прозрачности 8—12 мкм.— Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, т. 13, № 11, 1977.
14. Шукуров А. Х. Экспериментальное исследование закономерностей спектрального пропускания радиации вертикальным столбом атмосферы в окнах интервала 2—13 мкм/А. Х. Шукуров, М. С. Малкевич, А. И. Чавров.— Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1976, т. 12, № 3.
15. Юрганов Л. Н., Дианов-Клоков В. И. О зависимости диффузного ослабления в окне прозрачности 8—13 мкм от влажности.— Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, т. 8, № 3, 1972.
16. Bignell K. I. The water vapor infrared continuum. Quart. J. R. Met. Soc. 1970, 96, N 409.
17. Bignell K. I., Saiedy F., Sheppard P. A. On the atmospheric infrared continuum „JOSA“, 1963, 53, N 4.
18. Burch A. E. Semi-Annual technical report Investigation of the absorption of infrared radiation by atmospheric gas. Philco Ford corp. Aeronutronic report U 4784, Contract NF, 19628-69-CO263, 1970.
19. McClatchey, e. s., Atmospheric absorption line parameters compilation. AFCRL-73-0096.
20. Mcloy I. H., Rensch D. B., Hong R. K. Water vapour continuum absorption of carbon dioxide radiation near 10  $\mu$ . Appl. Opt. 8, N 7, 1969.
21. Robert E. Roberts, John E. A. Selby, Lucien M. Biberman. Infrared continuum absorption by atmospheric water vapor in the 8—12  $\mu$ m window. Appl. Opt. 1976, 15, N 9.

*Е. В. Фабер, А. А. Шашков*

## **ВЛИЯНИЕ АППАРАТУРНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ АТМОСФЕРНОГО CO<sub>2</sub> ИНТЕГРАЛЬНЫМ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

### **1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

В ГГО с 1972 г. разрабатывается интегральный спектроскопический метод (ИСМ) определения общего содержания CO<sub>2</sub> в вертикальном столбе атмосферы. В процессе разработки и опытной реализации метода значительное внимание было уделено вопросу о его погрешностях [4, 5]. В данной статье приведены результаты исследования той части ошибок измерений ИСМ, которая вносится используемой аппаратурой.

Общее содержание CO<sub>2</sub> этим методом определяется по полосе поглощения CO<sub>2</sub> с центром у 2,06 мкм. При помощи спектрофотометра регистрируются спектры поглощения солнечной радиации, по которым определяется величина  $Q$ , связанная с количеством газа на пути луча.  $Q$  определяется выражением

$$Q = \frac{\bar{P}_1 + \bar{P}_2}{2\bar{P}_3}, \quad (1)$$

где  $\bar{P}_1$  и  $\bar{P}_2$  — средние пропускания в «окнах» (в интервалах на краях полосы поглощения CO<sub>2</sub>, где этот газ поглощает мало);  $\bar{P}_3$  — среднее пропускание в полосе поглощения CO<sub>2</sub>.

Ошибки определения величины  $Q$  приводят к ошибкам в концентрации CO<sub>2</sub>, а так как  $Q$  вычисляется по значениям отдельных ординат в спектре, то вопрос об ошибках в  $Q$  — это в основном вопрос об ошибках измерения отдельных ординат, т. е. о погрешности фотометрирования используемого спектрофотометра. Необходимость исследования этих погрешностей подтверждается как расчетами [4], так и специальными экспериментами [2].

Рассмотрим ошибки относительного фотометрирования солнечных спектров на установке ИКАУ-1 [1]. Эти погрешности удобно разбить по характеру их влияния на следующие три группы:

— систематические ошибки, связанные с нелинейностью шкалы пропусканий используемого двухлучевого спектрофотометра UR-20;

— случайные ошибки, характеризующиеся сходимостью показаний этого прибора;

— систематические ошибки, величина которых изменяется со временем.

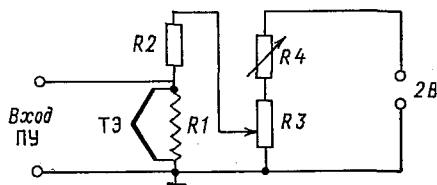
К ним относятся погрешности установки начальной и конечной точек шкалы пропусканий. Так как такая установка производится один раз в день (перед началом измерений), то эти ошибки являются систематическими для спектров, регистрируемых в течение конкретного отдельного дня, однако выступают как случайные при рассмотрении среднедневных значений. Ниже три группы погрешностей будут рассмотрены отдельно.

## 2. СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ

Разработаны различные процедуры исследования нелинейности шкалы пропусканий UR-20. Метод, применявшийся в данной работе, основан на использовании для калибровки шкалы однолучевого электрического устройства [5]. Кратко работу этого устройства можно описать следующим образом (рис. 1). Поток радиации в измерительном канале двухлучевого спектрофотометра перекрывается экраном, а вместо сигнала, вырабатываемого приемником под действием этого потока, в соответствующие полупе-

Рис. 1. Электрическая схема однолучевого устройства.

ТЭ — радиационный термоэлемент (приемник излучения),  $R1$  — сопротивление нагрузки приемника,  $R2$  — добавочное сопротивление, образующее с сопротивлением  $R1$  делитель с коэффициентом деления  $1:10^6$ ,  $R3$  — калиброванный делитель,  $R4$  — регулировочное сопротивление.



риоды на вход предусилителя подается через калиброванный делитель сигнал, вырабатываемый специальным генератором, синхронизированным с оптическим модулятором. Деление этого электрического сигнала на  $n$  эквивалентно введению в измерительный канал оптического фильтра с пропусканием  $1/n$ . Сравнительный канал в однолучевом режиме работает, как и в обычном двухлучевом, и поэтому компенсационная диафрагма уменьшит поток радиации в сравнительном канале, компенсируя уменьшение сигнала в измерительном канале. Выходной прибор спектрофотометра покажет отсчет, соответствующий уменьшению в  $n$  раз потока в измерительном канале. Выставляя на калиброванном делителе различные значения коэффициентов деления, можно отградуировать шкалу пропусканий прибора.

Систематическое исследование нелинейности шкалы этим методом дало кривую, представленную на рис. 2. Для проверки

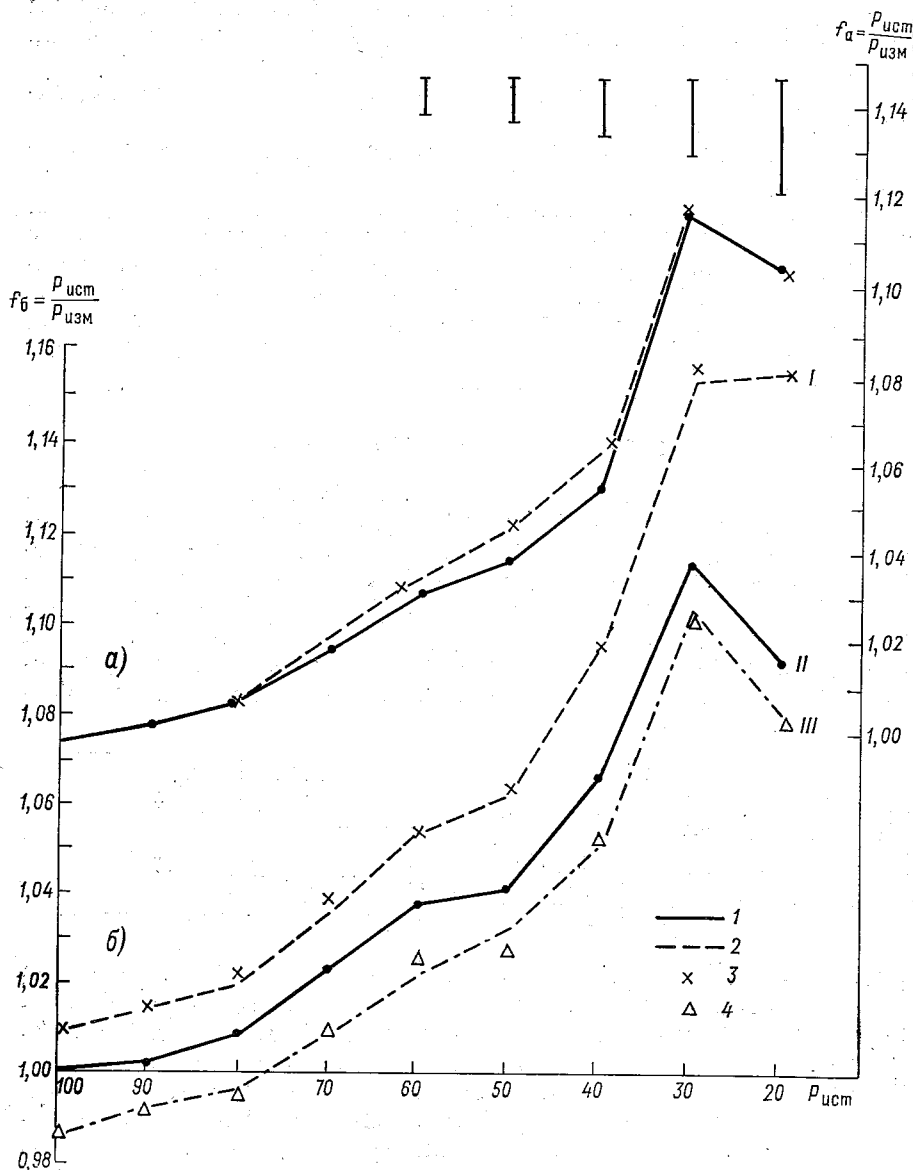


Рис. 2. Сравнение результатов единичного определения кривой нелинейности электрическим (1) и оптическим (2) методами (а) и пересчет кривой нелинейности нормальной шкалы к кривой нелинейности сдвинуто-растянутой шкалы (б).

По оси ординат отложены значения поправочного множителя  $f = P_{\text{ист}}/P_{\text{изм}}$ , где  $P_{\text{ист}}$  — действительное значение измеряемой ординаты,  $P_{\text{изм}}$  — соответствующий отсчет по шкале прибора. Отрезки сверху имеют длину, равную сходимости показаний прибора в 0,5 % от шкалы для соответствующих значений  $P$ . На рис. 1 б три кривые получены экспериментально. Кривая II получена из кривой I путем сдвига «0» шкалы на -1 %; кривая III получена из кривой I путем растяжения шкалы на 1,5 %; 3 — результаты пересчета кривой I для  $\beta=0,01$ ; 4 — результаты пересчета кривой I для  $\alpha=1,015$ .

кривая нелинейности UR-20 была определена еще и независимым оптическим методом, основанным на принципе, сходном с описанным в работе [3]. Результаты измерений обоими методами совпали с хорошей точностью, что свидетельствует о правильности полученных результатов.

Учет нелинейности шкалы UR-20 для используемого экземпляра прибора дает заметную поправку в измерительных ИСМ концентрациях  $\text{CO}_2$ , достигающую 10 %.

### 3. СЛУЧАЙНАЯ ОШИБКА

Исследование сходимости показаний прибора по разбросу точек при многократных экспериментальных определениях кривых нелинейности показало, что среднее квадратическое отклонение единичного измерения ординаты в спектре составляет 0,5 % шкалы прибора. Это приводит к средней квадратической ошибке в величине концентрации  $\text{CO}_2$ , определенной по спектру, около 0,7 % для единичного измерения и около 0,2 % для среднедневного значения, если за день зарегистрировано 16 спектров (запись 16 спектров на установке ИКАУ-1 длится около 1,5 ч).

### 4. СИСТЕМАТИЧЕСКАЯ ОШИБКА С МЕНЯЮЩЕЙСЯ ВЕЛИЧИНОЙ

Спектрофотометр UR-20, как и все двухлучевые спектрофотометры с механическим компенсационным элементом, перестает нормально функционировать в окрестности точки «ноль» шкалы пропусканий (так называемый мертвый ноль). Объясняется эта особенность следующим образом: компенсационная диафрагма (жестко связанная с пером самописца) регулирует величину потока радиации в сравнительном канале, уравнивая его с потоком в измерительном канале спектрофотометра; при отсутствии светового потока в измерительном канале эта диафрагма полностью закрывает сравнительный канал. В таком «нулевом» положении она движется под действием шумов системы случайным образом, так как в рассматриваемом случае в приборе отсутствуют световые потоки, управляющие движением диафрагмы. Если в такой ситуации диафрагма под действием шумов приоткроет сравнительный канал, то возникший сигнал разбаланса вернет ее обратно, к нулевому положению. Однако при движении диафрагмы в противоположном направлении управляющий сигнал не появляется, так как оба канала остаются закрытыми. Следовательно, при работе с приборами такого типа нельзя определять положение нуля шкалы путем перекрытия измерительного канала, поскольку в этом случае показания прибора становятся неопределенными. Величина этой неопределенности зависит от конструкции прибора и для UR-20 может достигать  $\pm 1$  % шкалы прибора.

Указанные трудности в установке начальной точки шкалы пропусканий в общем случае могут привести к сдвигу и растяжению (сжатию) этой шкалы, что вносит дополнительную погрешность в измеряемые значения ординат. Действие только растяжения

(сжатия) сводится к умножению всех получаемых ординат на постоянный множитель и, следовательно, на величину  $Q$ , представляющую собой отношение пропусканй, оно не влияет. Сдвиг же дает аддитивную добавку к измеренным ординатам, что приводит к изменению  $Q$ . Погрешность в среднем дневном значении концентрации  $\text{CO}_2$ , обусловленная сдвигом начала шкалы на 1 %, может достигать 3 %, при характерном масштабе записи спектра. Очевидно, что сдвиг будет влиять на  $Q$  тем сильнее, чем меньшие значения ординат входят в  $Q$ . Поэтому режим измерений необходимо выбирать таким, чтобы измеряемые ординаты были по возможности большими.

Рассмотрим подробнее совместное влияние сдвига и растяжения шкалы.

Показания прибора в несдвинутой и нерастянутой шкале можно представить в виде

$$P_{\text{изм}} = \frac{1}{f_0} P_{\text{ист}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{ист}}$  — действительное значение измеряемой ординаты;  $P_{\text{изм}}$  — соответствующий отсчет по шкале прибора;  $f_0$  — множитель, характеризующий нелинейность прибора.

Действие сдвига и растяжения на измеряемые ординаты можно описать выражением вида

$$P'_{\text{изм}} = \alpha (P_{\text{изм}} + \beta), \quad (3)$$

где  $P'_{\text{изм}}$  — отсчет прибора со сдвинуто-растянутой шкалой;  $\alpha$  и  $\beta$  — параметры, характеризующие соответственно растяжение и сдвиг этой шкалы.

Если записать  $P'_{\text{изм}}$  в виде

$$P'_{\text{изм}} = \frac{1}{f_1} P_{\text{ист}} \quad (4)$$

(где  $f_1$  — поправочный множитель, связывающий  $P_{\text{ист}}$  и  $P'_{\text{изм}}$ ), то из (2) — (4) можно выразить множитель  $f_1$  через известный поправочный множитель для несдвинутой и нерастянутой шкалы  $f_0$  и параметры  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$f_1 = f_0 \left( \frac{1}{\alpha} - \frac{\beta}{P_{\text{изм}}} \right). \quad (5)$$

Формула (5) позволяет ввести в результаты измерений поправки на ошибки установки шкалы, если известны значения  $\alpha$  и  $\beta$ . На рис. 2 б показан пример пересчета кривой нелинейности сдвинуто-растянутой шкалы к нормальной. С другой стороны, устранить влияние сдвига и растяжения шкалы можно путем применения специальной процедуры установки начальной и конечной точек шкалы, минимизирующей погрешности этой установки до значений, определяемых сходимостью показаний прибора.

В данной работе использован именно такой подход, для чего была разработана следующая процедура установки начала и конца шкалы:

— измерительный канал закрывается экраном и подключается однолучевое устройство, описанное выше (рис. 1);

— на калиброванном делителе выставляется коэффициент деления 1,00 и перо самописца прибора при помощи плавной регулировки  $R_4$  выставляется на деление 100 % шкалы пропусканий;

— затем на калиброванном делителе выставляется коэффициент деления 0,02, перо самописца при этом должно установиться на деление 2 % шкалы; если этого не происходит, то положение пара корректируют ручной установкой «0» самописца UR-20;

— предыдущие два пункта повторяют до тех пор, пока не будет достигнуто совпадение отсчетов по шкале пропусканий UR-20 и по шкале калиброванного делителя.

Начало шкалы выставляется по делению 2 %, так как это ближайшая к делению 0 % риска шкалы, и в ее окрестности UR-20 уже функционирует нормально.

Использование вышеописанной процедуры позволило снизить ошибку среднедневного значения концентрации из-за вышеуказанного фактора до 1 %.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании изложенных выше результатов исследования аппаратуры можно сделать следующие выводы:

а) суммарная погрешность, вносимая аппаратурой в результаты измерений ИСМ составляет около 1 % в среднедневном значении концентрации  $\text{CO}_2$  (при 16 единичных измерениях в день);

б) основной вклад в эту погрешность вносят ошибки установки начальной и конечной точек шкалы. Так как этой ошибкой обладают только двухлучевые спектрофотометры с механическим компенсационным элементом, то, очевидно, эти приборы не являются оптимальными для реализации ИСМ. Использование спектрофотометров, построенных на другом принципе (однолучевые с прямым усилением, двухлучевые с электронным делением), позволит снизить суммарную инструментальную погрешность определения концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере при помощи ИСМ.

В заключение авторы благодарят А. М. Броунштейна, К. В. Казакову и В. И. Привалова за большую практическую помощь и внимание к работе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Броунштейн А. М. Инфракрасная установка ИКАУ-1 для исследования спектральной прозрачности в области 2—25 мкм/А. М. Броунштейн, В. В. Демидов, И. Л. Сакин.— Труды ГГО, 1973, вып. 312.
2. Воробьев В. Г., Семенова Г. П. Воспроизводимость измерений на двухлучевых спектрофотометрах.—ОМП, 1976, № 9, с. 44—46.
3. Клименко П. Л., Ватулев В. Н. Метод градуировки фотометрической шкалы спектрофотометров.—ЖПС, 1973, т. 19, вып. 4, с. 706—709.
4. Оптический метод определения общего содержания  $\text{CO}_2$  в вертикальном столбе атмосферы/А. М. Броунштейн, Н. Н. Парамонова, А. Д. Фролов, А. А. Пашков.— Труды ГГО, 1976, вып. 369.
5. Kramer L., Spott S. Methoden zur Linearitätsprüfung von Ultrarot—Spectralphotometer UR-10. Abhandl. Dtsch. Akad. Wiss. Berlin, K 1. Phys. und Techn. 1964, N 6, s. 9—23.

*А. М. Шаламянский*

## **ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА ПО ДАННЫМ САМОЛЕТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ 1974—1977 гг.**

Для исследования детальной структуры поля озона, для выявления связей озона с аэросиноптическими условиями озонометрическая группа ГГО с 1958 г. использует результаты измерения общего содержания озона (ОСО) с самолета [1, 2, 6].

Достоинства самолетных измерений очевидны: они дают горизонтальный разрез поля ОСО за весьма короткий срок, распределение ОСО измеряется одним прибором, наблюдения на высоте полета практически исключают влияние селективности аэрозольного ослабления.

**Использованная аппаратура.** В 1971 г. самолетные озонометры были модернизированы [3]. Одним из основных элементов модернизации была установка фильтров ОФ-5, которая позволила значительно повысить точность измерений.

Цель полетов 1971—1977 гг. — используя модернизированные приборы, уточнить полученные ранее сведения о поле озона, провести сопоставление маршрутных разрезов ОСО не только с отдельными синоптическими образованиями, но и с положением воздушных масс.

**Организация наблюдений с самолета** в основном не изменилась по сравнению с ранее принятой [2]. Основная высота полета была  $3 \pm 0,3$  км. Серии наблюдений проводились через 10 мин полета. Каждая серия состояла из трех отсчетов по Солнцу через открытое окно самолета. Маршруты полетов выбирались так, чтобы они проходили под основными высотными синоптическими образованиями, наблюдающимися на территории СССР.

**Полученный материал.** Для анализа были отобраны данные измерений во время полетов 1974—1977 гг., поскольку они получены по одному прибору — модернизированному экспедиционному озонометру (ЭО) № 34, градуированному в 1974 г. Однородность всех выбранных данных обеспечивалась регулярным сравнением ЭО № 34 со спектрофотометром Добсона № 108 до и после полетов. В 1975 и 1976 гг. расхождения с эталоном не превышали 5 %.

В 1977 г. расхождения увеличились до 10 % и были введены поправки на основе сравнений во время полетов с контрольным инспекторским озонометром ГГО М-83 № 94. Было отобрано 65 дней наблюдений, т. е. все дни, когда протяженность маршрутов превышала 400 км. Для совместного анализа результатов самолетных измерений и данных озонометрических станций произвели сравнение величин содержания озона, измеренного с самолета на высоте 3 км при подлете к аэропорту, и содержания, измеренного тем же прибором после посадки в аэропорту. Сравнение показало, что существует постоянное различие между данными измерений на высоте 3 км и на уровне земли. Величина ОСО на высоте 3 км на 5—8 % меньше (в среднем на 0,020 атм-см), величины ОСО, измеренной с земли. Объясняется это, во-первых, тем, что измерения на высоте ведутся прибором, отградуированным на земле при наличии сильного аэрозольного ослабления, а в условиях полета аэрозольное ослабление мало, и, во-вторых, наличием озона в слое 0—3 км. Выявленное расхождение следует учитывать при совместном анализе самолетных и сетевых наблюдений.

**Сопоставление полученных разрезов ОСО и синоптической обстановки.** Все данные об ОСО по маршрутам полетов были нанесены на карты ГМЦ АТ<sub>300</sub>, АТ<sub>200</sub> и максимального ветра, ближайшие по времени к периоду наблюдений. Наблюдения подтвердили все отмеченные ранее при полетах особенности распределения озона: резкое изменение ОСО в области высотных фронтальных зон (ВФЗ), наилучшее совпадение ложбин и гребней поля озона соответственно с гребнями и ложбинами барического поля на уровне 300 мбар [6]. Особенностью, выявленной при рассмотрении полетов 1974—1977 гг., оказалась однородность поля ОСО на всей территории между полярной высотной фронтальной зоной (ПВФЗ) и субтропическим струйным течением (ССТ). При полетах с левой стороны ПВФЗ изменчивость ОСО была больше, но среднее содержание озона по всему маршруту оставалось практически неизменным.

Это позволило проводить дальнейший анализ при следующем предположении: согласно Пальмену и Ньютоу [4], ВФЗ (СТ) является разделом различных воздушных масс в верхней тропосфере, поэтому поле ОСО также можно разделить по этому же признаку. Раздельно рассматривались полеты в массе арктического воздуха (АВ) — слева от ПВФЗ, умеренного воздуха (УВ) — между ПВФЗ и ССТ и тропического воздуха (ТВ) — справа от ССТ. Отдельно были рассмотрены полеты в ВФЗ, которая определялась по карте максимального ветра как область, где скорость ветра превышает 25—30 м/с.

**Пространственная изменчивость поля ОСО.** Была поставлена задача определить пространственную изменчивость ОСО в каждой из перечисленных выше областей (АВ, ПВФЗ, УВ, ССТ, ТВ). Все маршруты были разделены соответственно областям, на каждом участке было рассчитано среднее значение озона  $\bar{\Omega}$ , среднее

квадратическое отклонение в каждой точке измерений от среднего значения озона и средний градиент ОСО на 100 км маршрута  $\Delta_{100}\bar{\Omega}$ .

Среднее квадратическое отклонение  $\sigma$  в точках, отстоящих друг от друга на 50 км (10 мин полета), рассчитывалось по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Omega_i - \bar{\Omega})^2}{n-1}}.$$

Градиент ОСО  $\Delta_{100}\bar{\Omega}$  находился с учетом того, что каждые 20 мин полета на Ил-14 соответствуют 100 км расстояния, тогда

$$\Delta_{100}\bar{\Omega} = \bar{\Omega}_t - \bar{\Omega}_{t+20},$$

где  $t$  — время измерений.

Для данного участка маршрута определялся средний градиент

$$\Delta_{100}\bar{\Omega} = \frac{\sum \Delta_{100}\bar{\Omega}}{n-2},$$

где  $n$  — число измерений на данном участке.

Результаты расчета  $\bar{\Omega}$ ,  $\sigma$  и  $\Delta_{100}\bar{\Omega}$  на каждом участке маршрута сведены в табл. 1. Рассмотрим их соответственно типам воздушных масс и ВФЗ.

**Арктический воздух** отличается повышенным содержанием озона. Даже в тех случаях, когда АВ проникает в южные районы  $\bar{\Omega} > 0,380$  атм-см. (Следует помнить, что все полеты проходили в весенний период.) Величина  $\sigma$  также может быть большой. (А2, А6, А8, А12 в табл. 1). Однако градиент озона при полетах во всех направлениях мал и не имеет определенного знака. (Положительным считался градиент в том случае, когда увеличение ОСО совпадало с увеличением высоты изобарической поверхности 300 мбар.) Отмечались отдельные случаи значительного повышения ОСО на отдельных участках, которые обычно совпадали с областью внутри замкнутой изогипсы (например, А1<sup>а</sup>, А1<sup>б</sup> в табл. 1). Но число таких случаев пока мало и не позволяет делать какие-либо определенные выводы. Например, на маршруте Хабаровск—Иркутск (А2, табл. 1) протяженностью около 2000 км  $\Delta_{100}\bar{\Omega} = 0,001$  атм-см, тогда как  $\sigma = 0,020$  атм-см.

**Умеренный воздух** имеет меньшую по сравнению с АВ величину и меньшую изменчивость. Так же как в АВ, в УВ не было замечено зависимости ОСО от широты или долготы, хотя полеты в этой области были достаточно продолжительны. Например, при полете по маршруту Печора—Актюбинск 27 апреля 1975 г. изменение широты достигало 13° (У2, табл. 1), градиент озона при этом был 0,001 см на 100 км.

**Тропический воздух.** Каких-либо выводов по материалам полетов об изменчивости поля ОСО в ТВ сделать нельзя. Лишь один раз удалось в весенний период осуществить достаточно протяженный полет в ТВ (Т1, табл. 1).

Таблица 1

## Изменчивость общего содержания озона в различных воздушных массах

| №                                                 | Дата     | Маршрут                                                 | Изменение    |              | Q                     | σ  | Δ <sub>100</sub> Q |
|---------------------------------------------------|----------|---------------------------------------------------------|--------------|--------------|-----------------------|----|--------------------|
|                                                   |          |                                                         | широты       | долготы      |                       |    |                    |
| Арктический воздух                                |          |                                                         |              |              |                       |    |                    |
| (Ложбина, циклон на карте АТ <sub>300</sub> )     |          |                                                         |              |              |                       |    |                    |
| 1974 г.                                           |          |                                                         |              |              |                       |    |                    |
| A1                                                | 18—21 IV | Хабаровск—Владивосток,<br>Южно-Сахалинск—<br>Николаевск | 43—49 °      | 133—143 °    | 470 (31) <sup>1</sup> | 11 | +2                 |
| A1 <sup>a</sup>                                   | 21 III   | Хабаровск                                               | 51—50        | 138—137      | 500 (4)               |    |                    |
| A1 <sup>b</sup>                                   | 22       | Хабаровск                                               | 49           | 135—133      | 535 (4)               |    |                    |
| A2                                                | 22       | Хабаровск—Иркутск                                       | 50—54        | 132—106      | 485 (36)              | 20 | —1                 |
| A3                                                | 24       | Иркутск—Красноярск                                      | 54—55        | 102—97       | 488 (7)               | 8  | +3                 |
| A4                                                | 30       | Караганда—Магнито-<br>горск—Горький                     | 54           | 58—49        | 431 (13)              | 12 | +1                 |
| 1975 г.                                           |          |                                                         |              |              |                       |    |                    |
| A5                                                | 21 V     | Омск—Тобольск—<br>Свердловск                            | 55—58—<br>57 | 72—62        | 411 (15)              | 7  | +2                 |
| 1976 г.                                           |          |                                                         |              |              |                       |    |                    |
| A6                                                | 20 III   | Таллин—Киров                                            | 59           | 25—49        | 386 (27)              | 23 | —2                 |
| A7                                                | 23       | Киев—Львов                                              | 50           | 31—24        | 409 (11)              | 19 | —6                 |
| A8                                                | 20 IV    | Печора—Амдерма                                          | 65—69        | 57—59        | 476 (12)              | 29 | —7                 |
| A9                                                | 21       | Печора—Амдерма—<br>Печора                               | 66—70—<br>66 | 58—60—<br>58 | 466 (23)              | 13 | +2                 |
| A10                                               | 22       | Сыктывкар—Печора                                        | 62—66        | 51—59        | 407 (11)              | 14 | +1                 |
| A11                                               | 23       | Амдерма—Ленинград                                       | 70—66        | 60—31        | 422 (35)              | 18 | +1                 |
| 1977 г.                                           |          |                                                         |              |              |                       |    |                    |
| A12                                               | 24 IV    | Караганда—Павлодар—<br>Фрунзе                           | 52—44        | 73—82        | 393 (35)              | 27 | —3                 |
| A13                                               | 6 V      | Печора—Тобольск                                         | 65—59        | 60—68        | 454 (17)              | 18 | +3                 |
| A14                                               | 21       | Ленинград—Кировск                                       | 64—67        | 34—33        | 397 (8)               | 9  | +4                 |
| A15                                               | 22       | Кировск—Сыктывкар                                       | 67—63        | 35—47        | 371 (10)              | 13 | +5                 |
| A16                                               | 29       | Симферополь—Минск                                       | 47—54        | 35—28        | 381 (18)              | 13 | +1                 |
| Умеренный воздух                                  |          |                                                         |              |              |                       |    |                    |
| (Гребень, антициклон на карте АТ <sub>300</sub> ) |          |                                                         |              |              |                       |    |                    |
| 1975 г.                                           |          |                                                         |              |              |                       |    |                    |
| У1                                                | 26 IV    | Ленинград—Печора                                        | 60—65        | 32—39        | 338 (13)              | 11 | —3                 |
| У2                                                | 27       | Печора—Актюбинск                                        | 65—52        | 50—58        | 332 (29)              | 9  | —1                 |
| У3                                                | 28       | Актюбинск—Аральск—<br>Астрахань                         | 50—44        | 58—62—<br>58 | 308 (14)              | 11 | 0                  |
| У4                                                | 15 V     | Пенза—Ташкент                                           | 52—43        | 50—65        | 339 (27)              | 11 | —1                 |
| У5                                                | 20       | Самарканд—Джезказ-<br>ган                               | 40—50        | 68—71        | 347 (28)              | 12 | +1                 |

<sup>1</sup> В скобках указано количество серий наблюдений.

| №   | Дата | Маршрут             | Изменение |         | Σ        | σ  | Δ <sub>100</sub> g |
|-----|------|---------------------|-----------|---------|----------|----|--------------------|
|     |      |                     | широты    | долготы |          |    |                    |
| У6  | 22 V | Златоуст—Актюбинск  | 54—48 °   | 52—60 ° | 364 (27) | 11 | —2                 |
| У7  | 26   | Вильнюс—Симферополь | 51—46     | 31—35   | 313 (9)  | 5  | 0                  |
| У8  | 28   | Симферополь—Пенза   | 46—51     | 35—37   | 327 (9)  | 6  | +3                 |
| У9  | 29   | Пенза—Краснодар     | 51—46     | 37—41   | 329 (14) | 12 | —4                 |
| У10 | 31   | Симферополь—Минск   | 45—50     | 35—29   | 305 (14) | 7  | 0                  |

1976 г.

|     |        |                             |              |       |          |    |    |
|-----|--------|-----------------------------|--------------|-------|----------|----|----|
| У11 | 15 III | Волгоград—Нукус             | 48—44        | 45—59 | 357 (26) | 8  | —1 |
| У12 | 16     | Самарканд—Челябинск         | 40—55        | 68—61 | 340 (31) | 14 | +3 |
| У13 | 17     | Челябинск—Киров—<br>Саратов | 56—58—<br>53 | 61—45 | 304 (21) | 12 | +4 |
| У14 | 27     | Горький—Краснодар           | 56—45        | 45—42 | 355 (25) | 16 | —1 |

1977 г.

|     |       |                     |       |              |          |    |    |
|-----|-------|---------------------|-------|--------------|----------|----|----|
| У15 | 27 IV | Ашхабад—Баку—Ереван | 38—42 | 58—45        | 338 (21) | 11 | +6 |
| У16 | 29    | Сухуми—Вильнюс      | 44—53 | 40—29        | 338 (25) | 12 | —2 |
| У17 | 30    | Вильнюс—Ленинград   | 54—56 | 26—27        | 328 (9)  | 4  | +1 |
| У18 | 3 V   | Ленинград—Вильнюс   | 59—56 | 28—25        | 354 (10) | 7  | —2 |
| У19 | 4     | Вильнюс—Ленинград   | 55—60 | 25—32        | 344 (15) | 5  | +2 |
| У20 | 10    | Ташкент—Актюбинск   | 42—49 | 70—59        | 322 (19) | 10 | +1 |
| У21 | 11    | Актюбинск—Пенза     | 50—53 | 56—46        | 344 (15) | 20 | —2 |
| У22 | 12    | Пенза—Гурьев        | 53—47 | 46—50        | 343 (14) | 9  | +6 |
| У23 | 23    | Ижевск—Кустанай     | 55—53 | 55—63        | 356 (11) | 8  | +1 |
| У24 | 26    | Караганда—Самарканд | 49—41 | 74—77—<br>69 | 332 (36) | 17 | —2 |

#### Тропический воздух

|    |      |                            |       |       |          |   |    |
|----|------|----------------------------|-------|-------|----------|---|----|
| Т1 | 27 V | Самарканд—Красно-<br>водск | 39—38 | 64—55 | 311 (17) | 6 | +1 |
|----|------|----------------------------|-------|-------|----------|---|----|

#### а) Субтропическое струйное течение

1975 г.

|    |      |                    |       |       |          |    |    |
|----|------|--------------------|-------|-------|----------|----|----|
| Ф1 | 18 V | Алма-Ата—Самарканд | 44—40 | 76—67 | 319 (18) | 26 | —8 |
| Ф2 | 22   | Актюбинск—Ашхабад  | 47—38 | 60—59 | 328 (21) | 25 | —8 |
| Ф3 | 23   | Ашхабад—Астрахань  | 39—43 | 57—51 | 293 (13) | 15 | —6 |

1977 г.

|    |       |                    |       |       |          |    |    |
|----|-------|--------------------|-------|-------|----------|----|----|
| Ф4 | 26 IV | Алма-Ата—Бухара    | 44—71 | 74—68 | 350 (11) | 21 | —9 |
| Ф5 | 28    | Ереван—Симферополь | 41—45 | 45—34 | 341 (15) | 30 | —9 |

#### б) Полярная высотная фронтальная зона

1974 г.

|    |        |                      |       |       |          |    |    |
|----|--------|----------------------|-------|-------|----------|----|----|
| Ф6 | 15 III | Новосибирск—Иркутск  | 55    | 84—94 | 420 (10) | 16 | —8 |
| Ф7 | 30     | Магнитогорск—Горький | 54—56 | 48—44 | 405 (7)  | 6  | —7 |

| № | Дата | Маршрут | Изменение |         | $\bar{\Omega}$ | $\sigma$ | $\Delta_{100}^{\Omega}$ |
|---|------|---------|-----------|---------|----------------|----------|-------------------------|
|   |      |         | широты    | долготы |                |          |                         |

1975 г.

|     |       |                     |         |              |          |    |    |
|-----|-------|---------------------|---------|--------------|----------|----|----|
| Ф8  | 29 IV | Пенза—Ленинград     | 56—59 ° | 45—32 °      | 338 (10) | 12 | —7 |
| Ф9  | 17 V  | Новосибирск—Барнаул | 56—53   | 55—56—<br>53 | 395 (16) | 14 | 0  |
| Ф10 | 20    | Джезказган—Омск     | 50—55   | 71—73        | 379      | 8  | —6 |
| Ф11 | 21    | Свердловск—Уральск  | 56—52   | 59—52        | 391 (13) | 15 | —5 |
| Ф12 | 28    | Симферополь—Пенза   | 51—55   | 37—44        | 348 (16) | 11 | —5 |

1976 г.

|     |        |                            |       |       |          |    |     |
|-----|--------|----------------------------|-------|-------|----------|----|-----|
| Ф13 | 21 III | Киров—Саратов              | 57—51 | 51—47 | 378 (13) | 18 | —10 |
| Ф14 | 21     | Саратов—Адлер              | 49—44 | 43—31 | 362 (15) | 16 | +7  |
| Ф15 | 24     | Львов—Москва               | 30—54 | 25—35 | 370 (12) | 14 | —6  |
| Ф16 | 24 V   | Москва—Рига                | 55—57 | 34—24 |          | 32 | —15 |
| Ф17 | 26 III | Тихвин—Вологда             | 59    | 30—38 | 377 (7)  | 22 | —8  |
| Ф18 | 28     | Краснодар—Вильнюс          | 48—53 | 37—27 | 374 (19) | 29 | —9  |
| Ф19 | 13 IV  | Петрозаводск—Нарьян<br>Мар | 62—68 | 36—53 | 382      | 17 | —5  |
| Ф20 | 18     | Мурманск—Архангельск       | 67—66 | 34—39 | 452      | 21 | —21 |
| Ф21 | 19     | Печора—мыс Каменный        | 65—68 | 53—70 | 398      | 22 | —10 |
| Ф22 | 20     | Амдерма—п-в Ямал           | 69—71 | 60—70 | 431 (7)  | 24 | —17 |
| Ф23 | 22     | Печора—мыс Каменный        | 66—68 | 60—69 | 456 (11) | 23 | —12 |

1977 г.

|     |     |                   |       |       |          |    |    |
|-----|-----|-------------------|-------|-------|----------|----|----|
| Ф24 | 4 V | Ленинград—Котлас  | 60—64 | 33—45 | 385 (16) | 18 | —6 |
| Ф25 | 5   | Котлас—Печора     | 62—70 | 49—62 | 433 (14) | 14 | —6 |
| Ф26 | 7   | Омск—Ташкент      | 54—45 | 72—74 | 421 (—)  | 16 | —6 |
| Ф27 | 20  | Ленинград—Вильнюс | 59—56 | 28—26 | 356 (8)  | 14 | —6 |
| Ф28 | 21  | Вильнюс—Ленинград | 59—56 | 26—29 | 366 (13) | 22 | —9 |

**Высотные фронтальные зоны** отличаются значениями  $\bar{\Omega}$ , промежуточными между значениями характерными для масс, разделенных ВФЗ. Значение  $\Delta_{100}^{\Omega}$  доходит до 0,021 атм-см на 100 км маршрута. Знак градиента всегда отрицателен. Наблюдения показывают, что содержание озона во фронтальной зоне изменяется монотонно и всегда уменьшается при перелете от левой к правой стороне ВФЗ. Экстремумов на кривой изменения ОСО при полете под ВФЗ не наблюдалось, если не считать разброса значений ОСО, не превышающего случайной погрешности измерений.

Об изменении ОСО при полетах в различных воздушных массах можно судить по рис. 1 (полет в массе АВ) и рис. 2 (УВ). Типичный ступенчатый характер изменения озона по маршруту показан на рис. 3, где приведен разрез поля озона за 21—22 мая 1975 г. Полученный материал говорит о наличии более мелких деталей поля. Например, отмечается повышение (понижение) величины ОСО в областях с замкнутыми изогипсами, характерная

волнообразная структура поля ОСО и т. д. В данной работе были рассмотрены лишь те особенности, которые казались самыми значительными, наиболее общими, характерными для всего поля ОСО.

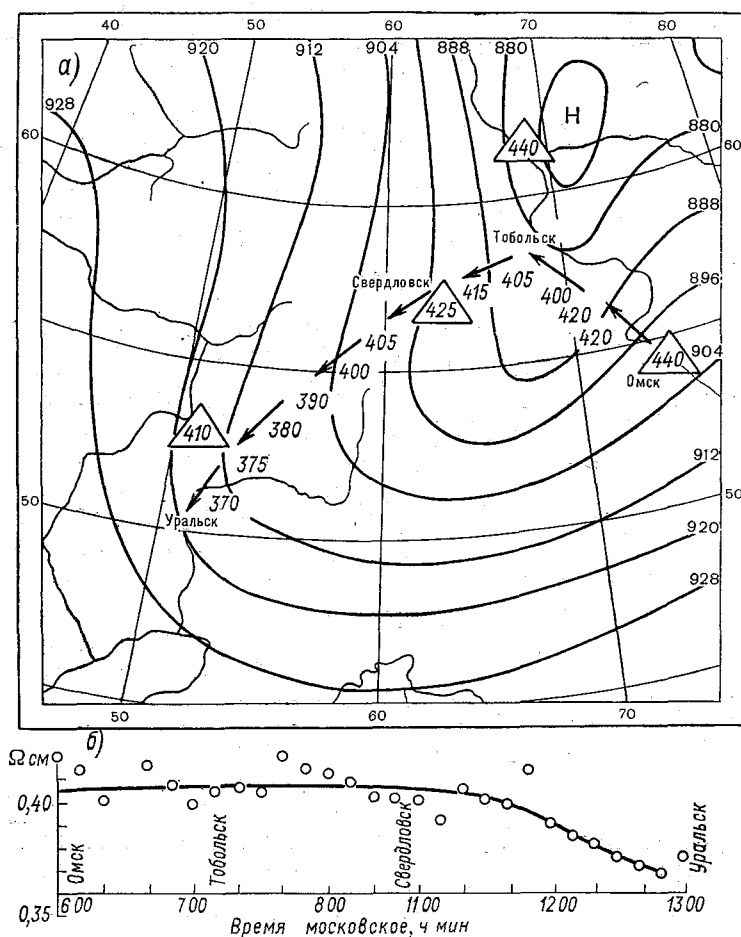


Рис. 1. Абсолютная топография поверхности 300 мбар за 15 ч московского времени 21 мая 1975 г. (стрелками указан маршрут полета) (а) и общее содержание озона по маршруту Омск—Тобольск—Свердловск—Уральск (б).

Таковыми наиболее характерными особенностями поля ОСО являются:

- 1) примерно постоянное значение ОСО при полетах в одной воздушной массе;
- 2) резкое изменение содержания озона в ВФЗ (СТ), которое всегда уменьшается от левой к правой стороне ВФЗ.

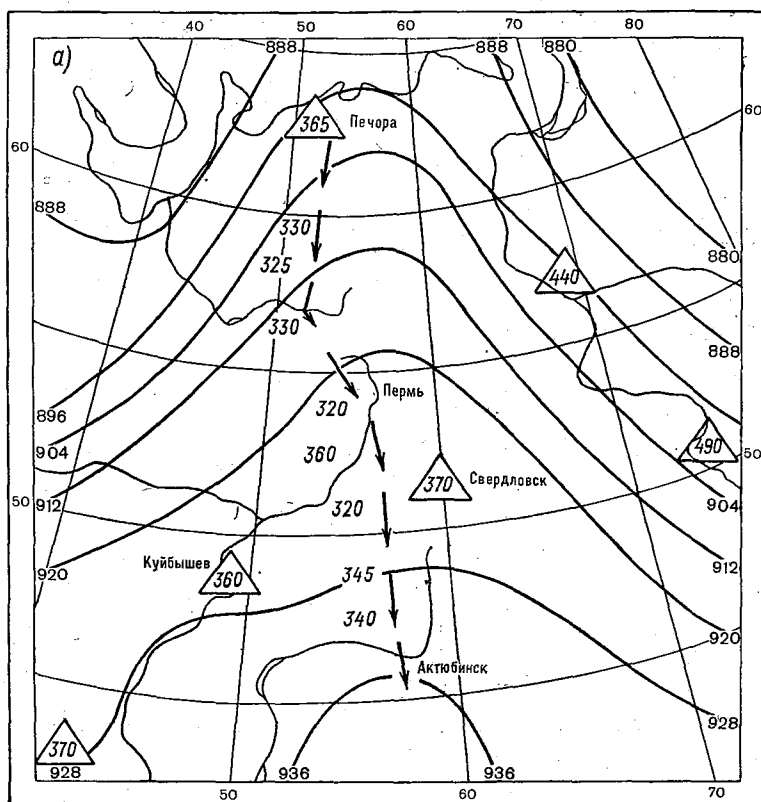


Рис. 2. Абсолютная топография поверхности 300 мбар за 15 ч московского времени 27 апреля 1975 г. (а) и общее содержание озона 26 апреля 1975 г. по маршруту Печора—Пермь—Актюбинск (б).

Стрелками указан маршрут полета; в треугольниках данные озонметрических станций.

Следовательно, мгновенное широтное распределение ОСО (меридиональный разрез) имеет не плавный, а ступенчатый характер.

Возможное объяснение этого явления предложено А. Х. Хргианом «... 1. Либо можно считать, что СТ отмечает собой границу полярного (или арктического) воздуха и тропического воздуха, содержащих соответственно много и мало озона. Тогда оно служит как бы барьером, разделяющим различные воздушные массы, а с нами и озон... Это значит, что воздушные массы разного

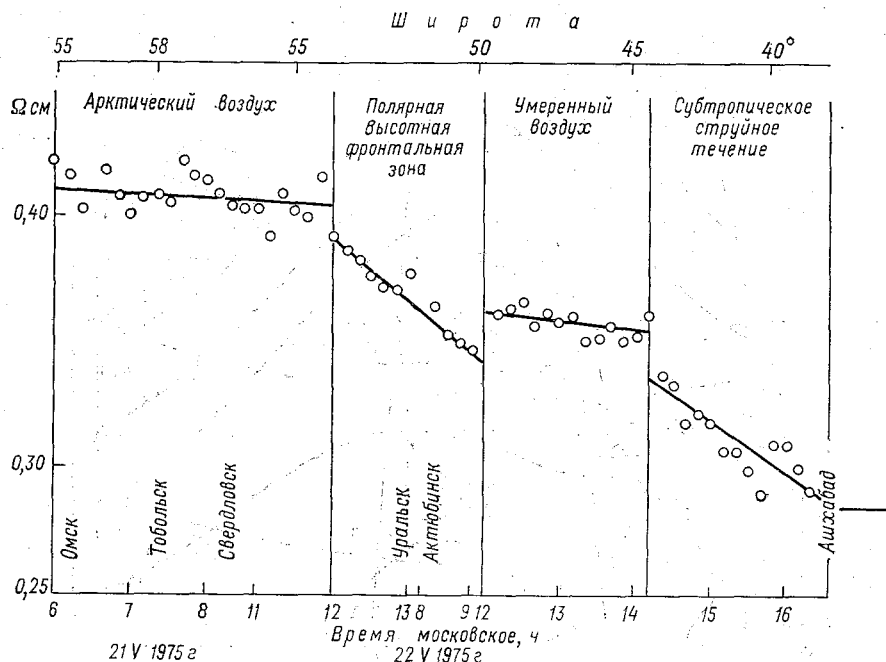


Рис. 3. Распределение общего содержания озона по маршруту Омск—Тобольск—Свердловск—Уральск. 21 мая 1975 г. и по маршруту Актюбинск—Ашхабад 22 мая 1975 г. Измерения с самолета, ЭО № 34.

происхождения разграничены не только в тропосфере, но и в стратосфере. 2. Либо мы предположим, что вокруг СТ имеется спиралевидное движение воздуха, восходящее с антициклонической стороны и нисходящее с циклонической» [5].

Полученные при полетах результаты говорят в пользу первого предположения. Вся «предыстория» озона, приводящая к тому или иному содержанию озона, связана с образованием и разрушением в «своей» воздушной массе, по-видимому, обладающей присущими ей свойствами как во всей тропосфере, так и в стратосфере (по крайней мере в нижней).

Изменение содержания озона в определенной массе должно быть связано с ее трансформацией. Мгновенное значение ОСО над

определенным пунктом зависит от того, какая масса над ним предполагается, а годовой ход есть функция частоты появления тех или иных масс над этим пунктом. Теми же причинами определяется и широтный ход ОСО.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гушин Г. П. Измерение общего содержания атмосферного озона во время горизонтальных полетов/Г. П. Гушин, Р. Г. Романова, К. И. Ромашкина.— Труды ГГО, 1961, вып. 106.
2. Гушин Г. П. Исследование атмосферного озона.— Л.: Гидрометеиздат, 1963.
3. Гушин Г. П. Опыт измерения общего содержания озона модернизированным озонометром М-83 в Воейково в 1971—1974 гг./Г. П. Гушин, К. И. Ромашкина, А. М. Шаламянский.— Труды ГГО, 1976, вып. 357, с. 106—120.
4. Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы.— Л.: Гидрометеиздат, 1973.— 615 с.
5. Хргиан А. Х. Физика атмосферного озона.— Л.: Гидрометеиздат, 1973.— 291 с.
6. Шаламянский А. М., Иванова Г. Ф. Некоторые результаты измерений общего содержания атмосферного озона во время научно-исследовательских полетов 1960—1970 гг.— Труды ГГО, 1973, вып. 312, с. 142—149.

# СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Е. П. Барашкова. Об изменчивости радиационной температуры подстилающей поверхности . . . . .                                                                                                                      | 3   |
| В. И. Горышин. Об определении «метеорологическая дальность видимости» и ее измерениях на сети станций . . . . .                                                                                                   | 15  |
| В. И. Горышин. О стандартизации некоторых параметров при инструментальных измерениях дальности видимости . . . . .                                                                                                | 24  |
| Г. П. Гуцин, П. А. Александров, Е. Т. Васильева. Спектральные характеристики аэрозольного помутнения атмосферы в Ленинграде и его пригороде . . . . .                                                             | 31  |
| Г. П. Гуцин, М. П. Жукова, С. А. Соколенко. Расчет ослабления света аэрозольным слоем атмосферы в ультрафиолетовой области спектра . . . . .                                                                      | 37  |
| Г. П. Гуцин, Т. Д. Жуковская, И. И. Штефка. Устройство электропитания прибора М-83 от сети переменного тока . . . . .                                                                                             | 47  |
| Г. П. Гуцин, Т. А. Павлюченкова. О дневном ходе аэрозольного помутнения атмосферы . . . . .                                                                                                                       | 52  |
| Г. П. Гуцин, Т. А. Павлюченкова, П. А. Александров. Оптические характеристики перистых облаков . . . . .                                                                                                          | 59  |
| С. И. Зачек. Расчет светофильтров к термоэлектрическим приемникам излучения для измерения естественной освещенности . . . . .                                                                                     | 71  |
| С. И. Зачек, Ю. Д. Горбенко, Д. А. Тайц, Л. В. Луцко. Методика расчета электрических схем температурной компенсации приемников излучения, выполненных на полупроводниковых термоэлектрических элементах . . . . . | 79  |
| В. М. Игнатенко, В. А. Ковалев, Е. Е. Рыбаков. Влияние инструментальных погрешностей на точность лидарного определения прозрачности атмосферы . . . . .                                                           | 89  |
| В. А. Ковалев, А. Г. Кузьмин. Вопросы оценки достоверности априорных допущений при решении уравнения лазерной локации . . . . .                                                                                   | 100 |
| Е. Л. Махоткина. О распределении чувствительности по приемной поверхности пиранометра . . . . .                                                                                                                   | 105 |
| Н. Н. Парамонова, А. М. Броунштейн. О непрерывном ослаблении солнечной радиации в ИК окнах прозрачности атмосферы . . . . .                                                                                       | 110 |
| Е. В. Фабер, А. А. Шашков. Влияние аппаратных погрешностей на результаты измерений атмосферного $\text{CO}_2$ интегральным спектроскопическим методом . . . . .                                                   | 120 |
| А. М. Шаламянский. Горизонтальное распределение общего содержания озона по данным самолетных измерений 1974—1977 гг. . . . .                                                                                      | 126 |

ТРУДЫ ГГО, ВЫП. 419

## Актинометрия, атмосферная оптика и озонометрия

Редактор Л. В. Царькова. Техн. редактор Т. В. Павлова. Корректор Г. С. Макарова.

Сдано в набор 16.05.79. Подписано в печать 07.01.80. М-23206. Формат  $60 \times 90^{1/16}$ . Бум. тип. № 1. Лит. гарн. Печать высокая. Печ. л. 9,5. Уч.-изд. л. 9,73. Тираж 610 экз. Индекс МЛ-108. Заказ 432. Цена 70 коп. Заказное.

Гидрометеиздат. 199053, Ленинград, 2-я линия, д. 23.

Ленинградская типография № 8 ЛПО «Техническая книга» Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 190000, Ленинград, Прачечный пер., 6.