

Т Р У Д Ы  
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ  
ОБСЕРВАТОРИИ

имени А. И. Воейкова

ВЫПУСК 152

ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Под редакцией  
д-ра физ.-мат. наук  
проф. К. С. ШИФРИНА  
и канд. геогр. наук  
В. Л. ГАЕВСКОГО

Б И Б Л И О Т Е К А  
Ленинградского  
Гидрометеорологического  
Института



ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

ЛЕНИНГРАД • 1964

### *АННОТАЦИЯ*

В сборнике представлены работы по исследованию радиационных процессов в атмосфере, выполненные в 1961—1962 гг.

Кроме того, публикуются работы по рассеянию и поглощению света в атмосфере, отраженного от поверхности моря, экспериментальные исследования по оптике атмосферы, методические и климатологические работы в области радиации.

Сборник рассчитан на научных работников и инженеров, работающих в области физики атмосферы, физической оптики и смежных дисциплин.

## ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТОДОМ МАЛЫХ УГЛОВ

Рассматриваются результаты испытаний макета полевого прибора для измерения микроструктуры туманов методом малых углов.

### Введение

Макет полевого прибора для измерения спектра размеров капель тумана [1] испытывался: 1) в лабораторных условиях с калиброванными моделями золя из сферических частиц метилметакрилата, 2) в искусственных туманах в камере Высокогорного геофизического института (Нальчик—Терскол) и 3) в естественных туманах (Воейково). В статье рассматриваются результаты этих испытаний, а также вопрос о точности и границах применимости метода малых углов.

### Лабораторные испытания прибора

Измерения производились с заранее прокалиброванным золем. Использовались порошки метилметакрилата АКР-100, состоящие из сферических прозрачных частиц, в виде плоских моделей — монослой частиц на поверхности стеклянной пластинки — и в виде объемных моделей — частицы порошка, взвешенные в кювете с дистиллированной водой при непрерывном размешивании (модель тумана).

Микроструктура порошков АКР-100 изучалась методом прямого подсчета под микроскопом и микрофотографированием. Данные различных проб суммировались для получения осредненных спектров  $\bar{f}(a)$  для каждой фракции АКР-100.

При отборе навесок для плоских и объемных моделей возможна сепарация частиц по размерам (спектр отдельной модели может отличаться от осредненного спектра данной фракции АКР-100). По этой причине в плоских моделях приходилось производить микрофотографическое изучение спектра каждой модели, а в объемных — дополнительное уточнение спектра, измеряя пропускание света в направлении  $\beta=0$  при осаждении взмученных частиц порошка. Осаждение производилось в кювете высотой  $h=550$  мм в течение  $t=30 \div 35$  мин. При этом изменение прозрачности суспензии регистрировалось фотометром. Из сопоставлений кривой изменения прозрачности с данными расчетов скорости оседания сферических частиц из суспензии по закону Стокса вычислялось распределение сферических частиц по размерам [2—4].

Плоские модели. Методика работы с плоскими моделями калиброванного золя подробно описана в [5].

Для устранения пространственной неоднородности образца приходилось либо вращать образец, либо производить измерения углового

распределения рассеянного света  $I(\beta)$  вдоль нескольких диаметров в фокальной плоскости объектива приемника света и брать среднее значение  $\overline{I(\beta)}$ .

На рис. 1 а, б представлены типичные спектры  $f(a)$  плоских моделей двух фракций порошков метилметакрилата, сопоставленные со спектрами, подсчитанными микрофотографическим методом.

Исследования с плоскими моделями показали, что большая устойчивость этих моделей во времени делает их полезными для текущей проверки прибора и фотометра. В случае если имеется несколько фракций порошка АКР-100 (мелкие, средние, крупные) с хорошо изученным осредненным спектром  $\overline{f(a)}$ , плоские модели становятся легковоспроизводимыми. С помощью таких фракций удобно производить проверку качества работы прибора с мелкими, средними и крупными частицами.

**Объемные модели.** Навеска порошка с известным спектром частиц  $\overline{f(a)}$  опускается в дистиллированную воду, находящуюся в кювете с двумя плоско-параллельными стеклами для входа и выхода пучков света. Вся суспензия непрерывно размешивается мешалкой, приводимой в движение вибратором (радиодинамик, приводимый в действие генератором звуковой частоты, с лопаточкой, прикрепленной к диффузору, или электромотором с крыльчаткой), для предотвращения оседания частиц. Получается устойчивая объемная модель тумана с известным спектром.

При измерениях спектра  $f(a)$  дифракционным структуромером в случае частиц, взвешенных в среде с показателем преломления, отличным от показателя преломления окружающего воздуха, учитывалось изменение угла рассеяния  $\beta$  при выходе лучей из кюветы в воздух

$$\beta = \frac{r}{fn_{\text{ж}}}, \quad (1)$$

где  $r$  — перемещение диафрагмы приемника света [1],  $n_{\text{ж}}$  — показатель преломления воды,  $f$  — фокусное расстояние линзы приемника света [1].

На рис. 1 в представлены спектры объемных моделей АКР-100, полученные методом малых углов и микрофотографированием. На рис. 1 в левая ветвь  $f(a)$  показывает значительную потерю мелких частиц из-за явления флотации: при недостаточно заполненной кювете происходит захват мелких частиц пузырьками воздуха при работе размешивателя и фиксация этих частиц пеной, образующейся на поверхности воды.

Эффект захвата малых частиц удалось устранить изменением конструкции размешивателя (вибратор вместо вращающейся мешалки) и закрыванием кюветы крышкой так, чтобы между крышкой и поверхностью воды не оставалось пузырей воздуха.

Измерения с моделями. Основной задачей работы с калиброванным золем была оценка точности измерения спектра  $f(a)$  прибором.

Ряд образцов золя с известным по микрофотографиям спектром многократно исследовался методом малых углов. Результаты для одного из таких образцов представлены на рис. 2. Здесь ступенчатая кривая — спектр образца, полученный микрофотографически, две сплошные линии ограничивают область возможного разброса точек  $f(a)$  для пяти последовательных измерений  $I(\beta)$ .

Подобные сравнения производились с тремя видами распределений  $f(a)$  с максимумами при  $a$ , равном 6, 15, 25 мк. Как и предполагалось, лучше всего воспроизводятся ординаты спектра  $f(a)$ , лежащие вблизи

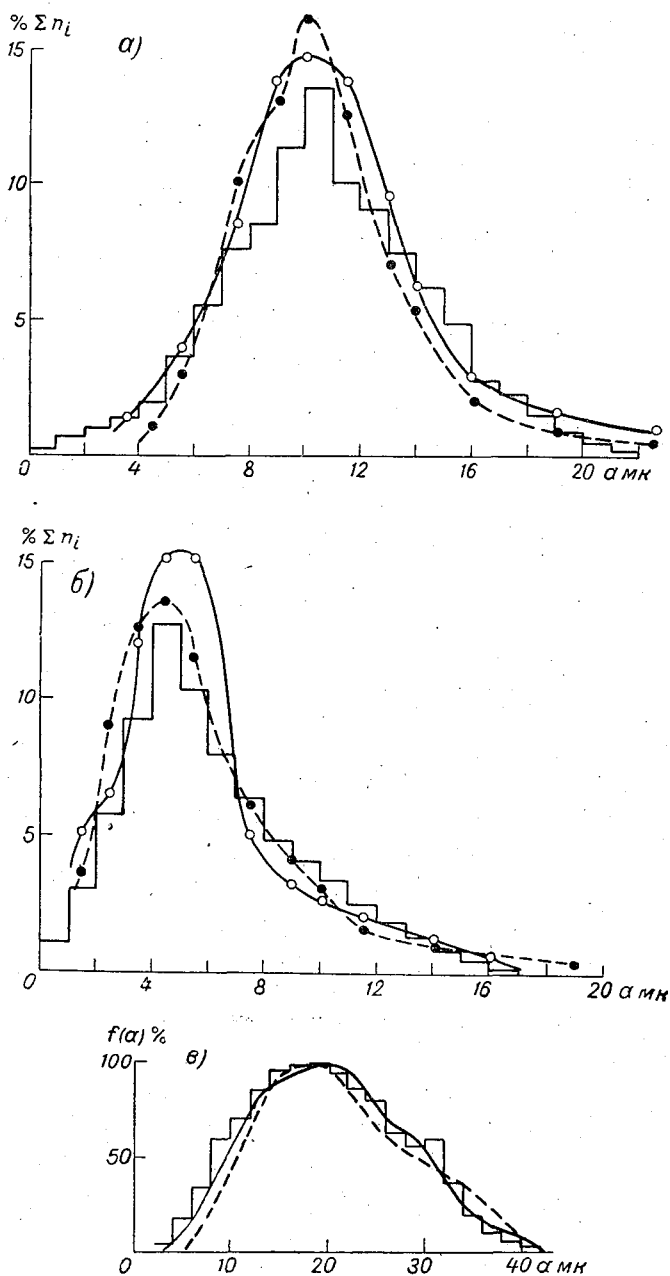


Рис. 1. Спектры размеров сферических частиц метилметакрилата.

*a*, *б* — плоские модели, *в* — объемные модели. Ступенчатые кривые получены микрофотографическим методом, сплошные — дифракционным структуромером.

$f_{\max}(a)$  — до  $\pm 5-10\%$  от  $f_{\max}(a)$ . Вблизи оснований спектров, ниже  $0,25 f_{\max}(a)$ , воспроизводимость падает до  $\pm 25-35\%$ .

Точность воспроизведения  $f(a)$  определяется точностью фотометрирования и точностью обработки  $I(\beta)$ .

Точность фотометрирования определялась с помощью специальной проверки фотометра с калиброванным источником света на фотометрической скамье. Она оказалась равной  $4-8\%$  для шкал фотометра  $10^{-3}-10^{-8}$  лм.

Наличие калиброванных фракций порошков АКР-100 дает возможность производить проверку работы фотометра в любое время.

При сопоставлении спектров  $f(a)$  нужно иметь в пробах и в освещенном объеме число капель, достаточное для статистического заполнения спектра  $f(a)$ .

В пробах обычно подсчитывалось  $1500-3000$  частиц, а освещенный объем выбирался с учетом того, чтобы в нем также находилось  $1500-3000$  капель [1].

При сопоставлении относительных спектров  $f(a)$ , полученных разными методами, мы пользовались нормировкой по  $f_{\max}(a)$ , а также по общему числу частиц. По первому способу сопоставлялись в основном спектры плоских моделей в 1957—1958 гг. [5].

Второй способ заключался в следующем. Подсчитывалось общее число частиц  $N$  от  $a_{\min}$  до  $a_{\max}$ , которое принималось за  $100\%$ . Отсюда

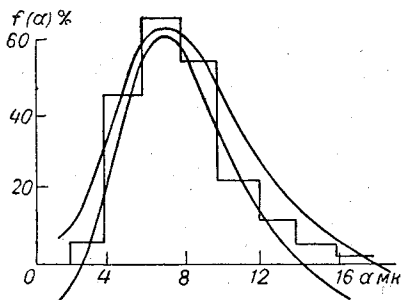


Рис. 2. Воспроизводимость спектра  $f(a)$  для одной и той же плоской модели при повторных измерениях освещенности под малыми углами рассеяния.

вычислялась кривая процентной повторяемости  $f(a)$ .

При работе с поточными ловушками обычно известно общее число частиц  $N$ . Однако спектры  $f(a)$  по дифракционному структуромеру были получены в относительных единицах.

Поэтому сопоставление таких спектров производилось по площади под кривыми  $S$ , пропорциональной  $N$ . Спектры  $f_{\text{пр}}(a)$ , полученные прибором, и  $f_{\text{лов}}(a)$ , полученные ловушками, строились в таком масштабе, при котором площади под сопоставляемыми кривыми  $f(a)$  были одинаковыми для обоих методов. Это означает, что число частиц, исследованных ловушкой, равно числу частиц, исследованных прибором. В случае если  $N \geq 1500-3000$ , такое допущение справедливо, тем более что фактически  $N_{\text{пр}} \gg N_{\text{лов}}$  [1].

Все относительные спектры  $f(a)$  по дифракционному структуромеру построены в одном и том же масштабе и сравнимы друг с другом (при обработке  $I(\beta)$  произведена световая нормировка по пропусканию) [1].

Эти замечания следует иметь в виду при обсуждении результатов испытаний прибора в искусственных и естественных туманах.

### Испытания прибора в камере туманов Высокогорного геофизического института (ВГИ)

В октябре 1960 г. производились измерения спектров капель в туманах парения в камере Эльбрусской экспедиции ВГИ. Распределение капель по прибору сравнивалось с данными одновременных измерений поточными ловушками.

Туман в камере образовывался при выпуске в камеру объемом около 500 м<sup>3</sup> пара под давлением 2—3 атм. Полное время жизни тумана составляло 30—40 мин.

Прибор и ловушка располагались поблизости друг от друга в центре камеры. Забор проб ловушками осуществлялся при записи распределения рассеянного света  $I(\beta)$  примерно в середине интервала времени, необходимого для записи  $I(\beta)$  на углах 0—12° [1]. В ряде случаев пробы брались ловушками в течение всего цикла записи  $I(\beta)$ , а также при повторных записях  $I(\beta)$  в течение 30—35 мин., т. е. вплоть до рассеяния тумана. Эти вариации режимов работы ловушек производились,

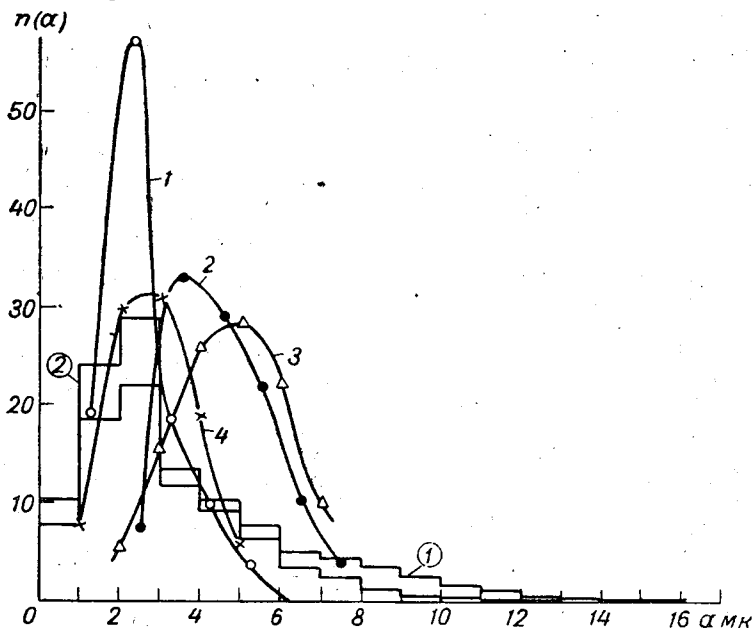


Рис. 3. Сопоставление спектров размеров капель по дифракционному структуромеру и поточным ловушкам.

во-первых, для выбора оптимальных условий сравнения спектров по прибору и по ловушкам, обладающим различным временем сбора информации, во-вторых, для исключения влияния колебаний микроструктуры тумана (неоднородность во времени и в объеме была заметной), в-третьих, для изучения изменения микроструктуры тумана от начала его образования до рассеяния.

Результаты измерений представлены на рис. 3. Здесь показаны спектры ловушек и дифракционного структуромера по отдельным циклам тумана. По оси ординат отложена повторяемость радиусов капель в процентах. Последовательность измерений спектров  $f(a)$  по прибору и по ловушкам отмечена цифрами.

При подсчете капель, сфотографированных на пленку, было использовано специальное счетное устройство (увеличитель с контактной гребенкой и экраном), разработанное в Высокогорном геофизическом институте.

По количеству капель сравнивались только одновременно измеренные спектры  $f(a)$  по ловушкам и по прибору. Так как истинное значение  $\sum n_i = N$  по прибору за время измерений неизвестно [снимались относительные распределения  $I(\beta)$ ], спектры  $f(a)$  по прибору строились на графиках сравнения в предположении, что общее число частиц  $N_{\text{лов}}$ ,

сосчитанных по микрофотографиям за цикл работы ловушки, равно общему числу частиц  $N_{\text{пр}}$ , исследованных прибором за время измерений  $I(\beta)$  во всем интервале углов рассеяния  $\beta = 0 \div 12^\circ$ .

Полное время измерения спектра  $f(a)$  с помощью поточной ловушки при экспозициях 0,1 сек. составляло около 1 мин., полное время записи  $I(\beta)$  в интервале углов  $0-12^\circ$  — около 2,5 мин. Ловушки включались примерно через 30—50 сек. после начала записи  $I(\beta)$ . В отдельных случаях цикл работы ловушек растягивался примерно на 2 мин., т. е. почти на весь интервал записи  $I(\beta)$ .

Общий исследованный объем  $V_{\text{лов}}$  тумана за время экспозиций пробных стекол в ловушках можно подсчитать, зная скорость протяжки тумана  $v = 17$  м/сек., число снятых кадров  $n = 60$ , время экспозиции каждого пробного стекла  $\tau = 0,1$  сек., площадь кадра  $S_k$  около  $1 \text{ мм}^2$ :

$$V_{\text{лов}} = v n \tau S_k = 17 \text{ м/сек.} \cdot 60 \cdot 0,1 \text{ сек.} \cdot 10^{-6} \text{ м}^2. \quad (2)$$

Полный расход тумана за время измерений  $t_{\text{лов}} = 1$  мин. (т. е. объем тумана, прошедший через трубку ловушки с сечением  $S$ )

$$V_{\text{лов}}^{(n)} = v S t_{\text{лов}}, \quad V_{\text{лов}}^{(n)} \simeq 1 \text{ м}^3. \quad (3)$$

Тот же объем для дифракционного структуромера

$$V_{\text{пр}}^{(n)} = V_k t_{\text{пр}} = 27 \cdot 10^3 \text{ см}^3/\text{сек.} \cdot 150 \text{ сек.} \simeq 4 \text{ м}^3. \quad (4)$$

Общее число частиц  $N = \sum n_i$ , подсчитанных в пробах по ловушке для построения спектра  $f(a)$ , составляло около 1000—1500; в каждый момент времени в освещенном объеме дифракционного структуромера находилось 1500—3000 частиц при концентрациях  $n$  не ниже 50 капель на  $1 \text{ см}^3$  [1].

В течение всего времени жизни тумана его локальная неоднородность была заметной. Поэтому, учитывая здесь динамические характеристики ловушки и дифракционного структуромера, можно считать совпадение спектров на рис. 3 [одновременно измеренные  $f_{\text{пр}}(a)$  и  $f_{\text{лов}}(a)$ ] хорошим.

Влияние локальной неоднородности тумана сильнее всего проявлялось в начальные стадии его образования вследствие конденсации пара и сильного перепада температур в камере и приборах, а также в конце — при рассеянии тумана и выпадении крупных капель. В эти периоды совмещение измеренных спектров  $f_{\text{пр}}(a)$  и  $f_{\text{лов}}(a)$  хуже. Кроме того, в начальной стадии плотность тумана очень велика и спектры  $f_{\text{пр}}(a)$  показывают наличие большого числа мелких капель, причем часто спектр не имеет ясно выраженного максимума. По-видимому, это вызвано присутствием мелких частиц (радиусом менее 1—2 мк) в момент пуска пара и даже появлением вторичного рассеяния. По этой причине измерения производились в основном спустя 10—15 мин. после выпуска пара в камеру.

### Испытания прибора в естественных туманах

В мае—сентябре 1961 г. производились измерения спектра капель в естественных туманах. Было исследовано 4 тумана адвективного характера: в ночь с 12 на 13 мая, утром 15 сентября, утром и вечером 27 сентября в Воейково.

Туманы были продолжительными и устойчивыми по структуре. Это особенно относится к туманам 15 и 27 сентября, образовавшимся при слабом ветре. Туман 27 сентября держался почти целые сутки.

Для сопоставления со спектрами  $f_{\text{пр}}(a)$ , измеренными прибором, использовались данные микрофотографий, полученных путем забора проб

на стекло с тонким слоем трансформаторного масла. Пробы брались непрерывно в течение времени записи ряда распределений  $I(\beta)$  и немедленно фотографировались. Таким образом, спектры, полученные прибором в течение некоторого интервала времени  $\Delta t$ , сопоставлялись с микрофотографическим спектром  $f(a)$ , осредненным по пробам, взятым в течение того же промежутка  $\Delta t$ .

На рис. 4 представлены спектры естественных туманов в процентах от общего числа частиц (процентная повторяемость радиусов капель).

Наиболее удовлетворительное совпадение спектров  $f(a)$ , полученных обоими методами, наблюдается лишь в случае устойчивых и однородных по структуре туманов.

Чтобы дать точную количественную оценку близости кривых распределения (микрофотографической и оптической), иллюстрируемой

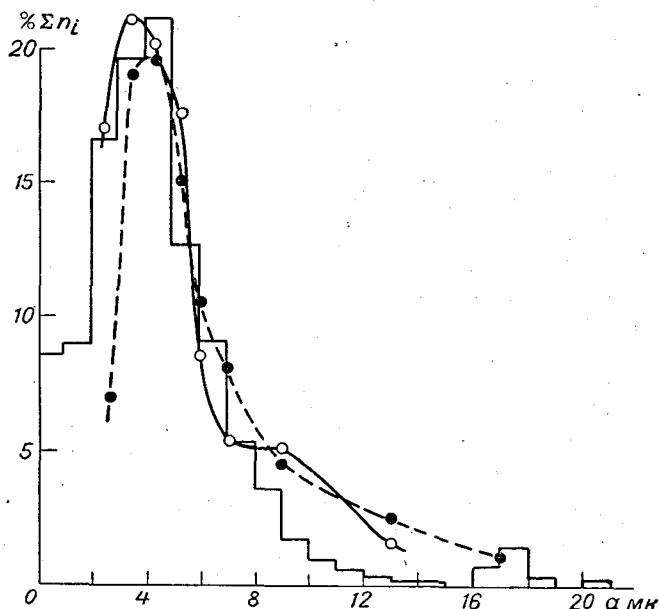


Рис. 4. Спектры естественного тумана (Воейково).

рис. 1—4, рассмотрим совпадение первых трех моментов распределения — среднего радиуса капель  $\bar{a} = a_1$ , среднего квадрата  $\sqrt{\bar{a}^2} = a_2$ , среднего куба  $\sqrt[3]{\bar{a}^3} = a_3$ . Они указывают на степень близости среднего радиуса частиц, оптической прозрачности и водности, измеренных обоими методами, и, таким образом, имеют вполне определенный физический смысл.

Сводные данные приведены в табл. 1. При оценке таблицы следует иметь в виду замечания, сделанные выше, относительно режимов тумана и динамических характеристик поточных ловушек и дифракционного структуромера.

Считая все измерения, представленные в табл. 1, равноточными, имеем для  $\delta$  следующие средние значения в процентах:  $\bar{\delta}_1 = 20,2$ ,  $\bar{\delta}_2 = 19,4$ ,  $\bar{\delta}_3 = 19,9$ .

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. В результате проведенных испытаний полевого дифракционного структуромера были проверены: а) пригодность прибора к работе

Таблица 1

| Образец золя, туман                          | Время, час. мин. | $a_1$                       |        |                 | $a_2$                       |        |                 | $a_3$                       |        |                 |
|----------------------------------------------|------------------|-----------------------------|--------|-----------------|-----------------------------|--------|-----------------|-----------------------------|--------|-----------------|
|                                              |                  | "точные значения" микрофото | прибор | $\delta_1$<br>% | "точные значения" микрофото | прибор | $\delta_2$<br>% | "точные значения" микрофото | прибор | $\delta_3$<br>% |
| Плоские модели, 1960—1961 гг.                |                  | 5,0                         | 5,1    | 2,0             | 6,4                         | 3,0    | 3,6             | 7,3                         | 6,9    | 5,5             |
|                                              |                  |                             | 5,2    | 4,0             |                             | 1,5    | 0,8             |                             | 7,6    | 4,1             |
|                                              |                  | 11,3                        | 12,6   | 11,5            | 11,8                        | 5,1    | 4,1             | 12,4                        | 12,6   | 1,6             |
| Объемные модели, 1960—1961 гг.               |                  |                             | 11,2   | 0,9             |                             | 3,3    | 3,8             |                             | 11,8   | 4,8             |
|                                              |                  | 20,9                        | 20,8   | 0,5             | 22,4                        | 22,3   | 0,4             | 23,7                        | 23,6   | 0,4             |
|                                              |                  |                             | 21,4   | 2,4             |                             | 22,7   | 1,3             |                             | 23,9   | 0,8             |
|                                              |                  | 17,9                        | 20,4   | 13,9            | 20,5                        | 22,3   | 8,8             | 22,6                        | 23,9   | 5,7             |
|                                              |                  |                             | 20,8   | 16,2            |                             | 22,6   | 10,2            |                             | 24,4   | 7,9             |
|                                              |                  | 21,2                        | 20,4   | 3,8             | 22,5                        | 21,7   | 3,6             | 23,6                        | 22,9   | 2,9             |
| Естественный туман, Войково, 27/IX 1961 г.   |                  | 5,1                         | 5,8    | 13,7            | 5,8                         | 6,2    | 6,9             | 6,8                         | 6,9    | 1,5             |
|                                              |                  |                             | 6,6    | 29,3            |                             | 7,4    | 27,6            |                             | 8,3    | 22,0            |
| Естественный туман, Войково, 27/IX 1961 г.   | 9 45             | 4,4                         | 3,9    | 11,4            | 4,9                         | 4,2    | 14,3            | 5,4                         | 4,3    | 20,4            |
| Естественный туман, Войково, 12—13/V 1961 г. |                  | 13,4                        | 6,2    | 53,8            | 11,7                        | 4,4    | 62,4            | 11,9                        | 4,0    | 66,4            |
|                                              |                  |                             | 5,3    | 60,4            |                             | 3,9    | 66,7            |                             | 3,6    | 69,7            |
|                                              |                  |                             | 6,1    | 54,5            |                             | 4,3    | 63,2            |                             | 3,9    | 67,2            |
|                                              |                  |                             | 13,9   | 3,7             |                             | 10,1   | 13,7            |                             | 9,3    | 21,8            |
| Естественный туман, Войково, 15/IX 1961 г.   | 9 01             | 8,1                         | 7,3    | 9,9             | 8,9                         | 8,3    | 6,7             | 9,6                         | 8,8    | 8,3             |
|                                              |                  | 9 10                        | 7,6    | 6,2             |                             | 8,6    | 3,4             |                             | 9,4    | 2,1             |
|                                              |                  | 9 17                        | 5,5    | 32,1            |                             | 6,9    | 22,5            |                             | 7,8    | 18,8            |
|                                              |                  | 9 25                        | 6,6    | 18,5            |                             | 7,4    | 16,8            |                             | 7,9    | 17,7            |
| Искусственный туман, Терскол, 20/X 1960 г.   | 15 30            | 6,0                         | 5,3    | 11,7            | 6,2                         | 5,4    | 12,9            | 6,4                         | 5,6    | 12,5            |
| Искусственный туман, Терскол, 19/X 1960 г.   | 15 25            | 6,1                         | 6,6    | 8,2             | 6,3                         | 6,8    | 7,9             | 6,5                         | 6,9    | 6,2             |
| Искусственный туман, Терскол, 18/X 1960 г.   | 20 07            | 5,1                         | 5,8    | 13,7            | 5,4                         | 6,0    | 11,1            | 5,7                         | 6,2    | 8,8             |
| Искусственный туман, Терскол, 18/X 1960 г.   | 16 24            | 4,8                         | 2,8    | 41,7            | 5,6                         | 3,2    | 42,8            | 6,2                         | 3,5    | 43,5            |
| Искусственный туман, Терскол, 17/X 1960 г.   | 12 39            | 3,1                         | 2,6    | 16,1            | 3,7                         | 2,8    | 24,3            | 4,2                         | 3,0    | 28,6            |
| Искусственный туман, Терскол, 18/X 1960 г.   | 14 55            | 4,3                         | 4,4    | 2,3             | 4,5                         | 4,7    | 4,4             | 5,2                         | 4,9    | 5,7             |
| Искусственный туман, Терскол, 18/X 1960 г.   | 20 02            | 6,9                         | 5,0    | 27,6            | 7,2                         | 5,2    | 27,8            | 7,5                         | 5,4    | 28,0            |
| Искусственный туман, Терскол, 19/X 1960 г.   | 15 10            | 7,9                         | 4,1    | 48,1            | 8,3                         | 4,3    | 48,2            | 8,7                         | 4,6    | 47,2            |
| Искусственный туман, Терскол, 19/X 1960 г.   | 15 20            | 8,8                         | 3,0    | 65,9            | 9,2                         | 3,2    | 65,2            | 9,6                         | 3,3    | 65,6            |
| Камера тумана, ГГО, 1958 г.                  |                  | 4,5                         | 4,2    | 6,7             | 5,0                         | 4,4    | 12,0            | 5,5                         | 4,6    | 16,4            |
| Плоские модели, 1959—1960 гг.                |                  | 19,9                        | 13,8   | 30,6            | 13,9                        | 11,1   | 20,1            | 12,9                        | 11,1   | 14,0            |
|                                              |                  |                             | 15,2   | 23,6            |                             | 10,8   | 22,3            |                             | 10,1   | 21,7            |
|                                              |                  |                             | 17,5   | 12,1            |                             | 13,0   | 6,5             |                             | 12,5   | 31,0            |
|                                              |                  |                             | 11,2   | 43,7            |                             | 8,9    | 36,0            |                             | 8,6    | 33,3            |
| Камера тумана, ГГО, 1958 г.                  |                  | 4,6                         | 3,6    | 21,7            | 5,0                         | 4,0    | 20,0            | 5,5                         | 4,5    | 18,2            |
|                                              |                  |                             | 4,0    | 13,0            |                             | 4,3    | 14,0            |                             | 4,6    | 16,4            |

в естественных приземных туманах, б) устойчивость работы прибора, в) режимы записи индикатрис рассеянного света  $I(\beta)$ , г) точность измерения спектров размеров  $f(a)$  (см. [1]).

2. Были измерены спектры размеров  $f(a)$  частиц радиусом 10—30 мк и капель туманов 2—15 мк. Обработано около 350 записей индикатрис  $I(\beta)$ .

3. Прибор обнаруживает туманы с концентрацией частиц до 50 на  $1 \text{ см}^3$ .

4. Исследование «нулевого распределения» света  $I_0$  вблизи  $\beta=0$  показало, что для спектров  $f(a)$  с  $a=2 \div 15$  мк «нулевым распределением» можно пренебречь (см. [1] и [5]).

5. Точность получения ординаты спектра  $f(a)$  составила в среднем около 5—6% у максимума кривой  $f(a)$  и около 25—30% вблизи ее основания.

Необходимо отметить большую трудоемкость графической обработки индикатрис  $I(\beta)$ . Так, при записи одной индикатрисы с ПС1-02 в течение 2,5—10 мин. обработка ее по формуле метода малых углов занимает от 40 мин. до 1 часа [по готовым таблицам  $F(\beta_0)$  и со счетной машиной «САР-2 («Рейнметалл») или с арифмометром] [1].

6. При измерениях углового распределения света, рассеянного аэрозолем с неизвестным (хотя бы приблизительно) спектром размеров и концентрацией, возникает неопределенность в выборе подходящей шкалы фотометра и скорости движения лентопротяжного механизма самописца. В процессе записи оптимальная разрешающая способность, интервал углов записи, чувствительность приемника света в зависимости от спектра  $f(a)$  и концентрации изменяются в довольно широких пределах. Выбор режимов записи затрудняется (особенно при неустойчивом тумане) большим перепадом измеряемых интенсивностей света ( $10^3$ — $10^5$ ) и нелинейностью распределения света вдоль угла  $\beta$  [1].

Это приводит к тому, что часть записанных индикатрис  $I(\beta)$  не годится к дальнейшей обработке из-за невозможности выявить точный ход функций  $\beta^3 I$  и  $\frac{d}{d\beta}(\beta^3 I)$  в результате промахов в выборе режимов записи  $I(\beta)$ , которая является монотонной функцией угла  $\beta$ , не проявляющей явно видимых особенностей хода, связанных с микроструктурой (исключение составляют лишь монодисперсные системы, дающие известные «венцы»). Поэтому было бы желательно наблюдать ход  $\beta^3 I$  и  $\frac{d}{d\beta}(\beta^3 I)$  непосредственно в процессе измерений углового распределения рассеянного света  $I(\beta)$ , например, с помощью моделирующих устройств. Устройство, моделирующее  $\beta^3 I$  и ее производную, позволит исключить этап графической обработки и уже на этом сократить время подсчета  $f(a)$  по (4) до 20—15 мин., а также избавиться от обработки индикатрис  $I(\beta)$ , записанных неудачно.

Нами изготовлен лабораторный макет устройства, моделирующего  $\beta^3 I$ , производится конструктивная отработка узлов и лабораторные испытания этого устройства.

7. Измерения в искусственных и естественных туманах показали также необходимость постоянного контроля общего ослабления света  $I_0$ , особенно в плотных туманах ( $n \sim 500$  капель на  $1 \text{ см}^3$  и выше). Это вызывается опасностью появления вторичного рассеяния, для устранения которого в варианте прибора с модулированным световым сигналом предусмотрена возможность изменения длины световой базы фотометра [1]. Если в естественных туманах при концентрациях  $n \sim 50 \div 100$  капель на  $1 \text{ см}^3$  можно работать с базой  $l_{\text{max}} \sim 10 \div 50 \text{ см}$  и даже более, то

в плотных туманах и облаках необходимо сокращение ее до 20—10 см (концентрации  $n \gg 500$  капель на 1 см<sup>3</sup>) [1].

8. Дальнейшую работу с прибором предполагается развить по следующим направлениям [1]:

а) окончательный переход к схеме фотометра с переменным (модулированным) световым сигналом («дневной» фотометр);

б) ускорение записи  $I(\beta)$ ;

в) введение в схему фотометра моделирующих и счетно-решающих устройств;

г) подготовка макета, пригодного для испытаний в самолетных условиях (микроструктура облаков);

д) расширение программы измерений дифракционным структуромером в искусственных и естественных туманах с сопоставлением спектров  $f_{\text{пр}}(a)$  со спектрами поточных ловушек  $f_{\text{лов}}(a)$ ;

е) сопоставление дифракционного структуромера со всеми известными в настоящее время приборами для измерения микроструктуры (поточные ловушки, приборы для измерения водности и др.).

### Границы применимости метода

Рассмотрим вопросы, связанные с точностью метода малых углов, границами его применимости и точностью измерений спектра размеров дифракционным структуромером. Должны быть учтены следующие ограничения:

а) частицы не должны располагаться очень густо для исключения возможности интерференционных явлений — среднее расстояние между ними должно быть более  $5\lambda$  ( $\lambda$  — длина волны используемого света). Подробнее см [1], [6], а также [5] и [7];

б) оптическая толщина освещаемого объекта должна быть значительно меньше единицы, чтобы исключить возможность вторичного рассеяния, когда теория метода неверна.

Рассмотрим ограничения по размерам частиц.

1. Нижняя граница метода. Для определения наименьшего радиуса, начиная с которого можно пользоваться методом малых углов в его математической форме, развитой в [8, 9], нужно иметь точные теоретические оценки радиусов тех частиц, для которых в области малых углов можно уверенно представить индикатрису формулой (см. подробнее в [8, 9])

$$I(\beta, \lambda) = \frac{I_0}{\beta^2} \int_0^{\infty} J_1^2(\rho\beta) f(a) a^2 da. \quad (5)$$

Анализ имеющихся к настоящему времени точных расчетов показывает, что: 1) с точностью 5—10% эта граница лежит около  $\rho=20$ ; 2) при длине волны  $\lambda=0,5$  мк минимальный радиус частиц  $a_{\text{min}}=2$  мк. Заметим, что имеется некоторая, правда ограниченная чисто техническими причинами, возможность продвижения метода в область еще меньших размеров (или по крайней мере некоторого повышения точности метода в области наименьших частиц) за счет уменьшения длины волны используемого света [1, 5, 7].

В табл. 2 приводим (по данным [6, 10]) сравнение величин

$$2i = i_1 + i_2, \quad (6)$$

рассчитанных по точным формулам теории рассеяния электромагнитных волн с приближенными значениями

$$2i^* = \frac{\rho^4}{2} \left[ 2 \frac{J_1(\rho\beta)}{\rho\beta} \right]^2, \quad (7)$$

полученными из дифракционных формул для малых углов рассеяния. В графе 5 указаны величины относительной ошибки  $\delta_1 = \left| \frac{i - i^*}{i} \right|$  в процентах.

Таблица 2

| $\rho$ | $\beta^\circ$ | $2i$                 | $2i^*$               | $\delta_1$ | $\Phi$ | $\Phi^*$ | $\delta_2$ |
|--------|---------------|----------------------|----------------------|------------|--------|----------|------------|
| 1      | 2             | 3                    | 4                    | 5          | 6      | 7        | 8          |
| 200    | 0,0           | $8,470 \cdot 10^8$   | $8 \cdot 10^8$       | 5,5        | 0,000  | 0,000    | 0,0        |
|        | 0,2           | $7,461 \cdot 10^8$   | $7,075 \cdot 10^8$   | 5,2        | 0,059  | 0,057    | 3,4        |
|        | 0,4           | $5,009 \cdot 10^8$   | $4,810 \cdot 10^8$   | 4,0        | 0,196  | 0,192    | 2,0        |
|        | 0,6           | $2,397 \cdot 10^8$   | $2,362 \cdot 10^8$   | 1,5        | 0,328  | 0,324    | 1,2        |
|        | 0,8           | $0,6661 \cdot 10^8$  | $0,6963 \cdot 10^8$  | 4,5        | 0,401  | 0,398    | 0,8        |
|        | 1,0           | $0,03735 \cdot 10^8$ | $0,05235 \cdot 10^8$ | 40,2       | 0,418  | 0,418    | 0,0        |
|        | 1,2           | $0,4922 \cdot 10^8$  | $0,03318 \cdot 10^8$ | 93,2       | 0,419  | 0,419    | 0,0        |
|        | 1,4           | $0,1531 \cdot 10^8$  | $0,1311 \cdot 10^8$  | 14,4       | 0,430  | 0,428    | 0,5        |
| 100    | 0,0           | $5,52 \cdot 10^7$    | $5 \cdot 10^7$       | 9,4        | 0,000  | 0,000    | 0,0        |
|        | 0,2           | $5,347 \cdot 10^7$   | $4,852 \cdot 10^7$   | 9,3        | 0,016  | 0,015    | 6,3        |
|        | 0,4           | $4,853 \cdot 10^7$   | $4,422 \cdot 10^7$   | 8,9        | 0,060  | 0,057    | 5,0        |
|        | 0,6           | $4,115 \cdot 10^7$   | $3,777 \cdot 10^7$   | 8,2        | 0,116  | 0,120    | 3,4        |
|        | 0,8           | $3,240 \cdot 10^7$   | $3,006 \cdot 10^7$   | 7,2        | 0,188  | 0,192    | 2,1        |
|        | 1,0           | $2,347 \cdot 10^7$   | $2,210 \cdot 10^7$   | 5,8        | 0,299  | 0,301    | 0,7        |
|        | 1,2           | $1,540 \cdot 10^7$   | $1,476 \cdot 10^7$   | 4,2        | 0,394  | 0,398    | 1,0        |
|        | 1,4           | $0,8916 \cdot 10^7$  | $0,874 \cdot 10^7$   | 2,0        | 0,412  | 0,419    | 1,7        |
| 40     | 0             | $1,282 \cdot 10^6$   | $1,280 \cdot 10^6$   | 0,2        | 0,000  | 0,000    | 0,0        |
|        | 1             | $1,105 \cdot 10^6$   | $1,132 \cdot 10^6$   | 2,4        | 0,058  | 0,057    | 1,7        |
|        | 2             | $0,6864 \cdot 10^6$  | $0,7695 \cdot 10^6$  | 12,1       | 0,185  | 0,324    | 3,8        |
|        | 3             | $0,2718 \cdot 10^6$  | $0,3779 \cdot 10^6$  | 39,0       | 0,293  | 0,398    | 10,6       |
|        | 4             | $0,04198 \cdot 10^6$ | $0,1114 \cdot 10^6$  | 165,2      | 0,337  | 0,398    | 18,1       |
|        | 5             | $0,05292 \cdot 10^6$ | $0,0084 \cdot 10^6$  | 84,1       | 0,342  | 0,418    | 22,2       |
|        | 6             | $0,04987 \cdot 10^6$ | $0,0053 \cdot 10^6$  | 89,4       | 0,356  | 0,419    | 17,7       |
|        | 7             | $0,07285 \cdot 10^6$ | $0,0210 \cdot 10^6$  | 71,2       | 0,397  | 0,428    | 7,8        |
| 20     | 0             | $9,602 \cdot 10^4$   | $8 \cdot 10^4$       | 16,7       | 0,000  | 0,000    | 0,0        |
|        | 1             | $9,205 \cdot 10^4$   | $7,763 \cdot 10^4$   | 15,7       | 0,017  | 0,015    | 11,8       |
|        | 3             | $6,474 \cdot 10^4$   | $6,043 \cdot 10^4$   | 6,7        | 0,128  | 0,120    | 6,2        |
|        | 5             | $2,908 \cdot 10^4$   | $3,535 \cdot 10^4$   | 21,6       | 0,256  | 0,263    | 2,7        |

Просматривая табл. 2, можно отметить следующие два обстоятельства:

а) большие ошибки  $\delta$  чаще всего связаны с положениями темных дифракционных колец, т. е. нулей функции  $i^*$ . По точной теории рассеяния в этом направлении нуля нет, и понятно, что в этих дискретных направлениях ошибки оказываются большими;

б) величины  $i$  и  $i^*$  колеблются друг около друга. Поэтому при переходе от интенсивностей к потокам внутри конуса с углом раскрытия  $\beta$  получим существенно лучшее совпадение результатов.

Введем обозначения:

$$\Phi = 2\pi \int_0^\beta \frac{i}{\pi \rho^2} \sin \beta d\beta = \frac{2}{\rho^2} \int_0^\beta i \sin \beta d\beta, \quad (8)$$

$$\Phi^* = \frac{2\pi}{\pi \rho^2} \int_0^\beta i^* \sin \beta d\beta = 1 - J_0^2(\rho\beta) - J_1^2(\rho\beta) \quad (9)$$

(см. подробнее [6, 10]).

Величина  $\delta_2 = \left| \frac{\Phi - \Phi^*}{\Phi^*} \right|$  в процентах, а также значения  $\Phi$  и  $\Phi^*$  приведены в табл. 2 (графы 6—8). Здесь отклонение уже заметно меньше.

В соответствии с данными табл. 2 среднюю точность исходной формулы (5) для  $\rho \geq 20$  можно оценить в 5—10%.

2. Верхняя граница метода. Наибольший радиус частиц  $a_{\max}$ , который может быть уверенно измерен методом малых углов, ограничен угловыми размерами изображения источника света в фокальной плоскости линзы приемника света и угловым разрешением светоприемника  $\alpha$ , необходимым для записи кривой распределения освещенности  $I(\beta)$  при данном  $a_{\max}$  (см. [1]). В зависимости от углового увеличения оптической части дифракционного структуромера и параметров линзы приемного объектива  $a_{\max}$  составляло от 30 до 50 мк. Так как спектры туманов, которые предполагалось измерять дифракционным структуромером в исследованиях 1960—1961 гг., располагаются примерно в интервале  $\Delta a = 2 \div 30$  мк с преобладанием  $f_{\max}(a)$  при  $a = 2 \div 15$  мк, то в макете прибора [1] была использована оптическая система, позволяющая производить измерения до  $a_{\max} = 30$  мк.

### Точность метода и точность измерений

Точность метода малых углов определяется точностью исходных дифракционных формул, точностью фотометрирования индикатрисы рассеяния под малыми углами и точностью последующей графической обработки [5, 7].

О точности дифракционных формул мы уже говорили; ошибка здесь составляет 5—10%.

Анализ показывает, что если пренебречь теоретической ошибкой (за исключением лишь случая самых малых  $\rho \approx 30 \div 20$ ) и если предположить, что мы не вносим дополнительной ошибки при графической обработке, то относительная точность определения ординаты спектра размеров  $\frac{\Delta f(a)}{f(a)}$  совпадала бы с относительной точностью фотометрирования световых потоков во всем интервале углов рассеяния. Последняя существенно зависит от светового потока и методики его измерения [1, 5, 7].

Точность фотометрирования в измерениях 1960—1961 гг. с макетом дифракционного структуромера оказалась равной 4—8% (для световых потоков  $\Phi_{\min} = 10^{-8}$  лм [1]).

Для оценки точности графической обработки экспериментальных индикатрис  $I(\beta)$  был проведен «арифметический эксперимент» [5], повторенный в 1960—1961 гг. Для нескольких распределений вида  $f(a) = Aa^{\bar{a}} e^{-\Delta a}$  при  $\Delta = 0,1; 0,2$  и  $\bar{a} = 15$  мк;  $\Delta = 0,1; 0,2$  и  $\bar{a} = 10$  мк;  $\Delta = 0,1; 0,5$  и  $\bar{a} = 5$  мк по формулам из [8] были вычислены индикатрисы  $I(\beta)$ , которые затем подвергались обработке по основной формуле малых углов.

Поскольку распределение интенсивностей света по углам было известно нам с любой наперед заданной точностью, то получающиеся расхождения можно было приписывать погрешностям графической обработки. Был изучен интервал размеров от 2 до 40 мк. В «арифметическом эксперименте» участвовали два вычислителя: «опытный» — ранее производивший графическую обработку экспериментальных индикатрис  $I(\beta)$ , и «неопытный» — впервые выполнявший такую обработку. Оказалось, что для первого вычислителя ошибки во всех случаях во всем интервале размеров не превышали 5%, для второго — 10—12%.

Таким образом, полная ошибка метода в пределах области его применения складывается из трех ошибок: теоретической, ошибки фотометрирования и ошибки обработки. В измерениях, описанных нами в [5, 7], она оказалась не более 25—30% при фотоэлектрических измерениях потоков рассеянного света. В измерениях дифракционным структуромером ошибка в определении ординаты спектра размеров была около 5—6% вблизи максимума  $f(a)$  и 25—35% вблизи ее основания. Это понижение точности на краях распределения вызвано тем, что при графической обработке не были приняты предосторожности, которые делались в «арифметическом эксперименте»: обработка  $I(\beta)$  на больших листах бумаги с большим числом промежуточных точек по  $\beta$  и  $a$ . Для сокращения времени обработки мы пользовались стандартными таблицами  $F(\rho\beta)$  (см. [5, 7, 9]) и стандартными интервалами  $\Delta\beta$  и  $\Delta a$ , что и привело к ошибкам обработки до 10—12%.

Воспроизводимость спектра  $f(a)$  при ряде повторных измерений и графических обработок хорошо иллюстрирует рис. 2 (случай калиброванного микрофотографическим методом золя). Можно надеяться, что при изготовлении автоматического счетно-решающего устройства и повышении точности фотометрирования световых потоков можно добиться воспроизведения спектров  $f(a)$  во всем интересующем геофизиков интервале размеров с точностью не менее  $\pm 10$ —15%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Голиков В. И. Прибор для измерения микроструктуры туманов методом малых углов индикатрисы рассеяния (см. настоящий сборник).
2. Gumprecht R. O., Sliepcevic S. M. Measurement of particle sizes in poly-dispersed systems by means of light transmission measurements combined with differential settling. Journ. Phys. Chem., 57, No 1, 1953.
3. Шифрин К. С. Универсальная формула для скорости падения шара в жидкости. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 2, 1958.
4. Фукс И. А. Механика аэрозолей. Изд. АН СССР, М., 1955.
5. Шифрин К. С., Голиков В. И. Определение спектра капель методом малых углов. Труды 6-й межведомственной конференции по исследованию облаков, осадков и грозового электричества. Изд. АН СССР, М., 1961.
6. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде. Гостехиздат, 1951.
7. Голиков В. И. Лабораторная установка для измерения спектра размеров сферических частиц и капель туманов. Труды ГГО, вып. 109, 1961.
8. Шифрин К. С. Вычисление некоторого класса определенных интегралов, содержащих квадрат бесселевой функции. Труды ВЗЛТИ, вып. 2, 1956.
9. Шифрин К. С. Оптические исследования облачных частиц. В сб. «Исследования облаков, осадков и грозового электричества». Гидрометеиздат, Л., 1957.
10. Sliepcevic S. M., Gumprecht R. O. Scattering of light by large spherical particles. Journ. Phys. Chem., 57, No 1, 1953.

## К РАСЧЕТУ СПЕКТРАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЯРКОСТИ БЕЗОБЛАЧНОГО НЕБА В ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ

Изложен порядок расчета спектрального распределения яркости безоблачного неба по схеме К. С. Шифрина и И. Н. Минина. Даны таблицы значений величин и вспомогательных функций, входящих в формулу В. В. Соболева для определения коэффициента яркости.

Для ряда исследований в области биофизики (в частности, биофизики растений, биофизики зрения и т. д.) существенно знать спектральный состав потока видимого света, приходящего на произвольно ориентированную площадку с ограниченного (в общем случае) участка неба при различных высотах солнца.

Эту задачу возможно решить расчетным путем, исходя из замкнутой двухпараметрической модели атмосферы, построенной К. С. Шифриным и И. Н. Мининым [1]. Схема, развитая в [1], позволяет определить коэффициент яркости как функцию координат точки неба и длины волны. Формула для определения коэффициента яркости, полученная В. В. Соболевым [2], имеет вид

$$\sigma(\vartheta, \varphi, i, \lambda) = \frac{[(1-A)R(\tau_0, \vartheta) + 2A]R(\tau_0, i)}{4 + [3 - x_1(\lambda)](1-A)\tau_0} - \frac{1}{2}(e^{-\tau_0 \sec \vartheta} + e^{-\tau_0 \sec i}) + \\ + \{x(\gamma, \lambda) - [3 + x_1(\lambda)] \cos \vartheta \cos i\} \sigma_0(\vartheta, i). \quad (1)$$

Здесь  $A$  — альбеда подстилающей поверхности,  $\tau_0$  — оптическая толщина атмосферы,  $i$  — зенитное расстояние солнца,  $\varphi, \vartheta$  — азимут, отсчитываемый от вертикала солнца, и зенитное расстояние рассматриваемой точки неба,  $R(\tau_0, \vartheta)$  — функция, определяемая формулой

$$R(\tau_0, \vartheta) = 1 + \frac{3}{2} \cos \vartheta + \left(1 - \frac{3}{2} \cos \vartheta\right) e^{-\tau_0 \sec \vartheta}, \quad (2)$$

$\sigma_0(\vartheta, i)$  — коэффициент яркости для сферической индикатрисы рассеяния, вычисляемый по формуле

$$\sigma_0(\vartheta, i) = \frac{1}{4} \frac{e^{-\tau_0 \sec i} - e^{-\tau_0 \sec \vartheta}}{\cos i - \cos \vartheta}, \quad (3)$$

$\gamma$  — угол между радиусом-вектором рассматриваемой точки неба и падающим в эту точку солнечным лучом, вычисляемый по формуле

$$\cos \gamma = \cos \vartheta \cos i + \sin \vartheta \sin i \cos \varphi. \quad (4)$$

Индикатриса рассеяния  $x(\gamma, \lambda)$  предполагается нормированной так, что

$$\frac{1}{2} \int_0^\pi x(\gamma, \lambda) \sin \gamma d\gamma = 1.$$

Величина  $x_1(\lambda)$  определяется формулой

$$x_1(\lambda) = \frac{3}{4} \int_0^\pi x(\gamma, \lambda) \sin 2\gamma d\gamma.$$

Величины альbedo и оптической толщины атмосферы зависят от длины волны  $\lambda$ . Полная индикатриса рассеяния есть сумма релеевской и аэрозольной, также зависящей от  $\lambda$ .

Вычисления по формуле (1) могут быть значительно облегчены, если заранее протабулировать входящие в нее функции.

В настоящей работе таблицы этих функций (табл. 1—8) составлены для состояния атмосферы, характеризуемого горизонтальной дальностью видимости  $S_0 = 20$  км и оптической толщиной  $\tau_0 = 0,3$  для длины волны  $\lambda = 550$  мкм.

Как показано в [1], спектральная оптическая толщина атмосферы для рассматриваемого состояния

$$\tau_0 = 8a(0, \lambda) + \frac{112,2}{\lambda},$$

где  $a(0, \lambda)$  — релеевский коэффициент ослабления, а длина волны  $\lambda$  выражена в миллимикронах.

Средняя индикатриса для всей атмосферы определяется, согласно [1], так:

$$x(\gamma, \lambda) = \frac{1}{\tau_0} \left[ 8a(0, \lambda) x_p(\gamma) + \frac{112,2}{\lambda} x_a(\gamma, \lambda) \right].$$

Нормированная релеевская индикатриса, как известно,

$$x_p = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \gamma).$$

Для расчета нормированной аэрозольной индикатрисы  $x_a(\gamma, \lambda)$  мы воспользовались экспериментальными данными Фойтцика и Цшаека [3], позволяющими установить связь между  $x_a$ ,  $\gamma$  и  $S_0$ .

Зависимость  $S_0$  от  $\lambda$  в видимой части спектра взята из табл. 10 работы [1]. Эту зависимость можно хорошо аппроксимировать формулой

$$S_0 = 12,3 + 0,0434\lambda \text{ км } (\lambda \text{ в мкм}).$$

Результаты вычислений приведены в табл. 1—7. В табл. 1 даны значения нормированной аэрозольной индикатрисы  $x_a(\gamma, \lambda)$ ; в последней строке указаны значения  $x_p(\gamma)$ . В табл. 2 приведены значения средней индикатрисы  $x(\gamma, \lambda)$  для всей атмосферы и значения функции  $x_1(\lambda)$ . В табл. 3 и 4 приведены функции  $e^{-\tau_0 \sec \theta}$  и  $R(\tau_0, \theta)$ . Таблица 5 содержит значения произведения  $\frac{1}{\pi} I_0(\lambda) \cos i$ , на которые следует умножать коэффициенты яркости, чтобы получить яркость  $B(\lambda)$  в абсолютных единицах. Значения плотности потока солнечного излучения, падающего на верхнюю границу атмосферы, взяты из таблиц К. С. Шифрина и Н. П. Пятовской [4].

В табл. 6 даны значения угла  $\gamma$  в долях градуса. Таблица 7 содержит значения  $\sigma_0$ .

Зависимость альbedo от длины волны для некоторых подстилающих поверхностей, согласно экспериментальным данным Е. К. Пуцейко [5], приведена в табл. 8. В этой же таблице приведены значения оптической толщины атмосферы.

Настоящая работа выполнена под руководством К. С. Шифрина.

## Нормированная аэрозольная и релейевская индикатрисы рассеяния

| $\lambda$ ммк | $x_a (\lambda, \gamma)$ |       |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------|-------------------------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               | 0°                      | 10°   | 20°  | 30°  | 40°  | 50°  | 60°   | 70°   | 80°   | 90°   | 100°  | 110°  | 120°  | 130°  | 140°  | 150°  | 160°  | 170°  | 180°  |
| 380           | 15,4                    | 11,30 | 6,44 | 3,80 | 2,13 | 1,28 | 0,807 | 0,526 | 0,376 | 0,301 | 0,262 | 0,234 | 0,202 | 0,200 | 0,208 | 0,211 | 0,215 | 0,221 | 0,224 |
| 390           | 15,14                   | 11,10 | 6,38 | 3,75 | 2,13 | 1,29 | 0,820 | 0,533 | 0,382 | 0,309 | 0,267 | 0,242 | 0,209 | 0,206 | 0,215 | 0,219 | 0,224 | 0,230 | 0,231 |
| 400           | 15,03                   | 10,96 | 6,34 | 3,72 | 2,13 | 1,30 | 0,824 | 0,542 | 0,389 | 0,324 | 0,272 | 0,248 | 0,215 | 0,211 | 0,224 | 0,226 | 0,229 | 0,236 | 0,238 |
| 410           | 14,86                   | 10,8  | 6,28 | 3,68 | 2,13 | 1,30 | 0,832 | 0,551 | 0,397 | 0,330 | 0,278 | 0,255 | 0,221 | 0,219 | 0,230 | 0,234 | 0,236 | 0,242 | 0,247 |
| 420           | 14,69                   | 10,62 | 6,24 | 3,64 | 2,13 | 1,31 | 0,839 | 0,557 | 0,406 | 0,330 | 0,283 | 0,261 | 0,227 | 0,225 | 0,239 | 0,240 | 0,243 | 0,249 | 0,252 |
| 430           | 14,55                   | 10,57 | 6,17 | 3,61 | 2,12 | 1,31 | 0,845 | 0,565 | 0,411 | 0,335 | 0,288 | 0,267 | 0,234 | 0,230 | 0,246 | 0,248 | 0,252 | 0,258 | 0,261 |
| 440           | 14,39                   | 10,47 | 6,16 | 3,60 | 2,12 | 1,32 | 0,851 | 0,575 | 0,417 | 0,339 | 0,293 | 0,271 | 0,240 | 0,235 | 0,254 | 0,257 | 0,258 | 0,265 | 0,269 |
| 450           | 14,29                   | 10,33 | 6,14 | 3,57 | 2,12 | 1,32 | 0,857 | 0,581 | 0,422 | 0,343 | 0,298 | 0,274 | 0,245 | 0,236 | 0,258 | 0,260 | 0,263 | 0,271 | 0,275 |
| 460           | 14,19                   | 10,23 | 6,11 | 3,55 | 2,12 | 1,33 | 0,861 | 0,585 | 0,425 | 0,345 | 0,299 | 0,280 | 0,249 | 0,236 | 0,263 | 0,266 | 0,269 | 0,277 | 0,282 |
| 470           | 14,03                   | 10,09 | 6,04 | 3,51 | 2,12 | 1,34 | 0,867 | 0,594 | 0,432 | 0,351 | 0,304 | 0,285 | 0,258 | 0,254 | 0,271 | 0,275 | 0,278 | 0,286 | 0,290 |
| 480           | 13,87                   | 9,93  | 6,00 | 3,48 | 2,12 | 1,34 | 0,875 | 0,598 | 0,441 | 0,355 | 0,308 | 0,290 | 0,266 | 0,261 | 0,279 | 0,284 | 0,287 | 0,293 | 0,301 |
| 490           | 13,80                   | 9,89  | 5,97 | 3,46 | 2,11 | 1,34 | 0,881 | 0,603 | 0,445 | 0,359 | 0,311 | 0,294 | 0,271 | 0,267 | 0,286 | 0,288 | 0,292 | 0,299 | 0,308 |
| 500           | 13,71                   | 9,75  | 5,93 | 3,44 | 2,11 | 1,34 | 0,887 | 0,608 | 0,451 | 0,361 | 0,315 | 0,298 | 0,276 | 0,271 | 0,291 | 0,295 | 0,298 | 0,304 | 0,313 |
| 510           | 13,61                   | 9,64  | 5,90 | 3,42 | 2,11 | 1,35 | 0,891 | 0,611 | 0,455 | 0,365 | 0,319 | 0,301 | 0,282 | 0,277 | 0,296 | 0,300 | 0,303 | 0,311 | 0,319 |
| 520           | 13,52                   | 9,56  | 5,86 | 3,40 | 2,11 | 1,35 | 0,897 | 0,614 | 0,460 | 0,369 | 0,323 | 0,306 | 0,289 | 0,283 | 0,302 | 0,305 | 0,309 | 0,318 | 0,324 |
| 530           | 13,43                   | 9,51  | 5,83 | 3,37 | 2,11 | 1,36 | 0,904 | 0,618 | 0,463 | 0,371 | 0,327 | 0,309 | 0,295 | 0,287 | 0,304 | 0,311 | 0,315 | 0,327 | 0,334 |
| 540           | 13,37                   | 9,40  | 5,81 | 3,36 | 2,11 | 1,36 | 0,908 | 0,622 | 0,469 | 0,375 | 0,331 | 0,313 | 0,299 | 0,294 | 0,305 | 0,314 | 0,321 | 0,334 | 0,341 |
| 550           | 13,25                   | 9,28  | 5,79 | 3,37 | 2,11 | 1,37 | 0,918 | 0,630 | 0,470 | 0,376 | 0,333 | 0,316 | 0,302 | 0,301 | 0,306 | 0,319 | 0,326 | 0,342 | 0,349 |
| 560           | 13,18                   | 9,16  | 5,73 | 3,33 | 2,11 | 1,36 | 0,919 | 0,632 | 0,475 | 0,378 | 0,337 | 0,321 | 0,306 | 0,303 | 0,310 | 0,324 | 0,334 | 0,351 | 0,357 |
| 570           | 13,12                   | 9,12  | 5,72 | 3,30 | 2,10 | 1,36 | 0,920 | 0,636 | 0,481 | 0,382 | 0,341 | 0,324 | 0,308 | 0,306 | 0,313 | 0,331 | 0,340 | 0,359 | 0,366 |
| 580           | 13,09                   | 9,06  | 5,68 | 3,28 | 2,10 | 1,36 | 0,920 | 0,640 | 0,484 | 0,386 | 0,344 | 0,328 | 0,312 | 0,308 | 0,316 | 0,337 | 0,346 | 0,366 | 0,375 |
| 590           | 13,06                   | 9,02  | 5,65 | 3,27 | 2,10 | 1,36 | 0,920 | 0,643 | 0,487 | 0,387 | 0,347 | 0,331 | 0,314 | 0,311 | 0,318 | 0,340 | 0,349 | 0,372 | 0,382 |
| 600           | 13,00                   | 8,95  | 5,62 | 3,26 | 2,09 | 1,35 | 0,920 | 0,647 | 0,490 | 0,390 | 0,351 | 0,334 | 0,318 | 0,314 | 0,322 | 0,344 | 0,353 | 0,379 | 0,387 |
| 610           | 12,91                   | 8,87  | 5,57 | 3,24 | 2,09 | 1,35 | 0,923 | 0,652 | 0,492 | 0,393 | 0,352 | 0,337 | 0,320 | 0,317 | 0,325 | 0,347 | 0,358 | 0,384 | 0,393 |
| 620           | 12,82                   | 8,83  | 5,53 | 3,22 | 2,08 | 1,35 | 0,923 | 0,654 | 0,494 | 0,395 | 0,354 | 0,339 | 0,324 | 0,322 | 0,328 | 0,352 | 0,366 | 0,392 | 0,401 |
| 630           | 12,74                   | 8,77  | 5,49 | 3,21 | 2,08 | 1,35 | 0,923 | 0,656 | 0,498 | 0,398 | 0,358 | 0,342 | 0,328 | 0,325 | 0,332 | 0,356 | 0,373 | 0,400 | 0,410 |
| 640           | 12,68                   | 8,71  | 5,47 | 3,19 | 2,07 | 1,35 | 0,923 | 0,658 | 0,501 | 0,400 | 0,360 | 0,344 | 0,331 | 0,327 | 0,334 | 0,360 | 0,377 | 0,407 | 0,418 |
| 650           | 12,62                   | 8,66  | 5,44 | 3,17 | 2,06 | 1,35 | 0,923 | 0,662 | 0,504 | 0,403 | 0,363 | 0,347 | 0,334 | 0,330 | 0,337 | 0,365 | 0,384 | 0,414 | 0,426 |

$x_p$ 

## Средняя индикатриса всей атмосферы

43

| $\lambda$ MKK | $x(\lambda, \tau)$ |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | $x_1(\lambda)$ |       |       |
|---------------|--------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|
|               | 0°                 | 10°  | 20°  | 30°  | 40°  | 50°  | 60°   | 70°   | 80°   | 90°   | 100°  | 110°  | 120°  | 130°  | 140°  | 150°  | 160°  |                | 170°  | 180°  |
| 440           | 8,18               | 6,14 | 3,87 | 2,50 | 1,67 | 1,19 | 0,893 | 0,702 | 0,588 | 0,537 | 0,524 | 0,544 | 0,576 | 0,632 | 0,705 | 0,765 | 0,814 | 0,849          | 0,882 | 0,939 |
| 450           | 8,35               | 6,22 | 3,95 | 2,52 | 1,69 | 1,20 | 0,894 | 0,700 | 0,585 | 0,532 | 0,518 | 0,535 | 0,566 | 0,613 | 0,691 | 0,749 | 0,796 | 0,831          | 0,864 | 0,965 |
| 460           | 8,51               | 6,31 | 4,01 | 2,55 | 1,70 | 1,21 | 0,895 | 0,698 | 0,581 | 0,526 | 0,511 | 0,530 | 0,557 | 0,605 | 0,678 | 0,734 | 0,781 | 0,814          | 0,827 | 0,938 |
| 470           | 8,64               | 6,39 | 4,05 | 2,57 | 1,72 | 1,22 | 0,897 | 0,699 | 0,578 | 0,523 | 0,505 | 0,523 | 0,550 | 0,600 | 0,666 | 0,721 | 0,766 | 0,798          | 0,810 | 1,009 |
| 480           | 8,74               | 6,43 | 4,10 | 2,58 | 1,73 | 1,22 | 0,901 | 0,697 | 0,578 | 0,519 | 0,501 | 0,517 | 0,544 | 0,592 | 0,655 | 0,710 | 0,754 | 0,784          | 0,798 | 1,025 |
| 490           | 8,89               | 6,53 | 4,15 | 2,60 | 1,74 | 1,23 | 0,904 | 0,697 | 0,576 | 0,515 | 0,495 | 0,511 | 0,537 | 0,583 | 0,647 | 0,697 | 0,739 | 0,769          | 0,784 | 1,046 |
| 500           | 9,02               | 6,57 | 4,19 | 2,62 | 1,76 | 1,23 | 0,906 | 0,696 | 0,575 | 0,510 | 0,491 | 0,505 | 0,530 | 0,574 | 0,636 | 0,686 | 0,726 | 0,755          | 0,769 | 1,063 |
| 510           | 9,14               | 6,63 | 4,24 | 2,64 | 1,77 | 1,24 | 0,908 | 0,695 | 0,573 | 0,507 | 0,487 | 0,499 | 0,524 | 0,566 | 0,626 | 0,674 | 0,713 | 0,742          | 0,755 | 1,081 |
| 520           | 9,24               | 6,68 | 4,28 | 2,66 | 1,78 | 1,25 | 0,911 | 0,694 | 0,571 | 0,505 | 0,483 | 0,495 | 0,520 | 0,559 | 0,618 | 0,663 | 0,702 | 0,731          | 0,742 | 1,097 |
| 530           | 9,34               | 6,76 | 4,32 | 2,66 | 1,79 | 1,26 | 0,915 | 0,693 | 0,569 | 0,501 | 0,480 | 0,490 | 0,515 | 0,532 | 0,608 | 0,654 | 0,691 | 0,721          | 0,734 | 1,113 |
| 540           | 9,45               | 6,78 | 4,36 | 2,68 | 1,81 | 1,26 | 0,918 | 0,693 | 0,569 | 0,499 | 0,477 | 0,486 | 0,510 | 0,547 | 0,597 | 0,644 | 0,681 | 0,711          | 0,724 | 1,128 |
| 550           | 9,51               | 6,80 | 4,40 | 2,72 | 1,82 | 1,27 | 0,924 | 0,696 | 0,566 | 0,495 | 0,472 | 0,482 | 0,504 | 0,546 | 0,587 | 0,635 | 0,672 | 0,703          | 0,715 | 1,145 |
| 560           | 9,62               | 6,82 | 4,41 | 2,71 | 1,83 | 1,27 | 0,925 | 0,695 | 0,566 | 0,492 | 0,470 | 0,479 | 0,499 | 0,534 | 0,579 | 0,626 | 0,663 | 0,695          | 0,706 | 1,152 |
| 570           | 9,69               | 6,86 | 4,45 | 2,71 | 1,83 | 1,27 | 0,925 | 0,696 | 0,567 | 0,491 | 0,468 | 0,476 | 0,494 | 0,528 | 0,572 | 0,621 | 0,656 | 0,689          | 0,701 | 1,162 |
| 580           | 9,81               | 6,91 | 4,47 | 2,72 | 1,84 | 1,28 | 0,925 | 0,696 | 0,566 | 0,489 | 0,465 | 0,472 | 0,489 | 0,521 | 0,564 | 0,613 | 0,648 | 0,681          | 0,696 | 1,174 |
| 590           | 9,89               | 6,95 | 4,49 | 2,73 | 1,85 | 1,28 | 0,925 | 0,696 | 0,565 | 0,487 | 0,464 | 0,470 | 0,485 | 0,517 | 0,557 | 0,607 | 0,641 | 0,676          | 0,689 | 1,184 |
| 600           | 9,98               | 6,99 | 4,52 | 2,75 | 1,85 | 1,27 | 0,925 | 0,697 | 0,564 | 0,485 | 0,462 | 0,466 | 0,481 | 0,510 | 0,550 | 0,598 | 0,631 | 0,667          | 0,679 | 1,194 |
| 610           | 10,02              | 7,00 | 4,52 | 2,75 | 1,86 | 1,28 | 0,927 | 0,699 | 0,563 | 0,483 | 0,459 | 0,464 | 0,476 | 0,505 | 0,544 | 0,592 | 0,625 | 0,661          | 0,673 | 1,201 |
| 620           | 10,06              | 7,04 | 4,53 | 2,75 | 1,86 | 1,28 | 0,927 | 0,699 | 0,562 | 0,482 | 0,457 | 0,461 | 0,474 | 0,502 | 0,538 | 0,586 | 0,621 | 0,657          | 0,669 | 1,207 |
| 630           | 10,11              | 7,06 | 4,54 | 2,77 | 1,87 | 1,28 | 0,926 | 0,699 | 0,562 | 0,480 | 0,455 | 0,459 | 0,471 | 0,497 | 0,533 | 0,580 | 0,616 | 0,652          | 0,665 | 1,215 |
| 640           | 10,15              | 7,08 | 4,55 | 2,77 | 1,87 | 1,28 | 0,926 | 0,699 | 0,562 | 0,479 | 0,453 | 0,456 | 0,468 | 0,493 | 0,527 | 0,575 | 0,611 | 0,649          | 0,663 | 1,220 |
| 650           | 10,20              | 7,10 | 4,56 | 2,77 | 1,87 | 1,29 | 0,926 | 0,700 | 0,562 | 0,479 | 0,452 | 0,454 | 0,465 | 0,489 | 0,523 | 0,571 | 0,608 | 0,645          | 0,660 | 1,225 |
| 660           | 10,25              | 7,11 | 4,57 | 2,78 | 1,88 | 1,29 | 0,926 | 0,701 | 0,562 | 0,478 | 0,451 | 0,452 | 0,463 | 0,486 | 0,519 | 0,568 | 0,605 | 0,642          | 0,659 | 1,231 |
| 670           | 10,33              | 7,14 | 4,58 | 2,79 | 1,88 | 1,29 | 0,926 | 0,702 | 0,561 | 0,477 | 0,449 | 0,449 | 0,459 | 0,481 | 0,513 | 0,563 | 0,601 | 0,638          | 0,655 | 1,238 |
| 680           | 10,39              | 7,15 | 4,58 | 2,80 | 1,88 | 1,29 | 0,926 | 0,703 | 0,561 | 0,476 | 0,447 | 0,447 | 0,457 | 0,478 | 0,509 | 0,559 | 0,596 | 0,636          | 0,652 | 1,242 |
| 690           | 10,44              | 7,19 | 4,59 | 2,80 | 1,88 | 1,30 | 0,926 | 0,704 | 0,561 | 0,475 | 0,446 | 0,445 | 0,454 | 0,475 | 0,506 | 0,555 | 0,593 | 0,633          | 0,650 | 1,248 |
| 700           | 10,46              | 7,21 | 4,59 | 2,80 | 1,88 | 1,30 | 0,926 | 0,705 | 0,562 | 0,475 | 0,445 | 0,444 | 0,453 | 0,474 | 0,505 | 0,553 | 0,593 | 0,631          | 0,649 | 1,249 |
| 710           | 10,46              | 7,21 | 4,59 | 2,81 | 1,88 | 1,30 | 0,926 | 0,707 | 0,563 | 0,475 | 0,445 | 0,443 | 0,452 | 0,471 | 0,502 | 0,551 | 0,591 | 0,631          | 0,650 | 1,253 |
| 720           | 10,46              | 7,20 | 4,59 | 2,81 | 1,88 | 1,30 | 0,925 | 0,708 | 0,564 | 0,475 | 0,445 | 0,442 | 0,453 | 0,470 | 0,501 | 0,551 | 0,590 | 0,632          | 0,652 | 1,252 |
| 730           | 10,48              | 7,20 | 4,59 | 2,81 | 1,87 | 1,30 | 0,925 | 0,708 | 0,563 | 0,474 | 0,445 | 0,441 | 0,451 | 0,468 | 0,498 | 0,547 | 0,589 | 0,630          | 0,653 | 1,253 |
| 740           | 10,48              | 7,21 | 4,60 | 2,81 | 1,88 | 1,30 | 0,925 | 0,709 | 0,564 | 0,474 | 0,444 | 0,440 | 0,450 | 0,466 | 0,495 | 0,544 | 0,588 | 0,629          | 0,651 | 1,257 |
| 750           | 10,50              | 7,23 | 4,59 | 2,82 | 1,88 | 1,30 | 0,926 | 0,709 | 0,564 | 0,474 | 0,444 | 0,439 | 0,448 | 0,463 | 0,492 | 0,543 | 0,586 | 0,628          | 0,652 | 1,259 |
| 760           | 10,52              | 7,27 | 4,60 | 2,83 | 1,88 | 1,30 | 0,927 | 0,710 | 0,564 | 0,475 | 0,443 | 0,438 | 0,446 | 0,461 | 0,488 | 0,541 | 0,585 | 0,627          | 0,653 | 1,265 |

Таблица 3

| $\lambda$<br>ммк | $\exp(-\tau_0 \sec \vartheta)$ |       |       |       |       |       |       |       |        |
|------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                  | 0°                             | 10°   | 20°   | 30°   | 40°   | 50°   | 60°   | 70°   | 80°    |
| 380              | 0,482                          | 0,477 | 0,460 | 0,431 | 0,385 | 0,321 | 0,232 | 0,118 | 0,0150 |
| 390              | 0,509                          | 0,504 | 0,487 | 0,458 | 0,414 | 0,350 | 0,259 | 0,139 | 0,0204 |
| 400              | 0,533                          | 0,528 | 0,512 | 0,483 | 0,440 | 0,376 | 0,284 | 0,159 | 0,0266 |
| 410              | 0,555                          | 0,549 | 0,534 | 0,506 | 0,463 | 0,400 | 0,308 | 0,178 | 0,0335 |
| 420              | 0,575                          | 0,570 | 0,555 | 0,527 | 0,485 | 0,423 | 0,331 | 0,198 | 0,0413 |
| 430              | 0,594                          | 0,589 | 0,574 | 0,547 | 0,507 | 0,445 | 0,353 | 0,218 | 0,0497 |
| 440              | 0,612                          | 0,607 | 0,592 | 0,567 | 0,526 | 0,465 | 0,374 | 0,237 | 0,0588 |
| 450              | 0,628                          | 0,624 | 0,609 | 0,584 | 0,544 | 0,485 | 0,394 | 0,256 | 0,0686 |
| 460              | 0,643                          | 0,639 | 0,625 | 0,601 | 0,562 | 0,503 | 0,414 | 0,275 | 0,0786 |
| 470              | 0,658                          | 0,654 | 0,640 | 0,617 | 0,579 | 0,521 | 0,433 | 0,294 | 0,0896 |
| 480              | 0,670                          | 0,667 | 0,654 | 0,631 | 0,594 | 0,537 | 0,450 | 0,311 | 0,100  |
| 490              | 0,683                          | 0,679 | 0,667 | 0,644 | 0,608 | 0,553 | 0,467 | 0,328 | 0,111  |
| 500              | 0,694                          | 0,691 | 0,679 | 0,657 | 0,621 | 0,567 | 0,482 | 0,344 | 0,123  |
| 510              | 0,706                          | 0,702 | 0,690 | 0,668 | 0,634 | 0,581 | 0,498 | 0,361 | 0,134  |
| 520              | 0,715                          | 0,712 | 0,700 | 0,679 | 0,646 | 0,594 | 0,512 | 0,375 | 0,145  |
| 530              | 0,725                          | 0,721 | 0,710 | 0,689 | 0,657 | 0,606 | 0,525 | 0,390 | 0,156  |
| 540              | 0,733                          | 0,730 | 0,719 | 0,699 | 0,667 | 0,617 | 0,538 | 0,404 | 0,167  |
| 550              | 0,741                          | 0,738 | 0,727 | 0,708 | 0,677 | 0,628 | 0,550 | 0,417 | 0,178  |
| 560              | 0,750                          | 0,746 | 0,736 | 0,717 | 0,686 | 0,639 | 0,562 | 0,430 | 0,190  |
| 570              | 0,756                          | 0,753 | 0,743 | 0,724 | 0,695 | 0,648 | 0,572 | 0,442 | 0,200  |
| 580              | 0,764                          | 0,760 | 0,750 | 0,732 | 0,703 | 0,657 | 0,583 | 0,454 | 0,211  |
| 590              | 0,769                          | 0,766 | 0,757 | 0,739 | 0,710 | 0,665 | 0,592 | 0,465 | 0,221  |
| 600              | 0,776                          | 0,773 | 0,763 | 0,746 | 0,718 | 0,674 | 0,602 | 0,476 | 0,232  |
| 610              | 0,782                          | 0,779 | 0,769 | 0,752 | 0,725 | 0,682 | 0,611 | 0,487 | 0,242  |
| 620              | 0,787                          | 0,784 | 0,775 | 0,759 | 0,732 | 0,689 | 0,620 | 0,497 | 0,252  |
| 630              | 0,793                          | 0,790 | 0,781 | 0,764 | 0,738 | 0,696 | 0,628 | 0,507 | 0,262  |
| 640              | 0,797                          | 0,795 | 0,786 | 0,770 | 0,744 | 0,703 | 0,636 | 0,516 | 0,271  |
| 650              | 0,801                          | 0,799 | 0,791 | 0,775 | 0,750 | 0,709 | 0,643 | 0,525 | 0,281  |
| 660              | 0,806                          | 0,804 | 0,795 | 0,780 | 0,755 | 0,715 | 0,650 | 0,533 | 0,289  |
| 670              | 0,811                          | 0,808 | 0,800 | 0,785 | 0,760 | 0,721 | 0,657 | 0,541 | 0,298  |
| 680              | 0,815                          | 0,812 | 0,804 | 0,789 | 0,765 | 0,727 | 0,664 | 0,549 | 0,307  |
| 690              | 0,819                          | 0,816 | 0,808 | 0,793 | 0,770 | 0,732 | 0,670 | 0,557 | 0,316  |
| 700              | 0,822                          | 0,820 | 0,812 | 0,797 | 0,774 | 0,737 | 0,676 | 0,564 | 0,323  |
| 710              | 0,826                          | 0,823 | 0,816 | 0,802 | 0,779 | 0,742 | 0,682 | 0,571 | 0,332  |
| 720              | 0,829                          | 0,826 | 0,819 | 0,805 | 0,783 | 0,747 | 0,687 | 0,577 | 0,339  |
| 730              | 0,832                          | 0,830 | 0,822 | 0,808 | 0,786 | 0,751 | 0,692 | 0,584 | 0,346  |
| 740              | 0,835                          | 0,833 | 0,825 | 0,812 | 0,790 | 0,755 | 0,697 | 0,590 | 0,354  |
| 750              | 0,838                          | 0,836 | 0,828 | 0,815 | 0,794 | 0,760 | 0,702 | 0,596 | 0,361  |
| 760              | 0,841                          | 0,839 | 0,832 | 0,819 | 0,798 | 0,764 | 0,707 | 0,603 | 0,368  |

Таблица 4

| $\lambda$<br>ммк | $R (\tau_0, \delta)$ |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  | 0°                   | 10°   | 20°   | 30°   | 40°   | 50°   | 60°   | 70°   | 80°   |
| 380              | 2,259                | 2,250 | 2,221 | 2,170 | 2,092 | 1,976 | 1,808 | 1,570 | 1,271 |
| 390              | 2,246                | 2,237 | 2,210 | 2,162 | 2,087 | 1,977 | 1,815 | 1,581 | 1,275 |
| 400              | 2,234                | 2,225 | 2,200 | 2,155 | 2,083 | 1,978 | 1,821 | 1,590 | 1,280 |
| 410              | 2,226                | 2,215 | 2,191 | 2,148 | 2,080 | 1,979 | 1,827 | 1,600 | 1,285 |
| 420              | 2,212                | 2,205 | 2,182 | 2,141 | 2,077 | 1,979 | 1,833 | 1,609 | 1,291 |
| 430              | 2,203                | 2,196 | 2,174 | 2,135 | 2,073 | 1,980 | 1,838 | 1,619 | 1,297 |
| 440              | 2,194                | 2,188 | 2,167 | 2,129 | 2,071 | 1,981 | 1,844 | 1,628 | 1,304 |
| 450              | 2,186                | 2,179 | 2,160 | 2,124 | 2,068 | 1,982 | 1,849 | 1,638 | 1,311 |
| 460              | 2,178                | 2,172 | 2,154 | 2,119 | 2,065 | 1,982 | 1,854 | 1,647 | 1,319 |
| 470              | 2,171                | 2,165 | 2,147 | 2,115 | 2,063 | 1,983 | 1,858 | 1,656 | 1,327 |
| 480              | 2,165                | 2,159 | 2,142 | 2,110 | 2,060 | 1,983 | 1,862 | 1,664 | 1,334 |
| 490              | 2,158                | 2,153 | 2,136 | 2,106 | 2,058 | 1,984 | 1,867 | 1,673 | 1,342 |
| 500              | 2,153                | 2,147 | 2,131 | 2,103 | 2,056 | 1,984 | 1,871 | 1,681 | 1,351 |
| 510              | 2,147                | 2,142 | 2,127 | 2,099 | 2,055 | 1,985 | 1,875 | 1,689 | 1,360 |
| 520              | 2,142                | 2,137 | 2,123 | 2,096 | 2,053 | 1,985 | 1,878 | 1,696 | 1,368 |
| 530              | 2,138                | 2,133 | 2,119 | 2,093 | 2,051 | 1,986 | 1,881 | 1,703 | 1,376 |
| 540              | 2,134                | 2,129 | 2,115 | 2,090 | 2,050 | 1,986 | 1,884 | 1,710 | 1,384 |
| 550              | 2,130                | 2,125 | 2,112 | 2,087 | 2,048 | 1,987 | 1,887 | 1,716 | 1,392 |
| 560              | 2,125                | 2,121 | 2,108 | 2,085 | 2,047 | 1,987 | 1,890 | 1,722 | 1,401 |
| 570              | 2,122                | 2,118 | 2,105 | 2,083 | 2,045 | 1,987 | 1,833 | 1,728 | 1,408 |
| 580              | 2,118                | 2,115 | 2,102 | 2,080 | 2,044 | 1,988 | 1,896 | 1,734 | 1,416 |
| 590              | 2,116                | 2,112 | 2,100 | 2,078 | 2,043 | 1,988 | 1,898 | 1,739 | 1,424 |
| 600              | 2,112                | 2,108 | 2,097 | 2,076 | 2,042 | 1,988 | 1,900 | 1,745 | 1,432 |
| 610              | 2,109                | 2,105 | 2,095 | 2,074 | 2,041 | 1,989 | 1,903 | 1,750 | 1,439 |
| 620              | 2,106                | 2,103 | 2,092 | 2,072 | 2,040 | 1,989 | 1,905 | 1,755 | 1,447 |
| 630              | 2,104                | 2,100 | 2,090 | 2,071 | 2,039 | 1,989 | 1,907 | 1,760 | 1,454 |
| 640              | 2,102                | 2,098 | 2,088 | 2,069 | 2,038 | 1,989 | 1,909 | 1,764 | 1,461 |
| 650              | 2,100                | 2,096 | 2,086 | 2,067 | 2,037 | 1,990 | 1,911 | 1,769 | 1,468 |
| 660              | 2,097                | 2,094 | 2,084 | 2,066 | 2,037 | 1,990 | 1,913 | 1,773 | 1,474 |
| 670              | 2,094                | 2,092 | 2,082 | 2,064 | 2,036 | 1,990 | 1,914 | 1,776 | 1,481 |
| 680              | 2,092                | 2,090 | 2,080 | 2,063 | 2,035 | 1,990 | 1,916 | 1,780 | 1,487 |
| 690              | 2,090                | 2,088 | 2,079 | 2,062 | 2,034 | 1,990 | 1,918 | 1,784 | 1,494 |
| 700              | 2,089                | 2,086 | 2,077 | 2,061 | 2,034 | 1,991 | 1,919 | 1,788 | 1,499 |
| 710              | 2,087                | 2,084 | 2,075 | 2,059 | 2,033 | 1,991 | 1,920 | 1,791 | 1,506 |
| 720              | 2,086                | 2,083 | 2,074 | 2,058 | 2,032 | 1,991 | 1,922 | 1,794 | 1,511 |
| 730              | 2,084                | 2,081 | 2,073 | 2,057 | 2,032 | 1,991 | 1,923 | 1,797 | 1,516 |
| 740              | 2,082                | 2,080 | 2,072 | 2,056 | 2,031 | 1,991 | 1,924 | 1,800 | 1,522 |
| 750              | 2,081                | 2,078 | 2,070 | 2,055 | 2,031 | 1,991 | 1,926 | 1,803 | 1,527 |
| 760              | 2,080                | 2,077 | 2,069 | 2,054 | 2,030 | 1,992 | 1,927 | 1,807 | 1,533 |

Таблица 5

| $\lambda$<br>ммк | $\frac{1}{\pi} \cos i I (\lambda) 10^{-3}$ кал/см <sup>2</sup> мин. стер. ммк |       |       |       |       |       |       |       |        |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                  | 0°                                                                            | 10°   | 20°   | 30°   | 40°   | 50°   | 60°   | 70°   | 80°    |
| 380              | 0,564                                                                         | 0,555 | 0,530 | 0,488 | 0,432 | 0,363 | 0,282 | 0,193 | 0,0979 |
| 390              | 0,513                                                                         | 0,505 | 0,482 | 0,444 | 0,393 | 0,330 | 0,256 | 0,175 | 0,0891 |
| 400              | 0,706                                                                         | 0,695 | 0,663 | 0,611 | 0,541 | 0,454 | 0,353 | 0,241 | 0,123  |
| 410              | 0,889                                                                         | 0,875 | 0,835 | 0,770 | 0,681 | 0,571 | 0,444 | 0,304 | 0,154  |
| 420              | 0,880                                                                         | 0,867 | 0,827 | 0,762 | 0,674 | 0,566 | 0,440 | 0,301 | 0,153  |
| 430              | 0,816                                                                         | 0,804 | 0,767 | 0,707 | 0,625 | 0,525 | 0,408 | 0,279 | 0,142  |
| 440              | 0,930                                                                         | 0,916 | 0,874 | 0,805 | 0,712 | 0,598 | 0,465 | 0,318 | 0,161  |
| 450              | 1,008                                                                         | 0,993 | 0,947 | 0,873 | 0,772 | 0,648 | 0,504 | 0,345 | 0,175  |
| 460              | 0,990                                                                         | 0,975 | 0,930 | 0,857 | 0,758 | 0,636 | 0,495 | 0,339 | 0,172  |
| 470              | 0,995                                                                         | 0,980 | 0,935 | 0,862 | 0,762 | 0,640 | 0,498 | 0,340 | 0,173  |
| 480              | 0,990                                                                         | 0,975 | 0,930 | 0,857 | 0,758 | 0,636 | 0,495 | 0,339 | 0,172  |
| 490              | 0,912                                                                         | 0,898 | 0,857 | 0,790 | 0,699 | 0,586 | 0,456 | 0,312 | 0,158  |
| 500              | 0,908                                                                         | 0,894 | 0,853 | 0,786 | 0,696 | 0,584 | 0,454 | 0,311 | 0,158  |
| 510              | 0,898                                                                         | 0,884 | 0,844 | 0,778 | 0,688 | 0,577 | 0,449 | 0,307 | 0,156  |
| 520              | 0,857                                                                         | 0,844 | 0,805 | 0,742 | 0,656 | 0,551 | 0,428 | 0,293 | 0,149  |
| 530              | 0,894                                                                         | 0,880 | 0,840 | 0,774 | 0,685 | 0,575 | 0,447 | 0,306 | 0,155  |
| 540              | 0,908                                                                         | 0,894 | 0,853 | 0,786 | 0,696 | 0,584 | 0,454 | 0,311 | 0,158  |
| 550              | 0,894                                                                         | 0,880 | 0,840 | 0,774 | 0,685 | 0,575 | 0,447 | 0,306 | 0,155  |
| 560              | 0,871                                                                         | 0,858 | 0,818 | 0,754 | 0,667 | 0,560 | 0,436 | 0,298 | 0,151  |
| 570              | 0,857                                                                         | 0,844 | 0,805 | 0,742 | 0,656 | 0,551 | 0,428 | 0,293 | 0,149  |
| 580              | 0,857                                                                         | 0,844 | 0,805 | 0,742 | 0,656 | 0,551 | 0,428 | 0,293 | 0,149  |
| 590              | 0,843                                                                         | 0,830 | 0,792 | 0,730 | 0,646 | 0,542 | 0,422 | 0,288 | 0,146  |
| 600              | 0,830                                                                         | 0,817 | 0,780 | 0,719 | 0,636 | 0,534 | 0,415 | 0,284 | 0,144  |
| 610              | 0,811                                                                         | 0,799 | 0,762 | 0,702 | 0,621 | 0,521 | 0,406 | 0,277 | 0,141  |
| 620              | 0,798                                                                         | 0,786 | 0,750 | 0,691 | 0,611 | 0,513 | 0,399 | 0,273 | 0,139  |
| 630              | 0,779                                                                         | 0,767 | 0,732 | 0,675 | 0,597 | 0,501 | 0,390 | 0,266 | 0,135  |
| 640              | 0,761                                                                         | 0,749 | 0,715 | 0,659 | 0,583 | 0,489 | 0,380 | 0,260 | 0,132  |
| 650              | 0,743                                                                         | 0,732 | 0,698 | 0,643 | 0,569 | 0,478 | 0,372 | 0,254 | 0,129  |
| 660              | 0,729                                                                         | 0,718 | 0,685 | 0,631 | 0,558 | 0,469 | 0,364 | 0,249 | 0,127  |
| 670              | 0,710                                                                         | 0,699 | 0,667 | 0,615 | 0,544 | 0,456 | 0,355 | 0,243 | 0,123  |
| 680              | 0,692                                                                         | 0,681 | 0,650 | 0,599 | 0,530 | 0,445 | 0,346 | 0,237 | 0,120  |
| 690              | 0,678                                                                         | 0,668 | 0,637 | 0,587 | 0,519 | 0,436 | 0,339 | 0,232 | 0,118  |
| 700              | 0,660                                                                         | 0,650 | 0,620 | 0,572 | 0,506 | 0,424 | 0,330 | 0,226 | 0,115  |
| 710              | 0,646                                                                         | 0,636 | 0,607 | 0,559 | 0,495 | 0,415 | 0,323 | 0,221 | 0,112  |
| 720              | 0,628                                                                         | 0,618 | 0,590 | 0,544 | 0,481 | 0,404 | 0,314 | 0,215 | 0,109  |
| 730              | 0,614                                                                         | 0,605 | 0,577 | 0,532 | 0,470 | 0,395 | 0,307 | 0,210 | 0,107  |
| 740              | 0,596                                                                         | 0,587 | 0,560 | 0,516 | 0,457 | 0,383 | 0,298 | 0,204 | 0,103  |
| 750              | 0,582                                                                         | 0,573 | 0,547 | 0,504 | 0,446 | 0,376 | 0,291 | 0,199 | 0,101  |
| 760              | 0,564                                                                         | 0,555 | 0,530 | 0,488 | 0,432 | 0,363 | 0,282 | 0,193 | 0,0979 |

Угол рассеяния (в долях градуса)

| $\theta^\circ$ | $\varphi^\circ$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |
|----------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                | 10              | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100.  | 110   | 120    | 130    | 140    | 150    | 160    | 170    |
| $i=10^\circ$   |                 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |
| 10             | 1,78            | 3,45  | 5,15  | 6,81  | 8,42  | 9,96  | 11,43 | 12,82 | 14,11 | 15,29 | 16,35 | 17,30  | 18,11  | 18,78  | 19,31  | 19,69  | 19,92  |
| 20             | 10,29           | 11,12 | 12,35 | 13,85 | 15,51 | 17,23 | 18,96 | 20,65 | 22,27 | 23,78 | 25,16 | 26,40  | 27,47  | 28,37  | 29,07  | 29,59  | 29,89  |
| 30             | 20,22           | 20,86 | 21,87 | 23,16 | 24,68 | 26,33 | 28,05 | 29,78 | 31,47 | 33,09 | 34,59 | 35,95  | 37,14  | 38,13  | 38,98  | 39,50  | 39,85  |
| 40             | 30,19           | 30,76 | 31,67 | 32,87 | 34,29 | 35,87 | 37,55 | 39,27 | 40,97 | 42,61 | 44,13 | 45,82  | 47,04  | 48,09  | 48,93  | 49,54  | 49,91  |
| 50             | 40,14           | 40,66 | 41,50 | 42,61 | 43,94 | 45,74 | 47,36 | 49,05 | 50,76 | 52,43 | 54,03 | 55,50  | 56,81  | 57,92  | 58,82  | 59,47  | 59,87  |
| 60             | 50,21           | 50,71 | 51,51 | 52,60 | 53,92 | 55,42 | 57,06 | 58,77 | 60,50 | 62,21 | 63,83 | 65,34  | 66,69  | 67,84  | 68,77  | 69,45  | 69,86  |
| 70             | 60,16           | 60,65 | 61,44 | 62,50 | 63,79 | 65,27 | 66,88 | 68,58 | 70,32 | 72,03 | 73,68 | 75,21  | 76,59  | 77,77  | 78,73  | 79,43  | 79,86  |
| 80             | 70,16           | 70,63 | 71,39 | 72,42 | 73,68 | 75,14 | 76,73 | 78,42 | 80,15 | 81,88 | 83,54 | 85,09  | 86,50  | 87,71  | 88,69  | 89,41  | 89,85  |
| 90             | 80,15           | 80,61 | 81,35 | 82,36 | 83,59 | 85,02 | 86,60 | 88,27 | 90,00 | 91,73 | 93,40 | 94,98  | 96,41  | 97,64  | 98,65  | 99,39  | 99,85  |
| $i=20^\circ$   |                 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |
| 20             | 3,40            | 6,80  | 10,15 | 13,43 | 16,62 | 19,69 | 22,62 | 25,40 | 27,99 | 30,38 | 32,54 | 34,45  | 36,10  | 37,48  | 38,56  | 39,33  | 39,80  |
| 30             | 10,82           | 12,97 | 15,87 | 19,13 | 22,52 | 25,93 | 29,27 | 32,49 | 35,52 | 38,34 | 40,90 | 43,16  | 45,41  | 47,03  | 48,33  | 49,27  | 49,85  |
| 40             | 20,55           | 22,11 | 24,46 | 27,34 | 30,55 | 33,92 | 37,32 | 40,66 | 43,84 | 47,12 | 49,90 | 52,43  | 54,66  | 56,54  | 58,03  | 59,12  | 59,78  |
| 50             | 30,45           | 31,76 | 33,80 | 36,40 | 39,39 | 42,61 | 46,20 | 49,54 | 52,86 | 56,05 | 59,04 | 61,77  | 64,18  | 66,21  | 67,84  | 69,03  | 69,76  |
| 60             | 40,36           | 41,51 | 43,31 | 45,96 | 48,74 | 51,85 | 55,18 | 58,58 | 61,98 | 65,27 | 68,37 | 71,23  | 73,77  | 75,94  | 77,68  | 78,96  | 79,74  |
| 70             | 50,40           | 51,46 | 53,16 | 55,42 | 58,13 | 61,18 | 64,45 | 67,84 | 71,25 | 74,60 | 77,79 | 80,75  | 83,41  | 85,69  | 87,53  | 88,89  | 89,72  |
| 80             | 60,34           | 61,34 | 62,94 | 65,09 | 67,69 | 70,63 | 73,84 | 77,19 | 80,61 | 83,99 | 87,25 | 90,30  | 93,06  | 95,44  | 97,38  | 98,82  | 99,70  |
| 90             | 70,32           | 71,25 | 72,77 | 74,81 | 77,30 | 80,15 | 83,28 | 86,60 | 90,00 | 93,40 | 96,72 | 99,85  | 102,70 | 105,19 | 107,23 | 108,75 | 109,68 |
| $i=30^\circ$   |                 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |
| 30             | 5,00            | 9,96  | 14,87 | 19,69 | 24,40 | 28,96 | 33,33 | 37,48 | 41,35 | 45,20 | 48,42 | 51,34  | 53,90  | 56,05  | 57,76  | 59,00  | 59,75  |
| 40             | 11,50           | 15,11 | 19,65 | 24,55 | 29,54 | 34,50 | 39,31 | 43,89 | 48,50 | 52,60 | 56,40 | 59,82  | 62,82  | 65,34  | 67,35  | 68,81  | 69,70  |
| 50             | 20,95           | 23,57 | 27,33 | 31,78 | 36,58 | 41,51 | 46,66 | 51,47 | 56,18 | 60,65 | 64,81 | 68,58  | 71,91  | 74,74  | 77,00  | 78,65  | 79,66  |
| 60             | 30,74           | 32,87 | 36,09 | 40,09 | 44,51 | 49,54 | 54,48 | 59,46 | 64,34 | 69,03 | 73,45 | 77,50  | 81,10  | 84,19  | 86,67  | 88,50  | 89,62  |
| 70             | 40,59           | 42,38 | 45,47 | 49,05 | 53,27 | 57,92 | 62,81 | 67,80 | 72,77 | 77,61 | 82,21 | 86,49  | 90,33  | 93,65  | 96,36  | 98,36  | 99,59  |
| 80             | 50,59           | 52,20 | 54,78 | 58,16 | 62,17 | 66,64 | 71,41 | 76,36 | 81,35 | 86,28 | 91,03 | 95,50  | 99,56  | 103,11 | 106,02 | 108,20 | 109,54 |
| 90             | 60,50           | 61,98 | 64,34 | 67,48 | 71,25 | 75,52 | 80,15 | 85,02 | 90,00 | 94,98 | 99,85 | 104,48 | 108,75 | 112,52 | 115,66 | 118,02 | 119,50 |

| φ°    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 8°    | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   | 110    | 120    | 130    | 140    | 150    | 160    | 170    |
| i=40° |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |
| 40    | 6,42  | 12,81 | 19,15 | 25,40 | 31,52 | 37,48 | 43,17 | 48,86 | 54,08 | 59,00 | 63,54  | 67,65  | 71,26  | 74,32  | 76,76  | 78,55  | 79,63  |
| 50    | 12,22 | 17,23 | 23,24 | 29,58 | 36,00 | 42,31 | 48,69 | 54,70 | 60,50 | 65,99 | 71,10  | 75,75  | 79,87  | 83,38  | 86,22  | 88,30  | 89,57  |
| 60    | 21,37 | 25,02 | 30,10 | 35,95 | 42,12 | 48,65 | 55,02 | 61,34 | 67,48 | 73,36 | 78,89  | 83,99  | 88,56  | 92,49  | 95,69  | 98,05  | 99,51  |
| 70    | 31,03 | 33,94 | 38,25 | 43,45 | 49,48 | 55,67 | 62,06 | 68,48 | 74,81 | 80,96 | 86,82  | 92,29  | 97,25  | 101,58 | 105,14 | 107,79 | 109,44 |
| 80    | 40,80 | 43,19 | 47,15 | 51,85 | 57,32 | 63,29 | 69,54 | 75,94 | 82,36 | 88,68 | 94,79  | 100,57 | 105,90 | 110,60 | 114,53 | 117,50 | 119,37 |
| 90    | 50,76 | 52,86 | 56,18 | 60,50 | 65,60 | 71,25 | 77,30 | 83,59 | 90,00 | 96,41 | 102,70 | 108,75 | 114,40 | 119,50 | 123,82 | 127,14 | 129,24 |
| i=50° |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |
| 50    | 7,65  | 15,29 | 22,87 | 30,38 | 37,76 | 45,20 | 52,15 | 59,00 | 65,60 | 71,86 | 77,73  | 83,12  | 87,94  | 92,08  | 95,45  | 97,95  | 99,48  |
| 60    | 12,91 | 19,13 | 26,37 | 33,94 | 41,54 | 49,27 | 56,75 | 64,11 | 71,25 | 78,10 | 84,58  | 90,59  | 96,03  | 100,77 | 104,66 | 107,58 | 109,39 |
| 70    | 21,76 | 26,32 | 32,51 | 39,50 | 47,05 | 54,57 | 62,22 | 69,83 | 77,30 | 84,56 | 91,51  | 98,05  | 104,06 | 109,37 | 113,80 | 117,17 | 119,28 |
| 80    | 31,29 | 34,85 | 40,06 | 46,51 | 53,39 | 60,74 | 68,31 | 75,96 | 83,59 | 91,11 | 98,42  | 105,40 | 111,92 | 117,79 | 122,80 | 126,66 | 129,12 |
| 90    | 40,97 | 43,84 | 48,50 | 54,08 | 60,50 | 67,48 | 74,81 | 82,86 | 90,00 | 97,64 | 105,19 | 112,52 | 119,50 | 125,92 | 131,50 | 136,16 | 139,03 |
| i=60° |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |
| 60    | 8,66  | 17,30 | 25,91 | 34,45 | 42,85 | 51,34 | 59,57 | 67,65 | 75,52 | 83,12 | 90,37  | 97,18  | 103,42 | 108,94 | 113,55 | 117,05 | 119,25 |
| 70    | 13,48 | 20,65 | 28,86 | 37,38 | 46,16 | 54,70 | 63,30 | 71,80 | 80,15 | 88,30 | 96,16  | 103,64 | 110,62 | 116,90 | 122,26 | 126,41 | 129,05 |
| 80    | 22,07 | 27,34 | 34,36 | 42,18 | 50,61 | 59,12 | 67,76 | 76,41 | 85,02 | 93,51 | 101,82 | 109,85 | 117,48 | 124,50 | 130,63 | 135,75 | 138,91 |
| 90    | 31,47 | 35,52 | 41,35 | 48,50 | 56,18 | 64,34 | 72,77 | 81,35 | 90,00 | 98,65 | 107,23 | 115,66 | 123,82 | 131,60 | 138,65 | 144,48 | 148,53 |
| i=70° |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |
| 70    | 9,39  | 18,78 | 28,15 | 37,48 | 46,89 | 56,05 | 65,23 | 74,32 | 83,28 | 92,08 | 100,66 | 108,94 | 116,78 | 124,01 | 130,33 | 135,60 | 138,87 |
| 80    | 13,89 | 21,72 | 30,59 | 39,76 | 49,19 | 58,53 | 67,92 | 77,29 | 86,60 | 95,81 | 104,90 | 113,79 | 122,37 | 130,46 | 137,98 | 144,13 | 148,43 |
| 90    | 22,27 | 27,99 | 35,52 | 43,84 | 52,86 | 61,98 | 71,25 | 80,61 | 90,00 | 99,39 | 108,75 | 118,02 | 127,14 | 136,16 | 144,48 | 152,01 | 157,73 |
| i=80° |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |
| 80    | 9,85  | 19,69 | 29,53 | 39,34 | 49,24 | 59,00 | 68,79 | 78,55 | 88,27 | 97,95 | 107,55 | 117,05 | 126,38 | 135,60 | 144,08 | 151,79 | 157,66 |
| 90    | 14,11 | 22,27 | 31,47 | 40,97 | 50,76 | 60,50 | 70,32 | 80,15 | 90,00 | 99,85 | 109,68 | 119,50 | 129,24 | 139,03 | 148,53 | 157,73 | 165,89 |

Коэффициент яркости для сферической индикатрисы рассеяния

| $\lambda$ ммк | $\vartheta^\circ$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  | $i = 0^\circ$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  | $i = 10^\circ$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               | 0                 | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    |  | 0             | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    |  | 0              | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    |       |
| 380           | 0,088             | 0,089 | 0,091 | 0,096 | 0,103 | 0,112 | 0,125 | 0,138 | 0,141 | 0,120 |  | 0,090         | 0,092 | 0,097 | 0,104 | 0,114 | 0,126 | 0,139 | 0,142 | 0,142 | 0,121 |  | 0,088          | 0,088 | 0,090 | 0,095 | 0,102 | 0,113 | 0,126 | 0,142 | 0,149 | 0,149 | 0,128 |
| 390           | 0,086             | 0,087 | 0,090 | 0,094 | 0,101 | 0,111 | 0,124 | 0,141 | 0,148 | 0,127 |  | 0,086         | 0,088 | 0,093 | 0,101 | 0,111 | 0,126 | 0,144 | 0,154 | 0,154 | 0,134 |  | 0,086          | 0,086 | 0,088 | 0,093 | 0,101 | 0,111 | 0,126 | 0,144 | 0,154 | 0,154 | 0,134 |
| 400           | 0,084             | 0,085 | 0,087 | 0,092 | 0,100 | 0,110 | 0,124 | 0,143 | 0,153 | 0,131 |  | 0,084         | 0,086 | 0,091 | 0,099 | 0,110 | 0,125 | 0,144 | 0,159 | 0,159 | 0,139 |  | 0,084          | 0,084 | 0,086 | 0,091 | 0,099 | 0,110 | 0,125 | 0,144 | 0,159 | 0,159 | 0,139 |
| 410           | 0,082             | 0,083 | 0,085 | 0,090 | 0,098 | 0,108 | 0,124 | 0,143 | 0,158 | 0,144 |  | 0,081         | 0,084 | 0,089 | 0,097 | 0,108 | 0,124 | 0,145 | 0,163 | 0,163 | 0,145 |  | 0,081          | 0,081 | 0,084 | 0,089 | 0,097 | 0,108 | 0,124 | 0,145 | 0,163 | 0,163 | 0,145 |
| 420           | 0,080             | 0,080 | 0,083 | 0,088 | 0,096 | 0,107 | 0,122 | 0,143 | 0,161 | 0,149 |  | 0,079         | 0,082 | 0,087 | 0,094 | 0,106 | 0,122 | 0,144 | 0,166 | 0,166 | 0,149 |  | 0,079          | 0,079 | 0,082 | 0,087 | 0,094 | 0,106 | 0,122 | 0,144 | 0,166 | 0,166 | 0,149 |
| 430           | 0,077             | 0,078 | 0,081 | 0,086 | 0,093 | 0,104 | 0,121 | 0,143 | 0,165 | 0,153 |  | 0,077         | 0,080 | 0,085 | 0,092 | 0,104 | 0,120 | 0,144 | 0,169 | 0,169 | 0,154 |  | 0,077          | 0,077 | 0,080 | 0,085 | 0,092 | 0,104 | 0,120 | 0,144 | 0,169 | 0,169 | 0,154 |
| 440           | 0,075             | 0,076 | 0,079 | 0,084 | 0,091 | 0,102 | 0,119 | 0,142 | 0,167 | 0,153 |  | 0,075         | 0,077 | 0,082 | 0,090 | 0,101 | 0,118 | 0,143 | 0,171 | 0,171 | 0,158 |  | 0,075          | 0,075 | 0,077 | 0,082 | 0,090 | 0,101 | 0,118 | 0,143 | 0,171 | 0,171 | 0,158 |
| 450           | 0,073             | 0,074 | 0,077 | 0,081 | 0,089 | 0,100 | 0,117 | 0,141 | 0,169 | 0,161 |  | 0,073         | 0,075 | 0,080 | 0,088 | 0,099 | 0,116 | 0,141 | 0,173 | 0,173 | 0,162 |  | 0,073          | 0,073 | 0,075 | 0,080 | 0,088 | 0,099 | 0,116 | 0,141 | 0,173 | 0,173 | 0,162 |
| 460           | 0,071             | 0,072 | 0,074 | 0,079 | 0,087 | 0,098 | 0,115 | 0,140 | 0,171 | 0,161 |  | 0,071         | 0,073 | 0,078 | 0,085 | 0,097 | 0,114 | 0,140 | 0,174 | 0,174 | 0,166 |  | 0,071          | 0,071 | 0,073 | 0,078 | 0,085 | 0,097 | 0,114 | 0,140 | 0,174 | 0,174 | 0,166 |
| 470           | 0,069             | 0,070 | 0,072 | 0,077 | 0,084 | 0,096 | 0,113 | 0,138 | 0,172 | 0,165 |  | 0,069         | 0,071 | 0,076 | 0,083 | 0,095 | 0,112 | 0,138 | 0,175 | 0,175 | 0,169 |  | 0,069          | 0,069 | 0,071 | 0,076 | 0,083 | 0,095 | 0,112 | 0,138 | 0,175 | 0,175 | 0,169 |
| 480           | 0,067             | 0,068 | 0,070 | 0,075 | 0,082 | 0,093 | 0,110 | 0,137 | 0,173 | 0,168 |  | 0,067         | 0,069 | 0,074 | 0,081 | 0,092 | 0,110 | 0,136 | 0,175 | 0,175 | 0,172 |  | 0,067          | 0,067 | 0,069 | 0,074 | 0,081 | 0,092 | 0,110 | 0,136 | 0,175 | 0,175 | 0,172 |
| 490           | 0,065             | 0,066 | 0,068 | 0,073 | 0,080 | 0,091 | 0,108 | 0,135 | 0,173 | 0,171 |  | 0,065         | 0,067 | 0,072 | 0,079 | 0,090 | 0,107 | 0,135 | 0,175 | 0,175 | 0,172 |  | 0,065          | 0,065 | 0,067 | 0,072 | 0,079 | 0,090 | 0,107 | 0,135 | 0,175 | 0,175 | 0,172 |
| 500           | 0,063             | 0,064 | 0,067 | 0,071 | 0,078 | 0,089 | 0,106 | 0,133 | 0,173 | 0,174 |  | 0,063         | 0,066 | 0,070 | 0,077 | 0,088 | 0,105 | 0,133 | 0,175 | 0,175 | 0,178 |  | 0,063          | 0,063 | 0,066 | 0,070 | 0,077 | 0,088 | 0,105 | 0,133 | 0,175 | 0,175 | 0,178 |
| 510           | 0,062             | 0,062 | 0,065 | 0,069 | 0,076 | 0,087 | 0,104 | 0,131 | 0,173 | 0,177 |  | 0,061         | 0,064 | 0,068 | 0,075 | 0,086 | 0,103 | 0,131 | 0,175 | 0,175 | 0,181 |  | 0,061          | 0,061 | 0,064 | 0,068 | 0,075 | 0,086 | 0,103 | 0,131 | 0,175 | 0,175 | 0,181 |
| 520           | 0,060             | 0,061 | 0,063 | 0,067 | 0,074 | 0,085 | 0,102 | 0,129 | 0,172 | 0,179 |  | 0,060         | 0,062 | 0,067 | 0,073 | 0,084 | 0,101 | 0,129 | 0,174 | 0,174 | 0,183 |  | 0,060          | 0,060 | 0,062 | 0,067 | 0,073 | 0,084 | 0,101 | 0,129 | 0,174 | 0,174 | 0,183 |
| 530           | 0,058             | 0,059 | 0,061 | 0,066 | 0,073 | 0,083 | 0,100 | 0,127 | 0,172 | 0,181 |  | 0,058         | 0,061 | 0,065 | 0,072 | 0,082 | 0,099 | 0,127 | 0,173 | 0,173 | 0,185 |  | 0,058          | 0,058 | 0,061 | 0,065 | 0,072 | 0,082 | 0,099 | 0,127 | 0,173 | 0,173 | 0,185 |
| 540           | 0,057             | 0,058 | 0,060 | 0,064 | 0,071 | 0,081 | 0,098 | 0,125 | 0,171 | 0,183 |  | 0,057         | 0,059 | 0,063 | 0,070 | 0,081 | 0,097 | 0,125 | 0,172 | 0,172 | 0,187 |  | 0,057          | 0,057 | 0,059 | 0,063 | 0,070 | 0,081 | 0,097 | 0,125 | 0,172 | 0,172 | 0,187 |
| 550           | 0,055             | 0,056 | 0,058 | 0,063 | 0,069 | 0,079 | 0,096 | 0,123 | 0,170 | 0,185 |  | 0,055         | 0,058 | 0,062 | 0,068 | 0,079 | 0,095 | 0,123 | 0,171 | 0,171 | 0,189 |  | 0,055          | 0,055 | 0,058 | 0,062 | 0,068 | 0,079 | 0,095 | 0,123 | 0,171 | 0,171 | 0,189 |
| 560           | 0,054             | 0,055 | 0,057 | 0,061 | 0,068 | 0,078 | 0,094 | 0,121 | 0,169 | 0,187 |  | 0,054         | 0,056 | 0,060 | 0,067 | 0,077 | 0,093 | 0,121 | 0,170 | 0,170 | 0,191 |  | 0,054          | 0,054 | 0,056 | 0,060 | 0,067 | 0,077 | 0,093 | 0,121 | 0,170 | 0,170 | 0,191 |
| 570           | 0,053             | 0,053 | 0,056 | 0,060 | 0,066 | 0,076 | 0,092 | 0,119 | 0,168 | 0,189 |  | 0,053         | 0,055 | 0,059 | 0,065 | 0,075 | 0,091 | 0,119 | 0,169 | 0,169 | 0,193 |  | 0,053          | 0,053 | 0,055 | 0,059 | 0,065 | 0,075 | 0,091 | 0,119 | 0,169 | 0,169 | 0,193 |
| 580           | 0,052             | 0,052 | 0,054 | 0,058 | 0,065 | 0,074 | 0,090 | 0,117 | 0,167 | 0,191 |  | 0,052         | 0,054 | 0,058 | 0,064 | 0,074 | 0,090 | 0,117 | 0,168 | 0,168 | 0,194 |  | 0,052          | 0,052 | 0,054 | 0,058 | 0,064 | 0,074 | 0,090 | 0,117 | 0,168 | 0,168 | 0,194 |
| 590           | 0,050             | 0,051 | 0,053 | 0,057 | 0,063 | 0,073 | 0,089 | 0,116 | 0,166 | 0,192 |  | 0,051         | 0,053 | 0,057 | 0,063 | 0,072 | 0,088 | 0,115 | 0,167 | 0,167 | 0,196 |  | 0,051          | 0,051 | 0,053 | 0,057 | 0,063 | 0,072 | 0,088 | 0,115 | 0,167 | 0,167 | 0,196 |
| 600           | 0,049             | 0,050 | 0,052 | 0,056 | 0,062 | 0,071 | 0,087 | 0,114 | 0,165 | 0,194 |  | 0,050         | 0,052 | 0,056 | 0,062 | 0,071 | 0,086 | 0,114 | 0,165 | 0,165 | 0,198 |  | 0,049          | 0,049 | 0,051 | 0,055 | 0,061 | 0,071 | 0,086 | 0,114 | 0,165 | 0,165 | 0,198 |
| 610           | 0,048             | 0,049 | 0,051 | 0,055 | 0,061 | 0,070 | 0,085 | 0,112 | 0,163 | 0,196 |  | 0,049         | 0,051 | 0,055 | 0,061 | 0,070 | 0,086 | 0,114 | 0,165 | 0,165 | 0,199 |  | 0,049          | 0,049 | 0,051 | 0,055 | 0,061 | 0,070 | 0,086 | 0,114 | 0,165 | 0,165 | 0,199 |
| 620           | 0,047             | 0,048 | 0,050 | 0,053 | 0,059 | 0,069 | 0,084 | 0,110 | 0,162 | 0,197 |  | 0,048         | 0,050 | 0,054 | 0,060 | 0,070 | 0,085 | 0,112 | 0,164 | 0,164 | 0,201 |  | 0,047          | 0,047 | 0,049 | 0,053 | 0,059 | 0,068 | 0,083 | 0,110 | 0,163 | 0,163 | 0,201 |
| 630           | 0,046             | 0,047 | 0,049 | 0,052 | 0,058 | 0,067 | 0,082 | 0,109 | 0,160 | 0,198 |  | 0,047         | 0,049 | 0,053 | 0,059 | 0,068 | 0,082 | 0,108 | 0,161 | 0,161 | 0,202 |  | 0,046          | 0,046 | 0,048 | 0,052 | 0,058 | 0,067 | 0,082 | 0,108 | 0,161 | 0,161 | 0,202 |
| 640           | 0,045             | 0,046 | 0,048 | 0,051 | 0,057 | 0,066 | 0,081 | 0,107 | 0,159 | 0,199 |  | 0,045         | 0,047 | 0,051 | 0,057 | 0,066 | 0,080 | 0,107 | 0,160 | 0,160 | 0,203 |  | 0,045          | 0,045 | 0,047 | 0,051 | 0,057 | 0,066 | 0,080 | 0,107 | 0,160 | 0,160 | 0,203 |
| 650           | 0,044             | 0,045 | 0,047 | 0,050 | 0,056 | 0,065 | 0,079 | 0,105 | 0,157 | 0,200 |  | 0,044         | 0,046 | 0,050 | 0,056 | 0,064 | 0,079 | 0,105 | 0,158 | 0,158 | 0,204 |  | 0,044          | 0,044 | 0,046 | 0,050 | 0,056 | 0,064 | 0,079 | 0,105 | 0,158 | 0,158 | 0,204 |
| 660           | 0,043             | 0,044 | 0,046 | 0,049 | 0,055 | 0,064 | 0,078 | 0,104 | 0,156 | 0,201 |  | 0,044         | 0,046 | 0,049 | 0,055 | 0,063 | 0,078 | 0,104 | 0,157 | 0,157 | 0,205 |  | 0,043          | 0,043 | 0,045 | 0,049 | 0,055 | 0,063 | 0,078 | 0,104 | 0,157 | 0,157 | 0,205 |
| 670           | 0,043             | 0,043 | 0,045 | 0,048 | 0,054 | 0,062 | 0,077 | 0,103 | 0,155 | 0,203 |  | 0,044         | 0,046 | 0,049 | 0,055 | 0,063 | 0,078 | 0,104 | 0,157 | 0,157 | 0,205 |  | 0,043          | 0,043 | 0,045 | 0,049 | 0,055 | 0,063 | 0,078 | 0,104 | 0,157 | 0,157 | 0,205 |

| $\lambda$ MMK | 0     | 10    | 20    | 30    | 40    | $i = 0^\circ$ |       |       |       |       | $i = 10^\circ$ |       |       |       |       | 50    | 60    | 70    | 80    | 90 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|-------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| 680           | 0,042 | 0,042 | 0,044 | 0,047 | 0,053 | 0,061         | 0,075 | 0,101 | 0,154 | 0,204 | 0,043          | 0,045 | 0,048 | 0,054 | 0,062 | 0,077 | 0,102 | 0,156 | 0,206 |    |
| 690           | 0,041 | 0,042 | 0,043 | 0,047 | 0,052 | 0,060         | 0,074 | 0,099 | 0,152 | 0,205 | 0,042          | 0,044 | 0,047 | 0,053 | 0,061 | 0,075 | 0,101 | 0,154 | 0,207 |    |
| 700           | 0,040 | 0,041 | 0,043 | 0,046 | 0,051 | 0,059         | 0,073 | 0,098 | 0,151 | 0,206 | 0,041          | 0,043 | 0,046 | 0,052 | 0,060 | 0,074 | 0,099 | 0,153 | 0,208 |    |
| 710           | 0,040 | 0,040 | 0,042 | 0,045 | 0,050 | 0,058         | 0,072 | 0,097 | 0,149 | 0,206 | 0,041          | 0,042 | 0,046 | 0,051 | 0,059 | 0,073 | 0,098 | 0,151 | 0,209 |    |
| 720           | 0,039 | 0,039 | 0,041 | 0,044 | 0,049 | 0,057         | 0,071 | 0,095 | 0,148 | 0,207 | 0,040          | 0,042 | 0,045 | 0,050 | 0,058 | 0,072 | 0,097 | 0,150 | 0,210 |    |
| 730           | 0,038 | 0,039 | 0,041 | 0,044 | 0,049 | 0,057         | 0,070 | 0,094 | 0,147 | 0,208 | 0,039          | 0,041 | 0,044 | 0,049 | 0,057 | 0,071 | 0,096 | 0,149 | 0,211 |    |
| 740           | 0,038 | 0,038 | 0,040 | 0,043 | 0,048 | 0,056         | 0,069 | 0,093 | 0,146 | 0,209 | 0,039          | 0,040 | 0,043 | 0,048 | 0,057 | 0,070 | 0,094 | 0,148 | 0,211 |    |
| 750           | 0,037 | 0,037 | 0,039 | 0,041 | 0,047 | 0,054         | 0,068 | 0,092 | 0,144 | 0,210 | 0,038          | 0,040 | 0,043 | 0,048 | 0,056 | 0,069 | 0,093 | 0,146 | 0,212 |    |
| 760           | 0,036 | 0,037 | 0,039 | 0,041 | 0,046 | 0,054         | 0,067 | 0,091 | 0,143 | 0,210 | 0,037          | 0,039 | 0,042 | 0,047 | 0,055 | 0,068 | 0,092 | 0,145 | 0,213 |    |

| λ MMK | $i = 20^\circ$ |       |       |       |       |       |       |       |       | $i = 30^\circ$ |       |       |       |       |       |       |       |       | $i = 40^\circ$ |  |  |
|-------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|--|--|
|       | 20             | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    |       | 30             | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 40    | 50    | 60             |  |  |
| 380   | 0,095          | 0,100 | 0,107 | 0,117 | 0,129 | 0,143 | 0,145 | 0,122 | 0,105 | 0,112          | 0,122 | 0,135 | 0,149 | 0,150 | 0,124 | 0,120 | 0,131 | 0,144 |                |  |  |
| 390   | 0,093          | 0,098 | 0,105 | 0,116 | 0,130 | 0,146 | 0,150 | 0,130 | 0,103 | 0,111          | 0,122 | 0,136 | 0,152 | 0,158 | 0,132 | 0,119 | 0,131 | 0,146 |                |  |  |
| 400   | 0,091          | 0,095 | 0,104 | 0,114 | 0,130 | 0,148 | 0,158 | 0,136 | 0,101 | 0,109          | 0,121 | 0,136 | 0,155 | 0,165 | 0,139 | 0,118 | 0,130 | 0,146 |                |  |  |
| 410   | 0,089          | 0,094 | 0,102 | 0,113 | 0,129 | 0,149 | 0,163 | 0,142 | 0,099 | 0,108          | 0,119 | 0,136 | 0,156 | 0,171 | 0,146 | 0,116 | 0,129 | 0,146 |                |  |  |
| 420   | 0,087          | 0,092 | 0,100 | 0,111 | 0,128 | 0,149 | 0,168 | 0,148 | 0,097 | 0,106          | 0,118 | 0,135 | 0,157 | 0,176 | 0,152 | 0,114 | 0,127 | 0,146 |                |  |  |
| 430   | 0,085          | 0,090 | 0,098 | 0,109 | 0,126 | 0,149 | 0,171 | 0,153 | 0,095 | 0,103          | 0,116 | 0,133 | 0,157 | 0,180 | 0,158 | 0,112 | 0,126 | 0,145 |                |  |  |
| 440   | 0,083          | 0,088 | 0,095 | 0,107 | 0,124 | 0,149 | 0,174 | 0,158 | 0,093 | 0,101          | 0,114 | 0,132 | 0,157 | 0,183 | 0,164 | 0,110 | 0,124 | 0,143 |                |  |  |
| 450   | 0,080          | 0,085 | 0,093 | 0,105 | 0,122 | 0,148 | 0,177 | 0,162 | 0,091 | 0,099          | 0,111 | 0,130 | 0,156 | 0,186 | 0,169 | 0,108 | 0,121 | 0,141 |                |  |  |
| 460   | 0,078          | 0,083 | 0,091 | 0,103 | 0,120 | 0,146 | 0,178 | 0,166 | 0,088 | 0,097          | 0,109 | 0,128 | 0,155 | 0,188 | 0,174 | 0,106 | 0,119 | 0,139 |                |  |  |
| 470   | 0,076          | 0,081 | 0,089 | 0,100 | 0,118 | 0,145 | 0,180 | 0,170 | 0,086 | 0,094          | 0,107 | 0,126 | 0,154 | 0,190 | 0,178 | 0,103 | 0,117 | 0,137 |                |  |  |
| 480   | 0,074          | 0,079 | 0,086 | 0,098 | 0,116 | 0,143 | 0,181 | 0,174 | 0,084 | 0,092          | 0,105 | 0,123 | 0,152 | 0,191 | 0,182 | 0,101 | 0,115 | 0,135 |                |  |  |
| 490   | 0,072          | 0,077 | 0,084 | 0,096 | 0,114 | 0,142 | 0,181 | 0,178 | 0,082 | 0,090          | 0,102 | 0,121 | 0,151 | 0,192 | 0,186 | 0,099 | 0,112 | 0,133 |                |  |  |
| 500   | 0,070          | 0,075 | 0,082 | 0,094 | 0,111 | 0,140 | 0,181 | 0,181 | 0,080 | 0,088          | 0,100 | 0,119 | 0,149 | 0,193 | 0,190 | 0,096 | 0,110 | 0,131 |                |  |  |
| 510   | 0,068          | 0,073 | 0,080 | 0,092 | 0,109 | 0,138 | 0,181 | 0,184 | 0,078 | 0,086          | 0,098 | 0,117 | 0,147 | 0,193 | 0,193 | 0,093 | 0,108 | 0,128 |                |  |  |
| 520   | 0,066          | 0,071 | 0,078 | 0,090 | 0,107 | 0,136 | 0,181 | 0,186 | 0,076 | 0,084          | 0,096 | 0,114 | 0,145 | 0,193 | 0,196 | 0,092 | 0,105 | 0,126 |                |  |  |
| 530   | 0,065          | 0,069 | 0,076 | 0,088 | 0,105 | 0,134 | 0,181 | 0,189 | 0,074 | 0,082          | 0,094 | 0,112 | 0,143 | 0,19  | 0,199 | 0,090 | 0,103 | 0,124 |                |  |  |

| $\lambda$ MMK   | $\varphi^\circ$ |       |       |       |       |       |                |       |       |       |       |       |
|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | 20              | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80             | 90    | 30    | 40    | 50    | 60    |
|                 | $i = 20^\circ$  |       |       |       |       |       | $i = 30^\circ$ |       |       |       |       |       |
| 540             | 0,063           | 0,068 | 0,075 | 0,086 | 0,103 | 0,132 | 0,180          | 0,191 | 0,072 | 0,080 | 0,092 | 0,110 |
| 550             | 0,062           | 0,066 | 0,073 | 0,084 | 0,101 | 0,130 | 0,179          | 0,193 | 0,071 | 0,078 | 0,090 | 0,108 |
| 560             | 0,060           | 0,064 | 0,071 | 0,082 | 0,099 | 0,128 | 0,178          | 0,196 | 0,069 | 0,076 | 0,088 | 0,106 |
| 570             | 0,059           | 0,063 | 0,070 | 0,080 | 0,097 | 0,126 | 0,177          | 0,198 | 0,067 | 0,075 | 0,086 | 0,104 |
| 580             | 0,057           | 0,061 | 0,068 | 0,078 | 0,095 | 0,124 | 0,176          | 0,200 | 0,065 | 0,073 | 0,084 | 0,102 |
| 590             | 0,056           | 0,060 | 0,067 | 0,077 | 0,094 | 0,122 | 0,175          | 0,201 | 0,065 | 0,072 | 0,083 | 0,100 |
| 600             | 0,055           | 0,059 | 0,065 | 0,075 | 0,092 | 0,120 | 0,173          | 0,203 | 0,062 | 0,070 | 0,081 | 0,098 |
| 610             | 0,054           | 0,058 | 0,064 | 0,074 | 0,090 | 0,118 | 0,172          | 0,205 | 0,062 | 0,069 | 0,079 | 0,097 |
| 620             | 0,053           | 0,056 | 0,063 | 0,072 | 0,088 | 0,116 | 0,171          | 0,206 | 0,061 | 0,067 | 0,078 | 0,095 |
| 630             | 0,051           | 0,055 | 0,061 | 0,071 | 0,087 | 0,115 | 0,169          | 0,208 | 0,059 | 0,066 | 0,076 | 0,093 |
| 640             | 0,050           | 0,054 | 0,060 | 0,070 | 0,085 | 0,113 | 0,168          | 0,209 | 0,058 | 0,065 | 0,075 | 0,092 |
| 650             | 0,049           | 0,053 | 0,059 | 0,068 | 0,084 | 0,111 | 0,165          | 0,210 | 0,057 | 0,063 | 0,073 | 0,090 |
| 660             | 0,048           | 0,052 | 0,058 | 0,067 | 0,082 | 0,110 | 0,165          | 0,212 | 0,055 | 0,062 | 0,072 | 0,089 |
| 670             | 0,048           | 0,051 | 0,057 | 0,066 | 0,081 | 0,108 | 0,164          | 0,213 | 0,055 | 0,061 | 0,071 | 0,087 |
| 680             | 0,047           | 0,050 | 0,056 | 0,065 | 0,080 | 0,107 | 0,162          | 0,214 | 0,054 | 0,060 | 0,070 | 0,086 |
| 690             | 0,046           | 0,049 | 0,055 | 0,064 | 0,079 | 0,105 | 0,161          | 0,215 | 0,053 | 0,059 | 0,069 | 0,084 |
| 700             | 0,045           | 0,048 | 0,054 | 0,063 | 0,077 | 0,104 | 0,159          | 0,216 | 0,052 | 0,058 | 0,068 | 0,083 |
| 710             | 0,044           | 0,047 | 0,053 | 0,062 | 0,076 | 0,102 | 0,158          | 0,217 | 0,051 | 0,057 | 0,066 | 0,081 |
| 720             | 0,044           | 0,047 | 0,052 | 0,061 | 0,075 | 0,101 | 0,157          | 0,218 | 0,050 | 0,056 | 0,065 | 0,080 |
| 730             | 0,043           | 0,046 | 0,051 | 0,060 | 0,074 | 0,100 | 0,155          | 0,219 | 0,050 | 0,055 | 0,064 | 0,080 |
| 740             | 0,042           | 0,045 | 0,051 | 0,059 | 0,073 | 0,098 | 0,154          | 0,220 | 0,049 | 0,054 | 0,063 | 0,078 |
| 750             | 0,041           | 0,044 | 0,050 | 0,058 | 0,072 | 0,097 | 0,152          | 0,220 | 0,048 | 0,053 | 0,062 | 0,077 |
| 760             | 0,041           | 0,044 | 0,049 | 0,057 | 0,071 | 0,096 | 0,151          | 0,221 | 0,047 | 0,053 | 0,062 | 0,076 |
| $\varphi^\circ$ |                 |       |       |       |       |       |                |       |       |       |       |       |
| $\lambda$ MMK   | $\varphi^\circ$ |       |       |       |       |       |                |       |       |       |       |       |
|                 | 70              | 80    | 90    | 50    | 60    | 70    | 80             | 90    | 60    | 70    | 80    | 90    |
|                 | $i = 40^\circ$  |       |       |       |       |       | $i = 50^\circ$ |       |       |       |       |       |
| 380             | 0,158           | 0,156 | 0,126 | 0,142 | 0,156 | 0,169 | 0,156          | 0,169 | 0,125 | 0,170 | 0,180 | 0,167 |
| 390             | 0,162           | 0,166 | 0,135 | 0,143 | 0,159 | 0,175 | 0,175          | 0,175 | 0,136 | 0,174 | 0,190 | 0,183 |
| 400             | 0,166           | 0,174 | 0,144 | 0,143 | 0,160 | 0,180 | 0,186          | 0,186 | 0,146 | 0,179 | 0,198 | 0,197 |
| 410             | 0,168           | 0,181 | 0,151 | 0,143 | 0,161 | 0,183 | 0,195          | 0,195 | 0,156 | 0,181 | 0,204 | 0,209 |
| 420             | 0,169           | 0,187 | 0,158 | 0,142 | 0,161 | 0,187 | 0,203          | 0,203 | 0,165 | 0,183 | 0,209 | 0,222 |
| $\varphi^\circ$ |                 |       |       |       |       |       |                |       |       |       |       |       |
| $\lambda$ MMK   | $\varphi^\circ$ |       |       |       |       |       |                |       |       |       |       |       |
|                 | 70              | 80    | 90    | 50    | 60    | 70    | 80             | 90    | 60    | 70    | 80    | 90    |
|                 | $i = 40^\circ$  |       |       |       |       |       | $i = 50^\circ$ |       |       |       |       |       |
| 380             | 0,158           | 0,156 | 0,126 | 0,142 | 0,156 | 0,169 | 0,156          | 0,169 | 0,125 | 0,170 | 0,180 | 0,167 |
| 390             | 0,162           | 0,166 | 0,135 | 0,143 | 0,159 | 0,175 | 0,175          | 0,175 | 0,136 | 0,174 | 0,190 | 0,183 |
| 400             | 0,166           | 0,174 | 0,144 | 0,143 | 0,160 | 0,180 | 0,186          | 0,186 | 0,146 | 0,179 | 0,198 | 0,197 |
| 410             | 0,168           | 0,181 | 0,151 | 0,143 | 0,161 | 0,183 | 0,195          | 0,195 | 0,156 | 0,181 | 0,204 | 0,209 |
| 420             | 0,169           | 0,187 | 0,158 | 0,142 | 0,161 | 0,187 | 0,203          | 0,203 | 0,165 | 0,183 | 0,209 | 0,222 |

| $\lambda$ MMK   | $\varphi^\circ$ |       |       |       |       |       |                |       |       |       |       |       |
|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | 70              | 80    | 90    | 50    | 60    | 70    | 80             | 90    | 60    | 70    | 80    | 90    |
|                 | $i = 40^\circ$  |       |       |       |       |       | $i = 50^\circ$ |       |       |       |       |       |
| 380             | 0,158           | 0,156 | 0,126 | 0,142 | 0,156 | 0,169 | 0,156          | 0,169 | 0,125 | 0,170 | 0,180 | 0,167 |
| 390             | 0,162           | 0,166 | 0,135 | 0,143 | 0,159 | 0,175 | 0,175          | 0,175 | 0,136 | 0,174 | 0,190 | 0,183 |
| 400             | 0,166           | 0,174 | 0,144 | 0,143 | 0,160 | 0,180 | 0,186          | 0,186 | 0,146 | 0,179 | 0,198 | 0,197 |
| 410             | 0,168           | 0,181 | 0,151 | 0,143 | 0,161 | 0,183 | 0,195          | 0,195 | 0,156 | 0,181 | 0,204 | 0,209 |
| 420             | 0,169           | 0,187 | 0,158 | 0,142 | 0,161 | 0,187 | 0,203          | 0,203 | 0,165 | 0,183 | 0,209 | 0,222 |
| $\varphi^\circ$ |                 |       |       |       |       |       |                |       |       |       |       |       |
| $\lambda$ MMK   | $\varphi^\circ$ |       |       |       |       |       |                |       |       |       |       |       |
|                 | 70              | 80    | 90    | 50    | 60    | 70    | 80             | 90    | 60    | 70    | 80    | 90    |
|                 | $i = 40^\circ$  |       |       |       |       |       | $i = 50^\circ$ |       |       |       |       |       |
| 380             | 0,158           | 0,156 | 0,126 | 0,142 | 0,156 | 0,169 | 0,156          | 0,169 | 0,125 | 0,170 | 0,180 | 0,167 |
| 390             | 0,162           | 0,166 | 0,135 | 0,143 | 0,159 | 0,175 | 0,175          | 0,175 | 0,136 | 0,174 | 0,190 | 0,183 |
| 400             | 0,166           | 0,174 | 0,144 | 0,143 | 0,160 | 0,180 | 0,186          | 0,186 | 0,146 | 0,179 | 0,198 | 0,197 |
| 410             | 0,168           | 0,181 | 0,151 | 0,143 | 0,161 | 0,183 | 0,195          | 0,195 | 0,156 | 0,181 | 0,204 | 0,209 |
| 420             | 0,169           | 0,187 | 0,158 | 0,142 | 0,161 | 0,187 | 0,203          | 0,203 | 0,165 | 0,183 | 0,209 | 0,222 |

| $\lambda$ MK | $\theta^\circ$ |       |       |                |       |       |                |       |       |                |       |       |
|--------------|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
|              | $i = 40^\circ$ |       |       | $i = 50^\circ$ |       |       | $i = 60^\circ$ |       |       | $i = 70^\circ$ |       |       |
|              | 70             | 80    | 90    | 50             | 60    | 70    | 80             | 90    | 60    | 70             | 80    | 90    |
| 430          | 0,170          | 0,193 | 0,165 | 0,140          | 0,161 | 0,188 | 0,210          | 0,173 | 0,184 | 0,213          | 0,243 | 0,159 |
| 440          | 0,170          | 0,197 | 0,172 | 0,138          | 0,160 | 0,189 | 0,217          | 0,181 | 0,184 | 0,216          | 0,250 | 0,173 |
| 450          | 0,170          | 0,201 | 0,178 | 0,137          | 0,159 | 0,190 | 0,222          | 0,189 | 0,183 | 0,218          | 0,265 | 0,173 |
| 460          | 0,169          | 0,204 | 0,184 | 0,134          | 0,157 | 0,190 | 0,226          | 0,196 | 0,183 | 0,219          | 0,265 | 0,187 |
| 470          | 0,168          | 0,206 | 0,189 | 0,132          | 0,155 | 0,189 | 0,230          | 0,203 | 0,181 | 0,220          | 0,263 | 0,201 |
| 480          | 0,167          | 0,208 | 0,194 | 0,130          | 0,153 | 0,188 | 0,233          | 0,209 | 0,180 | 0,222          | 0,266 | 0,215 |
| 490          | 0,165          | 0,210 | 0,199 | 0,127          | 0,151 | 0,187 | 0,235          | 0,215 | 0,178 | 0,219          | 0,267 | 0,227 |
| 500          | 0,163          | 0,211 | 0,203 | 0,125          | 0,148 | 0,185 | 0,237          | 0,221 | 0,176 | 0,218          | 0,268 | 0,232 |
| 510          | 0,161          | 0,211 | 0,207 | 0,123          | 0,146 | 0,183 | 0,238          | 0,226 | 0,174 | 0,217          | 0,269 | 0,240 |
| 520          | 0,159          | 0,211 | 0,211 | 0,120          | 0,144 | 0,181 | 0,239          | 0,231 | 0,171 | 0,216          | 0,269 | 0,252 |
| 530          | 0,157          | 0,211 | 0,215 | 0,118          | 0,141 | 0,179 | 0,239          | 0,236 | 0,169 | 0,214          | 0,268 | 0,264 |
| 540          | 0,155          | 0,211 | 0,218 | 0,116          | 0,139 | 0,177 | 0,240          | 0,240 | 0,167 | 0,212          | 0,268 | 0,274 |
| 550          | 0,153          | 0,210 | 0,221 | 0,114          | 0,137 | 0,175 | 0,239          | 0,244 | 0,164 | 0,210          | 0,267 | 0,305 |
| 560          | 0,151          | 0,209 | 0,224 | 0,111          | 0,134 | 0,173 | 0,239          | 0,248 | 0,162 | 0,208          | 0,265 | 0,314 |
| 570          | 0,149          | 0,209 | 0,227 | 0,109          | 0,132 | 0,171 | 0,238          | 0,252 | 0,157 | 0,206          | 0,264 | 0,323 |
| 580          | 0,147          | 0,207 | 0,230 | 0,107          | 0,130 | 0,169 | 0,238          | 0,256 | 0,157 | 0,204          | 0,262 | 0,332 |
| 590          | 0,145          | 0,206 | 0,232 | 0,106          | 0,128 | 0,167 | 0,237          | 0,259 | 0,155 | 0,201          | 0,262 | 0,340 |
| 600          | 0,143          | 0,205 | 0,234 | 0,103          | 0,126 | 0,164 | 0,235          | 0,262 | 0,153 | 0,199          | 0,258 | 0,348 |
| 610          | 0,141          | 0,204 | 0,237 | 0,102          | 0,124 | 0,162 | 0,234          | 0,265 | 0,150 | 0,197          | 0,256 | 0,356 |
| 620          | 0,139          | 0,202 | 0,239 | 0,100          | 0,122 | 0,160 | 0,233          | 0,268 | 0,148 | 0,195          | 0,254 | 0,363 |
| 630          | 0,136          | 0,201 | 0,241 | 0,098          | 0,120 | 0,158 | 0,231          | 0,271 | 0,146 | 0,192          | 0,252 | 0,370 |
| 640          | 0,135          | 0,199 | 0,243 | 0,096          | 0,118 | 0,156 | 0,230          | 0,276 | 0,144 | 0,190          | 0,250 | 0,377 |
| 650          | 0,133          | 0,198 | 0,245 | 0,095          | 0,116 | 0,154 | 0,228          | 0,278 | 0,142 | 0,188          | 0,247 | 0,384 |
| 660          | 0,131          | 0,196 | 0,247 | 0,093          | 0,114 | 0,152 | 0,225          | 0,280 | 0,140 | 0,186          | 0,245 | 0,390 |
| 670          | 0,129          | 0,195 | 0,248 | 0,092          | 0,112 | 0,150 | 0,225          | 0,283 | 0,138 | 0,183          | 0,243 | 0,405 |
| 680          | 0,127          | 0,193 | 0,250 | 0,090          | 0,111 | 0,148 | 0,224          | 0,283 | 0,136 | 0,181          | 0,241 | 0,419 |
| 690          | 0,126          | 0,192 | 0,251 | 0,089          | 0,109 | 0,146 | 0,222          | 0,285 | 0,134 | 0,179          | 0,238 | 0,431 |
| 700          | 0,124          | 0,190 | 0,253 | 0,087          | 0,108 | 0,144 | 0,220          | 0,287 | 0,132 | 0,177          | 0,236 | 0,442 |
| 710          | 0,122          | 0,189 | 0,254 | 0,086          | 0,106 | 0,142 | 0,219          | 0,289 | 0,131 | 0,175          | 0,234 | 0,454 |
| 720          | 0,121          | 0,187 | 0,256 | 0,085          | 0,105 | 0,141 | 0,217          | 0,291 | 0,129 | 0,173          | 0,232 | 0,465 |
| 730          | 0,119          | 0,186 | 0,257 | 0,084          | 0,103 | 0,139 | 0,216          | 0,292 | 0,127 | 0,171          | 0,230 | 0,478 |
| 740          | 0,118          | 0,184 | 0,258 | 0,082          | 0,102 | 0,137 | 0,214          | 0,294 | 0,126 | 0,169          | 0,228 | 0,488 |
| 750          | 0,116          | 0,183 | 0,259 | 0,081          | 0,100 | 0,136 | 0,212          | 0,296 | 0,124 | 0,167          | 0,225 | 0,498 |
| 760          | 0,115          | 0,181 | 0,261 | 0,080          | 0,099 | 0,134 | 0,210          | 0,297 | 0,122 | 0,165          | 0,223 | 0,510 |
|              |                |       |       |                |       |       |                |       |       |                |       | 0,530 |
|              |                |       |       |                |       |       |                |       |       |                |       | 0,530 |

Спектральные характеристики альbedo некоторых подстилающих поверхностей  
и оптической толщины атмосферы

| $\lambda$ ммк | Песок | Пахота | Трава | Листва | Оптическая<br>толщина атмосферы $\tau_0$ |
|---------------|-------|--------|-------|--------|------------------------------------------|
| 380           | 0,032 | 0,065  | 0,103 | 0,058  | 0,7297                                   |
| 390           | 0,044 | 0,081  | 0,111 | 0,058  | 0,6757                                   |
| 400           | 0,056 | 0,088  | 0,117 | 0,058  | 0,6293                                   |
| 410           | 0,068 | 0,094  | 0,125 | 0,058  | 0,5897                                   |
| 420           | 0,080 | 0,100  | 0,133 | 0,058  | 0,5535                                   |
| 430           | 0,090 | 0,106  | 0,137 | 0,058  | 0,5209                                   |
| 440           | 0,100 | 0,112  | 0,142 | 0,058  | 0,4918                                   |
| 450           | 0,109 | 0,119  | 0,154 | 0,058  | 0,4653                                   |
| 460           | 0,118 | 0,125  | 0,165 | 0,058  | 0,4415                                   |
| 470           | 0,126 | 0,131  | 0,174 | 0,058  | 0,4187                                   |
| 480           | 0,134 | 0,138  | 0,183 | 0,058  | 0,3994                                   |
| 490           | 0,142 | 0,144  | 0,196 | 0,058  | 0,3810                                   |
| 500           | 0,150 | 0,150  | 0,208 | 0,058  | 0,3644                                   |
| 510           | 0,160 | 0,156  | 0,220 | 0,078  | 0,3488                                   |
| 520           | 0,170 | 0,161  | 0,233 | 0,083  | 0,3350                                   |
| 530           | 0,185 | 0,167  | 0,249 | 0,100  | 0,3221                                   |
| 540           | 0,200 | 0,172  | 0,266 | 0,117  | 0,3102                                   |
| 550           | 0,212 | 0,178  | 0,280 | 0,109  | 0,2992                                   |
| 560           | 0,225 | 0,183  | 0,294 | 0,100  | 0,2883                                   |
| 570           | 0,238 | 0,189  | 0,305 | 0,091  | 0,2792                                   |
| 580           | 0,250 | 0,195  | 0,316 | 0,082  | 0,2698                                   |
| 590           | 0,262 | 0,200  | 0,324 | 0,079  | 0,2622                                   |
| 600           | 0,275 | 0,205  | 0,333 | 0,075  | 0,2536                                   |
| 610           | 0,287 | 0,210  | 0,342 | 0,071  | 0,2463                                   |
| 620           | 0,300 | 0,215  | 0,350 | 0,067  | 0,2394                                   |
| 630           | 0,306 | 0,220  | 0,358 | 0,064  | 0,2325                                   |
| 640           | 0,312 | 0,225  | 0,367 | 0,060  | 0,2265                                   |
| 650           | 0,318 | 0,230  | 0,375 | 0,060  | 0,2206                                   |
| 660           | 0,325 | 0,235  | 0,383 | 0,060  | 0,2152                                   |
| 670           | 0,330 | 0,240  | 0,389 | 0,064  | 0,2099                                   |
| 680           | 0,334 | 0,245  | 0,395 | 0,075  | 0,2050                                   |
| 690           | 0,340 | 0,250  | 0,401 | 0,082  | 0,2002                                   |
| 700           | 0,345 | 0,258  | 0,408 | 0,150  | 0,1960                                   |
| 710           | 0,350 | 0,266  | 0,414 | 0,262  | 0,1916                                   |
| 720           | 0,356 | 0,274  | 0,420 | 0,375  | 0,1878                                   |
| 730           | 0,361 | 0,281  | 0,426 | 0,463  | 0,1841                                   |
| 740           | 0,367 | 0,289  | 0,433 | 0,550  | 0,1804                                   |
| 750           | 0,372 | 0,297  | 0,438 | 0,600  | 0,1768                                   |
| 760           | 0,378 | 0,305  | 0,442 | 0,650  | 0,1732                                   |

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шифрин К. С., Минин И. Н. К теории негоризонтальной видимости. Труды ГГО, вып. 68, 1957.
2. Соболев В. В. О рассеянии света в атмосфере Земли и планет. Уч. зап. ЛГУ, № 116, 1949.
3. Foitzik L., Zschaecck H. Messungen der spektralen Zerstreuungspenktion bodennaher Lüft. Zs. f. Meteor. 7, Nr 1, 1953.
4. Шифрин К. С., Пятовская Н. П. Таблицы наклонной дальности видимости и яркости дневного неба. Гидрометеониздат, Л., 1959.
5. Оптика в военном деле. Сб. статей, т. 1. Изд. АН СССР, 1945.

## ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ВОДЫ В ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Излагаются результаты расчета на машине «Урал» спектрального и пространственного распределения коэффициентов излучения воды с учетом комплексного коэффициента преломления.

Настоящая работа посвящена вопросу оценки излучательной способности воды в инфракрасной области спектра. Этот вопрос часто возникает в различных геофизических задачах, и в частности в проблемах термики моря. Особый интерес представляют изменения, которые претерпевает излучательная способность  $\epsilon_\lambda$  в зависимости от угла визирования.

Формальное решение вопроса можно получить, если воспользоваться непосредственно формулами Френеля для отражения электромагнитных волн. Действительно, степень черноты (излучательную способность), т. е. меру приближения к абсолютно черному телу, естественно определять по величине поглощательной способности  $\alpha$ . Для абсолютно черного тела  $\alpha=1$ . Для всякого реального тела  $\alpha<1$ . Если толщина тела в направлении преломленных лучей  $l$ , а коэффициент отражения  $\rho$ , то

$$\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda = (1 - \rho_\lambda) \left( 1 - e^{-\frac{4\pi\kappa_\lambda}{\lambda} l} \right), \quad (1)$$

где  $(1 - \rho_\lambda)$  — доля потока, проникшего в тело;  $\rho_\lambda$  — коэффициент отражения;  $\left( 1 - e^{-\frac{4\pi\kappa_\lambda}{\lambda} l} \right)$  — доля потока, проникшего в тело и поглощенного в нем;  $\kappa_\lambda$  — показатель поглощения [1].

Поскольку в инфракрасной области спектра вода уже в малых толщах полностью поглощает преломленный поток, а в практически важных случаях эта толща всегда бывает достаточно велика, то

$$\epsilon_\lambda \cong 1 - \rho_\lambda, \quad (2)$$

где  $\rho_\lambda$  определяется формулами Френеля.

Если различать лучи с направлением электрического вектора (направление колебаний), лежащим в плоскости падения ( $p$ -составляющая поляризации) и перпендикулярно плоскости падения ( $s$ -составляющая поляризации), то

щая), то формальные выражения для коэффициентов отражения по теории Френеля будут иметь следующий вид:

$$\rho_{p\lambda} = \frac{\operatorname{tg}^2(\varphi - \psi_\lambda)}{\operatorname{tg}^2(\varphi + \psi_\lambda)}, \quad (3)$$

$$\rho_{s\lambda} = \frac{\sin^2(\varphi - \psi_\lambda)}{\sin^2(\varphi + \psi_\lambda)} \quad (4)$$

и для неполяризованного излучения:

$$\rho_\lambda = \frac{1}{2} \left[ \frac{\operatorname{tg}^2(\varphi - \psi_\lambda)}{\operatorname{tg}^2(\varphi + \psi_\lambda)} + \frac{\sin^2(\varphi - \psi_\lambda)}{\sin^2(\varphi + \psi_\lambda)} \right], \quad (5)$$

$$\sin \psi_\lambda = \frac{\sin \varphi}{n_\lambda}, \quad (6)$$

где  $\varphi$  — угол падения (угол визирования),  $\psi_\lambda$  — угол преломления,  $n_\lambda$  — относительный показатель преломления (в общем случае комплексная величина).

Если учесть формулу (6), то можно получить выражения для  $\rho_{p\lambda}$  и  $\rho_{s\lambda}$  как функций только угла падения  $\varphi$ :

$$\rho_{p\lambda} = \left( \frac{n_\lambda^2 \cos \varphi - \sqrt{n_\lambda^2 - \sin^2 \varphi}}{n_\lambda^2 \cos \varphi + \sqrt{n_\lambda^2 - \sin^2 \varphi}} \right)^2, \quad (7)$$

$$\rho_{s\lambda} = \left( \frac{\cos \varphi - \sqrt{n_\lambda^2 - \sin^2 \varphi}}{\cos \varphi + \sqrt{n_\lambda^2 - \sin^2 \varphi}} \right)^2. \quad (8)$$

Степень поляризации характеризуется величиной

$$\frac{\rho_p}{\rho_s} \text{ или } p = \frac{\rho_p - \rho_s}{\rho_p + \rho_s} = \frac{\frac{\rho_p}{\rho_s} - 1}{\frac{\rho_p}{\rho_s} + 1}. \quad (9)$$

Так как в инфракрасной области спектра для воды  $n_\lambda$  — комплексное число, то коэффициенты отражения и излучения также будут комплексными числами.

Комплексный характер коэффициента преломления воды (относительно воздуха) в инфракрасной области спектра лишает формулы Френеля (3)–(9) количественной наглядности и затрудняет быстрое получение конкретных данных. Поэтому существенное значение имеет получение формул, графиков и таблиц. На эту сторону вопроса мы и старались обратить главное внимание, используя для расчетов возможности электронной цифровой машины «Урал».

Прежде чем перейти к результатам конкретных расчетов, приведем необходимые данные по оптическим константам воды.

Комплексный показатель преломления

$$\dot{n}_\lambda = n_\lambda (1 - j\chi_\lambda) = n_\lambda - i\kappa_\lambda, \quad (10)$$

где  $\kappa_\lambda = n_\lambda \chi_\lambda$  — показатель поглощения,  $\chi_\lambda$  — индекс поглощения,  $n_\lambda$  — показатель преломления.

Напомним, что коэффициент поглощения [см. формулу (1)]

$$a_\lambda = \frac{4\pi\kappa_\lambda}{\lambda}. \quad (11)$$

Величины  $n_\lambda$  и  $\kappa_\lambda$  будем в дальнейшем считать заданными. Они существенно зависят от длины волны, и их значения находятся экспериментальным путем. Опыты состоят в определении  $\kappa_\lambda$  непосредственно по ослаблению излучения после прохождения им пленки определенной толщины. Величина  $n_\lambda$  определяется по коэффициенту отражения для случая нормального падения, когда различия между составляющими поляризации исчезают:

$$\rho_{\lambda 0} = \left| \frac{n_\lambda - 1}{n_\lambda + 1} \right|^2 = \frac{(n_\lambda - 1)^2 + \kappa_\lambda^2}{(n_\lambda + 1)^2 + \kappa_\lambda^2}, \quad (12)$$

откуда

$$n_\lambda = \frac{1 + \rho_{\lambda 0}}{1 - \rho_{\lambda 0}} + \sqrt{\left( \frac{1 + \rho_{\lambda 0}}{1 - \rho_{\lambda 0}} \right)^2 - 1 - \kappa_\lambda^2}, \quad (13)$$

$$\kappa_\lambda = \frac{a_\lambda \lambda}{4\pi}. \quad (14)$$

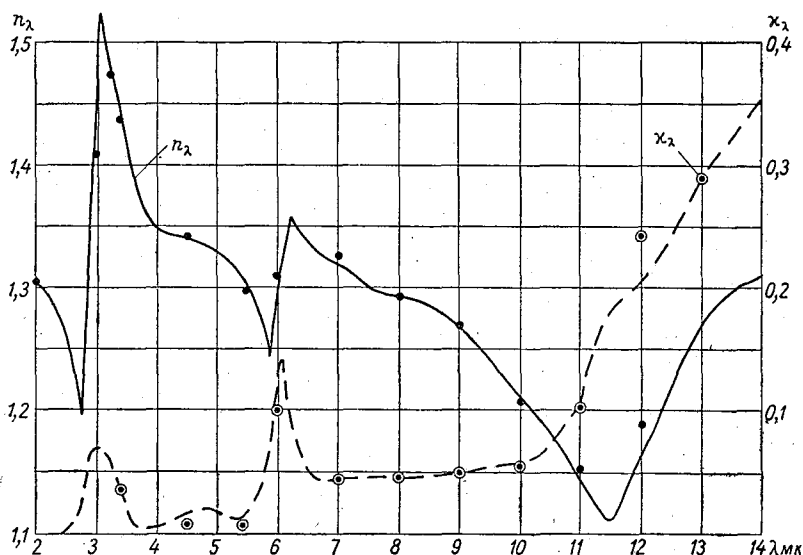


Рис. 1. Действительная и мнимая составляющие показателя преломления воды в инфракрасной области спектра.

В табл. 1 приведены на основе [2, 3] и расчетов по соответствующим формулам оптические характеристики жидкой воды.

Таблица иллюстрируется рис. 1—3. Точками показаны менее достоверные данные [1].

В [2, 3] использованы данные различных исследований, в том числе и классических опытов Рубенса и Ладенбурга, с соответствующими поправками на условия опыта и осреднением.

Спектральное распределение экстремальных точек несколько иное, чем в ранних работах Рубенса.

Наиболее важные из них: максимумы — 3,07; 6,20; 17,1 мк, минимумы 2,74; 5,85; 11,47 мк.

Большая часть полос поглощения жидкой воды представляет собой полосы водяного пара, смещенные в сторону больших длин волн. Они, следовательно, должны быть приписаны поглощению свободными молекулами. Некоторые полосы характерны только для жидкой воды, и причиной их появления является изменение энергетических уровней молекулы воды в конденсированном состоянии под влиянием соседних молекул. Полосы перекрываются друг другом, обуславливая сильное поглощение во всей инфракрасной области спектра.

В соответствии с формулой (12) максимумы отражения связаны с полосами поглощения и несколько смещены в сторону более длинных волн (рис. 2).

Поскольку опытные данные получены с ограниченной точностью, а на практике интерес представляют изменения коэффициентов излучения и отражения до 0,01%, вводится допущение об абсолютной

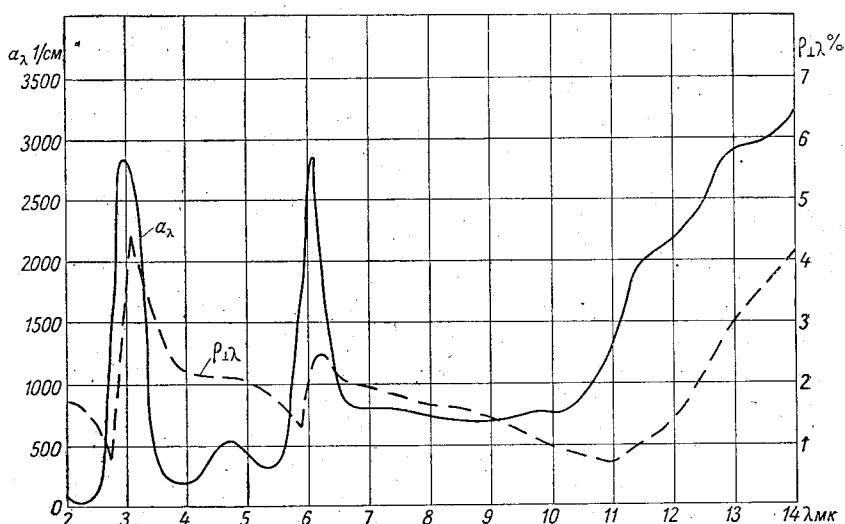


Рис. 2. Коэффициент поглощения и коэффициент нормального отражения воды в инфракрасной области спектра.

точности данных табл. 1. При этом для всех длин волн и углов визирования достоверность результатов одинакова, что позволяет проводить сравнительный анализ по табл. 2—13.

Поскольку коэффициент преломления является комплексной величиной, то коэффициенты отражения и излучения будут также комплексными. Это означает сдвиг фазы в отраженном свете и необходимость при вычислении коэффициентов по формулам (7), (8) определять квадраты модулей.

Необходимо обратить внимание еще на одну особенность отражения и излучения, которая имеет место при так называемом угле Брюстера (угол полной поляризации  $\varphi_B$ ).

Знаменатель выражения (3) остается конечным всегда, за исключением случая  $\varphi_B + \psi_\lambda = \frac{\pi}{2}$ ,

$$\operatorname{tg}(\varphi_B + \psi_\lambda) = \infty. \quad (15)$$

В этом случае  $\rho_{p\lambda} \rightarrow 0$ ,  $\varepsilon_{p\lambda} \rightarrow 1$ .

Поскольку  $\frac{\sin \varphi_{B\lambda}}{\sin \psi_{\lambda}} = n_{\lambda}$ , то подобное условие имеет место при  $\sin \varphi_{B\lambda} = n_{\lambda} \sin \psi_{\lambda} = n_{\lambda} \sin \left( \frac{\pi}{2} - \varphi_{B\lambda} \right) = n_{\lambda} \cos \varphi_{B\lambda}$ , т. е. при

$$\operatorname{tg} \varphi_{B\lambda} = n_{\lambda}. \quad (16)$$

Т а б л и ц а 1

Оптические характеристики жидкой воды

| $\lambda$ мк | $\rho_{\lambda 0}$ | $a_{\lambda} \frac{1}{\text{см}}$ | $n_{\lambda}$ | $x_{\lambda}$          | $  \dot{n}_{\lambda}  $ | $\varphi_{B\lambda}$ | $\varepsilon_{\lambda 0}$ | $\rho_{\lambda 0}$ (расч.) |
|--------------|--------------------|-----------------------------------|---------------|------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------|
| 1,00         | 0,0166             | 0,4396                            | 1,326         | $0,0035 \cdot 10^{-3}$ | 1,32600                 | 52°58'42"            | 0,980357                  | 0,016642                   |
| 1,05         | 0,0165             | 0,3708                            | 1,325         | $0,0031 \cdot 10^{-3}$ | 1,32500                 | 52 57 27             | 0,980460                  | 0,015640                   |
| 1,10         | 0,0164             | 1,9410                            | 1,324         | $0,0017 \cdot 10^{-3}$ | 1,32400                 | 52 56 12             | 0,980564                  | 0,014636                   |
| 1,20         | 0,0163             | 1,2660                            | 1,323         | $0,0121 \cdot 10^{-3}$ | 1,32300                 | 52 54 54             | 0,980667                  | 0,019333                   |
| 1,30         | 0,0161             | 1,2463                            | 1,321         | $0,0129 \cdot 10^{-3}$ | 1,32100                 | 52 52 27             | 0,980872                  | 0,019128                   |
| 1,40         | 0,0610             | 11,656                            | 1,320         | $0,0130 \cdot 10^{-2}$ | 1,32000                 | 52 58 42             | 0,980900                  | 0,019100                   |
| 1,50         | 0,0188             | 26,125                            | 1,318         | $0,0312 \cdot 10^{-2}$ | 1,31800                 | 52 48 41             | 0,981188                  | 0,018812                   |
| 1,60         | 0,0187             | 8,792                             | 1,316         | $0,0112 \cdot 10^{-2}$ | 1,31600                 | 52 46 11             | 0,981383                  | 0,018617                   |
| 1,70         | 0,0185             | 7,978                             | 1,315         | $0,0108 \cdot 10^{-2}$ | 1,31500                 | 52 44 55             | 0,981485                  | 0,018515                   |
| 1,80         | 0,0182             | 9,973                             | 1,312         | $0,0143 \cdot 10^{-2}$ | 1,31200                 | 52 41 08             | 0,981789                  | 0,018211                   |
| 1,90         | 0,0179             | 53,756                            | 1,309         | $0,0814 \cdot 10^{-2}$ | 1,03900                 | 52 37 20             | 0,982091                  | 0,017909                   |
| 2,00         | 0,0174             | 89,804                            | 1,304         | $0,0140 \cdot 10^{-1}$ | 1,03400                 | 52 30 59             | 0,982590                  | 0,017410                   |
| 2,20         | 0,0163             | 29,114                            | 1,293         | $0,0051 \cdot 10^{-1}$ | 1,29300                 | 52 16 54             | 0,983672                  | 0,016328                   |
| 2,40         | 0,0147             | 52,626                            | 1,276         | $0,0101 \cdot 10^{-1}$ | 1,27600                 | 51 54 42             | 0,985294                  | 0,014706                   |
| 2,50         | 0,0137             | 100,982                           | 1,265         | $0,0201 \cdot 10^{-1}$ | 1,26500                 | 51 40 23             | 0,986311                  | 0,013689                   |
| 2,60         | 0,0125             | 250,432                           | 1,252         | $0,0518 \cdot 10^{-1}$ | 1,25200                 | 51 23 06             | 0,987473                  | 0,012527                   |
| 2,70         | 0,0096             | 851,190                           | 1,216         | 0,0183                 | 1,21600                 | 50 34 02             | 0,990431                  | 0,009569                   |
| 2,74         | 0,0075             | 1251,35                           | 1,187         | 0,0273                 | 1,18732                 | 49 53 41             | 0,992534                  | 0,007466                   |
| 2,77         | 0,0090             | 1650,38                           | 1,206         | 0,0364                 | 1,20655                 | 50 20 52             | 0,991010                  | 0,008990                   |
| 2,80         | 0,0141             | 2198,0                            | 1,266         | 0,0490                 | 1,26694                 | 51 42 57             | 0,985759                  | 0,014241                   |
| 2,85         | 0,0200             | 2547,2                            | 1,324         | 0,0578                 | 1,32503                 | 52 57 30             | 0,979957                  | 0,020043                   |
| 2,90         | 0,0248             | 2759,4                            | 1,367         | 0,0637 *               | 1,36848                 | 53 38 33             | 0,075254                  | 0,024746                   |
| 2,95         | 0,0287             | 2852,4                            | 1,401         | 0,0670                 | 1,40261                 | 54 30 46             | 0,971350                  | 0,028650                   |
| 3,00         | 0,0340             | 2847,4                            | 1,446         | 0,0680                 | 1,44760                 | 55 21 48             | 0,966006                  | 0,033994                   |
| 3,02         | 0,0390             | 2811,0                            | 1,453         | 0,0683                 | 1,45461                 | 55 29 34             | 0,965148                  | 0,034852                   |
| 3,07         | 0,0439             | 2789,6                            | 1,525         | 0,0682                 | 1,52654                 | 56 46 20             | 0,956071                  | 0,043929                   |
| 3,10         | 0,0340             | 2759,1                            | 1,517         | 0,0681                 | 1,51833                 | 56 37 50             | 0,957109                  | 0,042891                   |
| 3,16         | 0,0142             | 2615,2                            | 1,504         | 0,0658                 | 1,50545                 | 56 24 21             | 0,958825                  | 0,041175                   |
| 3,20         | 0,0040             | 2398,1                            | 1,495         | 0,0611                 | 1,49598                 | 56 14 20             | 0,960063                  | 0,039937                   |
| 3,30         | 0,0365             | 1408,2                            | 1,471         | 0,0370                 | 1,47145                 | 55 47 59             | 0,963451                  | 0,036549                   |

| $\lambda$ МК | $\rho_{\lambda_0}$ | $a_{\lambda} \frac{1}{\text{с.м.}}$ | $n_{\lambda}$ | $x_{\lambda}$ | $ n_{\lambda} $ | $\varphi_{B_{\lambda}}$ | $\varepsilon_{\lambda 0}$ | $\rho_{\lambda 0}$ (расч.) |
|--------------|--------------------|-------------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 3,40         | 0,0337             | 831,1                               | 1,449         | 0,0225        | 1,44952         | 55°23'56"               | 0,966305                  | 0,033695                   |
| 3,50         | 0,0305             | 459,32                              | 1,423         | 0,0128        | 1,42340         | 54 55 37                | 0,969496                  | 0,030504                   |
| 3,60         | 0,0280             | 272,13                              | 1,402         | 0,00783       | 1,40200         | 54 30 04                | 0,971980                  | 0,028020                   |
| 3,70         | 0,0259             | 230,83                              | 1,381         | 0,00619       | 1,38100         | 54 05 30                | 0,974388                  | 0,025612                   |
| 3,80         | 0,0236             | 189,31                              | 1,363         | 0,00596       | 1,36300         | 53 44 00                | 0,976395                  | 0,023605                   |
| 3,90         | 0,0225             | 190,01                              | 1,353         | 0,00590       | 1,35300         | 53 31 55                | 0,977487                  | 0,022513                   |
| 4,03         | 0,0219             | 199,45                              | 1,347         | 0,00642       | 1,34700         | 53 24 37                | 0,978134                  | 0,021866                   |
| 4,10         | 0,0218             | 217,50                              | 1,346         | 0,00709       | 1,34600         | 53 23 23                | 0,978239                  | 0,021761                   |
| 4,20         | 0,0216             | 260,12                              | 1,344         | 0,00871       | 1,34404         | 53 21 00                | 0,978449                  | 0,021551                   |
| 4,30         | 0,0215             | 315,26                              | 1,343         | 0,0108        | 1,34303         | 53 19 46                | 0,978548                  | 0,021452                   |
| 4,40         | 0,0214             | 379,31                              | 1,342         | 0,0133        | 1,34205         | 53 18 33                | 0,978644                  | 0,021356                   |
| 4,50         | 0,0213             | 457,69                              | 1,341         | 0,0164        | 1,34109         | 53 17 22                | 0,978734                  | 0,021266                   |
| 4,60         | 0,0211             | 529,66                              | 1,339         | 0,0194        | 1,33948         | 53 15 24                | 0,978927                  | 0,021073                   |
| 4,70         | 0,0210             | 540,00                              | 1,338         | 0,0202        | 1,33770         | 53 13 13                | 0,979027                  | 0,020973                   |
| 4,80         | 0,0208             | 521,05                              | 1,336         | 0,0199        | 1,33592         | 53 11 01                | 0,979240                  | 0,020760                   |
| 4,90         | 0,0205             | 481,80                              | 1,334         | 0,0188        | 1,33415         | 53 08 49                | 0,979458                  | 0,020542                   |
| 5,00         | 0,0202             | 424,53                              | 1,331         | 0,0169        | 1,33110         | 53 05 18                | 0,979785                  | 0,020215                   |
| 5,20         | 0,0198             | 345,40                              | 1,322         | 0,0143        | 1,32207         | 52 53 47                | 0,980732                  | 0,019268                   |
| 5,30         | 0,0186             | 338,87                              | 1,315         | 0,0143        | 1,31508         | 52 45 01                | 0,981448                  | 0,018552                   |
| 5,40         | 0,0180             | 339,50                              | 1,309         | 0,0146        | 1,30907         | 52 37 26                | 0,982052                  | 0,017948                   |
| 5,50         | 0,0173             | 397,27                              | 1,302         | 0,0174        | 1,30212         | 52 28 46                | 0,982733                  | 0,017267                   |
| 5,60         | 0,0166             | 520,23                              | 1,295         | 0,0232        | 1,29522         | 52 19 45                | 0,983377                  | 0,016623                   |
| 5,70         | 0,0157             | 740,91                              | 1,284         | 0,0340        | 1,28445         | 52 05 51                | 0,984321                  | 0,015679                   |
| 5,80         | 0,0140             | 1115,2                              | 1,263         | 0,0515        | 1,26409         | 51 39 11                | 0,985983                  | 0,014017                   |
| 5,85         | 0,0125             | 1401,7                              | 1,242         | 0,0653        | 1,24317         | 51 11 11                | 0,987511                  | 0,012489                   |
| 5,90         | 0,0150             | 1700,6                              | 1,266         | 0,0799        | 1,26852         | 51 45 24                | 0,984996                  | 0,015604                   |
| 6,00         | 0,0202             | 2553,4                              | 1,304         | 0,1220        | 1,30969         | 52 38 13                | 0,979843                  | 0,020157                   |
| 6,04         | 0,0216             | 2852,4                              | 1,312         | 0,1372        | 1,31914         | 53 50 11                | 0,978344                  | 0,021656                   |
| 6,10         | 0,0228             | 2503,0                              | 1,331         | 0,1216        | 1,33617         | 53 11 19                | 0,977177                  | 0,022823                   |
| 6,20         | 0,0246             | 1904,0                              | 1,358         | 0,0940        | 1,36126         | 53 41 55                | 0,975399                  | 0,024601                   |
| 6,30         | 0,0234             | 1531,1                              | 1,352         | 0,0768        | 1,35419         | 53 33 22                | 0,976561                  | 0,023439                   |
| 6,40         | 0,0222             | 1228,4                              | 1,344         | 0,0626        | 1,34547         | 53 22 44                | 0,977765                  | 0,022235                   |
| 6,50         | 0,0212             | 1012,5                              | 1,336         | 0,0524        | 1,33702         | 53 12 21                | 0,978819                  | 0,021181                   |
| 6,60         | 0,0205             | 879,2                               | 1,331         | 0,0462        | 1,33181         | 52 05 55                | 0,979451                  | 0,020549                   |
| 6,70         | 0,0200             | 843,5                               | 1,326         | 0,0450        | 1,32678         | 52 59 40                | 0,979990                  | 0,020010                   |
| 6,80         | 0,0198             | 827,5                               | 1,324         | 0,0448        | 1,32477         | 52 57 17                | 0,980199                  | 0,019801                   |
| 6,90         | 0,0197             | 820,92                              | 1,323         | 0,0451        | 1,32375         | 52 55 53                | 0,980297                  | 0,019703                   |
| 7,00         | 0,0195             | 819,92                              | 1,321         | 0,0457        | 1,32178         | 52 53 25                | 0,980492                  | 0,019508                   |
| 7,20         | 0,0187             | 806,61                              | 1,313         | 0,0463        | 1,31381         | 52 43 25                | 0,981295                  | 0,018705                   |
| 7,40         | 0,0177             | 790,15                              | 1,303         | 0,0466        | 1,30384         | 52 30 46                | 0,982288                  | 0,017712                   |

| $\lambda$ мк | $\rho_{\lambda 0}$ | $a_{\lambda} \frac{1}{\text{см}}$ | $n_{\lambda}$ | $x_{\lambda}$ | $ n_{\lambda} $ | $\varphi_{\lambda}$ | $\varepsilon_{\lambda 0}$ | $\rho_{\lambda 0}$ (расч.) |
|--------------|--------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-----------------|---------------------|---------------------------|----------------------------|
| 7,60         | 0,0172             | 799,82                            | 1,298         | 0,0484        | 1,29890         | 52°24'28"           | 0,982748                  | 0,017252                   |
| 7,80         | 0,0168             | 760,0                             | 1,294         | 0,0472        | 1,29487         | 52 19 18            | 0,983159                  | 0,016841                   |
| 8,00         | 0,0166             | 741,04                            | 1,292         | 0,0472        | 1,28987         | 52 16 46            | 0,973352                  | 0,016648                   |
| 8,20         | 0,0164             | 729,5                             | 1,289         | 0,0472        | 1,29288         | 52 12 53            | 0,983641                  | 0,016359                   |
| 8,40         | 0,0162             | 707,13                            | 1,287         | 0,0473        | 1,28789         | 52 10 20            | 0,983831                  | 0,016169                   |
| 8,60         | 0,0157             | 695,07                            | 1,282         | 0,0476        | 1,28288         | 52 03 49            | 0,984301                  | 0,015699                   |
| 8,80         | 0,0151             | 689,29                            | 1,276         | 0,0483        | 1,27673         | 51 55 48            | 0,984851                  | 0,015149                   |
| 9,00         | 0,0144             | 694,94                            | 1,268         | 0,0498        | 1,26858         | 51 45 07            | 0,985562                  | 0,014438                   |
| 9,20         | 0,0135             | 707,13                            | 1,257         | 0,0518        | 1,25805         | 51 31 10            | 0,986514                  | 0,013486                   |
| 9,40         | 0,0127             | 724,2                             | 1,247         | 0,0542        | 1,24818         | 51 17 58            | 0,987342                  | 0,012658                   |
| 9,60         | 0,0118             | 735,26                            | 1,236         | 0,0562        | 1,23728         | 51 02 15            | 0,988236                  | 0,011764                   |
| 9,80         | 0,0109             | 762,52                            | 1,224         | 0,0595        | 1,22543         | 50 47 33            | 0,989148                  | 0,010852                   |
| 10,0         | 0,0099             | 754,86                            | 1,212         | 0,0601        | 1,21349         | 50 30 32            | 0,990084                  | 0,009916                   |
| 10,2         | 0,0092             | 764,65                            | 1,202         | 0,0621        | 1,20360         | 50 16 44            | 0,990797                  | 0,009203                   |
| 10,4         | 0,0085             | 829,71                            | 1,190         | 0,0687        | 1,19198         | 50 00 20            | 0,991497                  | 0,008503                   |
| 10,6         | 0,0078             | 950,29                            | 1,175         | 0,0802        | 1,17774         | 49 39 56            | 0,992177                  | 0,007823                   |
| 10,8         | 0,0073             | 1100,1                            | 1,159         | 0,0946        | 1,16286         | 49 18 22            | 0,992671                  | 0,007329                   |
| 10,9         | 0,0070             | 1144,2                            | 1,150         | 0,0993        | 1,15428         | 49 05 42            | 0,993014                  | 0,006989                   |
| 11,0         | 0,0072             | 1299,9                            | 1,143         | 0,1138        | 1,14865         | 48 57 32            | 0,992748                  | 0,007252                   |
| 11,1         | 0,0077             | 1459,5                            | 1,137         | 0,1290        | 1,14431         | 48 51 00            | 0,992274                  | 0,007726                   |
| 11,2         | 0,0084             | 1649,1                            | 1,129         | 0,1471        | 1,13898         | 48 43 04            | 0,991595                  | 0,008405                   |
| 11,3         | 0,0092             | 1819,1                            | 1,121         | 0,1637        | 1,13290         | 48 33 55            | 0,990843                  | 0,009157                   |
| 11,4         | 0,0097             | 1929,2                            | 1,114         | 0,1751        | 1,130308        | 48 30 02            | 0,990298                  | 0,009702                   |
| 11,5         | 0,0102             | 1999,6                            | 1,111         | 1,1831        | 1,12685         | 48 24 47            | 0,989789                  | 0,010211                   |
| 11,6         | 0,0109             | 2036,0                            | 1,118         | 0,1880        | 1,13371         | 48 35 08            | 0,989103                  | 0,010897                   |
| 11,7         | 0,0119             | 2079,3                            | 1,130         | 0,1957        | 1,14648         | 48 54 14            | 0,988103                  | 0,011897                   |
| 11,8         | 0,0130             | 2119,1                            | 1,144         | 0,1991        | 1,16115         | 49 15 52            | 0,986978                  | 0,013022                   |
| 12,0         | 0,0147             | 2154,0                            | 1,165         | 0,2058        | 1,18303         | 49 47 22            | 0,985289                  | 0,014711                   |
| 12,5         | 0,0215             | 2449,3                            | 1,219         | 0,2438        | 1,24318         | 51 11 14            | 0,978449                  | 0,021551                   |
| 13,0         | 0,0302             | 2819,7                            | 1,270         | 0,2918        | 1,30308         | 52 29 50            | 0,969827                  | 0,030173                   |
| 13,5         | 0,0355             | 2976,7                            | 1,297         | 0,3202        | 1,33594         | 53 11 02            | 0,964539                  | 0,035461                   |
| 14,0         | 0,0410             | 3202,8                            | 1,309         | 0,3582        | 1,35712         | 53 36 53            | 0,959012                  | 0,040988                   |
| 14,5         | 0,0472             | 3479,1                            | 1,313         | 0,4028        | 1,37340         | 53 56 33            | 0,952793                  | 0,047207                   |
| 15,0         | 0,0512             | 3598,4                            | 1,315         | 0,4088        | 1,38241         | 54 07 09            | 0,948781                  | 0,051219                   |

Примечания: 1. Величины  $\rho_{\lambda 0}$ ,  $n_{\lambda}$  и  $x_{\lambda}$  приведены для  $t=20^{\circ}$  С ( $\lambda$  от 1 до 9 мк) и  $18^{\circ}$  С ( $\lambda > 9$  мк).

2.  $\rho_{\lambda 0}$ ,  $x_{\lambda}$  — экспериментальные данные;  $n_{\lambda}$ ,  $a_{\lambda}$ ,  $|n_{\lambda}|$ ,  $\varphi_{\lambda}$ ,  $\varepsilon_{\lambda 0}$  — расчетные данные.

$\varphi = 10^\circ$ 

| $\lambda$<br>МК | Коэффициент излучения      |                            |                         | $\lambda$<br>МК | Коэффициент излучения      |                            |                         | $\lambda$<br>МК | Коэффициент излучения      |                            |                         | $\frac{ \varepsilon_{p\lambda} }{ \varepsilon_{s\lambda} }$ |
|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_\lambda $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_\lambda $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_\lambda $ |                                                             |
| 1,00            | 0,98126                    | 0,97943                    | 0,98035                 | 4,20            | 0,97943                    | 0,97745                    | 0,97844                 | 8,60            | 0,98505                    | 0,98354                    | 0,98429                 | 1,00154                                                     |
| 1,05            | 0,98136                    | 0,97954                    | 0,98045                 | 4,30            | 0,97952                    | 0,97755                    | 0,97854                 | 8,80            | 0,98558                    | 0,98411                    | 0,98484                 | 1,00149                                                     |
| 1,10            | 0,98146                    | 0,97965                    | 0,98055                 | 4,40            | 0,97962                    | 0,97765                    | 0,97863                 | 9,00            | 0,98626                    | 0,98485                    | 0,98555                 | 1,00143                                                     |
| 1,20            | 0,98157                    | 0,97975                    | 0,98066                 | 4,50            | 0,97970                    | 0,97774                    | 0,97872                 | 9,20            | 0,98717                    | 0,98584                    | 0,98651                 | 1,00134                                                     |
| 1,30            | 0,98176                    | 0,97997                    | 0,98086                 | 4,60            | 0,97989                    | 0,97794                    | 0,97892                 | 9,40            | 0,98796                    | 0,98671                    | 0,98733                 | 1,00127                                                     |
| 1,40            | 0,98026                    | 0,97834                    | 0,97930                 | 4,70            | 0,97998                    | 0,97805                    | 0,97902                 | 9,60            | 0,98882                    | 0,98764                    | 0,98823                 | 1,00119                                                     |
| 1,50            | 0,98205                    | 0,98029                    | 0,98117                 | 4,80            | 0,98019                    | 0,97827                    | 0,97923                 | 9,80            | 0,98969                    | 0,98859                    | 0,98914                 | 1,00111                                                     |
| 1,60            | 0,98225                    | 0,98050                    | 0,98137                 | 4,90            | 0,98040                    | 0,97850                    | 0,97945                 | 10,0            | 0,99058                    | 0,98957                    | 0,99008                 | 1,00102                                                     |
| 1,70            | 0,98235                    | 0,98061                    | 0,98147                 | 5,00            | 0,98071                    | 0,97884                    | 0,97977                 | 10,2            | 0,99126                    | 0,99032                    | 0,99079                 | 1,00095                                                     |
| 1,80            | 0,98264                    | 0,98092                    | 0,98178                 | 5,10            | 0,98112                    | 0,97928                    | 0,98020                 | 10,4            | 0,99193                    | 0,99105                    | 0,99149                 | 1,00089                                                     |
| 1,90            | 0,98293                    | 0,98124                    | 0,98208                 | 5,20            | 0,98162                    | 0,97982                    | 0,98072                 | 10,6            | 0,99258                    | 0,99176                    | 0,99217                 | 1,00083                                                     |
| 2,00            | 0,98341                    | 0,98176                    | 0,98258                 | 5,30            | 0,98231                    | 0,98057                    | 0,98144                 | 10,8            | 0,99305                    | 0,99228                    | 0,99267                 | 1,00078                                                     |
| 2,20            | 0,98444                    | 0,98288                    | 0,98366                 | 5,40            | 0,98289                    | 0,98120                    | 0,98204                 | 10,9            | 0,99338                    | 0,99264                    | 0,99301                 | 1,00075                                                     |
| 2,40            | 0,98600                    | 0,98457                    | 0,98529                 | 5,50            | 0,98354                    | 0,98190                    | 0,98272                 | 11,0            | 0,99313                    | 0,99235                    | 0,99274                 | 1,00078                                                     |
| 2,50            | 0,98697                    | 0,98563                    | 0,98630                 | 5,60            | 0,98416                    | 0,98257                    | 0,98337                 | 11,1            | 0,99268                    | 0,99185                    | 0,99227                 | 1,00084                                                     |
| 2,60            | 0,98808                    | 0,98685                    | 0,98747                 | 5,70            | 0,98507                    | 0,98356                    | 0,98431                 | 11,2            | 0,99204                    | 0,99114                    | 0,99159                 | 1,00091                                                     |
| 2,70            | 0,99091                    | 0,98994                    | 0,99042                 | 5,80            | 0,98666                    | 0,98529                    | 0,98597                 | 11,3            | 0,99133                    | 0,99034                    | 0,99084                 | 1,00100                                                     |

|      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |
|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|
| 2,74 | 0,99291 | 0,99214 | 0,99253 | 1,00078 | 5,85 | 0,98812 | 0,98688 | 0,98750 | 1,00126 | 11,4 | 0,99082 | 0,98976 | 0,99029 | 1,00106 |
| 2,77 | 0,99146 | 0,99054 | 0,99100 | 1,00093 | 5,90 | 0,98572 | 0,98426 | 0,98499 | 1,00148 | 11,5 | 0,99033 | 0,98923 | 0,98978 | 1,00112 |
| 2,80 | 0,98644 | 0,98506 | 0,98575 | 1,00141 | 6,00 | 0,98078 | 0,97889 | 0,97983 | 1,00193 | 11,6 | 0,98968 | 0,98850 | 0,98910 | 1,00119 |
| 2,85 | 0,98088 | 0,97901 | 0,97995 | 1,00191 | 6,04 | 0,97934 | 0,97732 | 0,97833 | 1,00206 | 11,7 | 0,98873 | 0,98746 | 0,98809 | 1,00128 |
| 2,90 | 0,97636 | 0,97413 | 0,97524 | 1,00229 | 6,10 | 0,97822 | 0,97612 | 0,97717 | 1,00215 | 11,8 | 0,98765 | 0,98629 | 0,98697 | 1,00139 |
| 2,95 | 0,97260 | 0,97008 | 0,97134 | 1,00260 | 6,20 | 0,97650 | 0,97427 | 0,97539 | 1,00228 | 12,0 | 0,98604 | 0,98452 | 0,98529 | 1,00154 |
| 3,00 | 0,96740 | 0,96454 | 0,96599 | 1,00300 | 6,30 | 0,97762 | 0,97548 | 0,97655 | 1,00219 | 12,5 | 0,97949 | 0,97739 | 0,97844 | 1,00215 |
| 3,02 | 0,96661 | 0,96366 | 0,96513 | 1,00306 | 6,40 | 0,97877 | 0,97673 | 0,97775 | 1,00209 | 13,0 | 0,97120 | 0,96842 | 0,96981 | 1,00287 |
| 3,07 | 0,95783 | 0,95428 | 0,95606 | 1,00371 | 6,50 | 0,97979 | 0,97783 | 0,97881 | 1,00200 | 13,5 | 0,96610 | 0,96293 | 0,96452 | 1,00330 |
| 3,10 | 0,95583 | 0,95535 | 0,95709 | 1,00364 | 6,60 | 0,98039 | 0,97849 | 0,97944 | 1,00195 | 14,0 | 0,96078 | 0,95720 | 0,95899 | 1,00375 |
| 3,16 | 0,96049 | 0,95712 | 0,95881 | 1,00352 | 6,70 | 0,98091 | 0,97905 | 0,97998 | 1,00190 | 14,5 | 0,95479 | 0,95075 | 0,95277 | 1,00426 |
| 3,20 | 0,96169 | 0,95840 | 0,96005 | 1,00343 | 6,80 | 0,98111 | 0,97927 | 0,98019 | 1,00188 | 15,0 | 0,95092 | 0,94659 | 0,94876 | 1,00457 |
| 3,30 | 0,96497 | 0,96191 | 0,96344 | 1,00318 | 6,90 | 0,98120 | 0,97937 | 0,98029 | 1,00188 |      |         |         |         |         |
| 3,40 | 0,96772 | 0,96486 | 0,96629 | 1,00297 | 7,00 | 0,98139 | 0,97957 | 0,98048 | 1,00186 |      |         |         |         |         |
| 3,50 | 0,97080 | 0,96816 | 0,96948 | 1,00273 | 7,20 | 0,98216 | 0,98040 | 0,98128 | 1,00179 |      |         |         |         |         |
| 3,60 | 0,97320 | 0,97073 | 0,97197 | 1,00254 | 7,40 | 0,98312 | 0,98144 | 0,98228 | 1,00171 |      |         |         |         |         |
| 3,70 | 0,97552 | 0,97323 | 0,97438 | 1,00235 | 7,60 | 0,98356 | 0,98192 | 0,98274 | 1,00167 |      |         |         |         |         |
| 3,80 | 0,97745 | 0,97531 | 0,97638 | 1,00219 | 7,80 | 0,98395 | 0,98235 | 0,98315 | 1,00164 |      |         |         |         |         |
| 3,90 | 0,97850 | 0,97645 | 0,97748 | 1,00210 | 8,00 | 0,98414 | 0,98255 | 0,98334 | 1,00162 |      |         |         |         |         |
| 4,03 | 0,97913 | 0,97712 | 0,97812 | 1,00205 | 8,20 | 0,98442 | 0,98285 | 0,98363 | 1,00159 |      |         |         |         |         |
| 4,10 | 0,97922 | 0,97723 | 0,97823 | 1,00204 | 8,40 | 0,98460 | 0,98305 | 0,98382 | 1,00158 |      |         |         |         |         |

$\varphi = 20^\circ$ 

| $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\frac{ \varepsilon_{p\lambda} }{ \varepsilon_{s\lambda} }$ |
|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                                                             |
| 1,00            | 0,98399                    | 0,97636                    | 0,98018                   | 3,90            | 0,98157                    | 0,97301                    | 0,97729                   | 1,00880         | 0,98562                    | 0,97862                    | 0,98212                   | 1,00715                                                     |
| 1,05            | 0,98408                    | 0,97648                    | 0,98028                   | 4,03            | 0,98212                    | 0,97377                    | 0,97794                   | 1,00858         | 0,98601                    | 0,97916                    | 0,98258                   | 1,00699                                                     |
| 1,10            | 0,98417                    | 0,97660                    | 0,98039                   | 4,10            | 0,98221                    | 0,97389                    | 0,97805                   | 1,00854         | 0,98635                    | 0,97964                    | 0,98300                   | 1,00685                                                     |
| 1,20            | 0,98426                    | 0,97673                    | 0,98049                   | 4,20            | 0,98239                    | 0,97413                    | 0,97826                   | 1,00847         | 0,98651                    | 0,97987                    | 0,98319                   | 1,00678                                                     |
| 1,30            | 0,98443                    | 0,97697                    | 0,98070                   | 4,30            | 0,98247                    | 0,97425                    | 0,97836                   | 1,00844         | 0,98675                    | 0,98021                    | 0,98348                   | 1,00667                                                     |
| 1,40            | 0,98311                    | 0,97514                    | 0,97913                   | 4,40            | 0,98255                    | 0,97436                    | 0,97846                   | 1,00840         | 0,98691                    | 0,98044                    | 0,98367                   | 1,00661                                                     |
| 1,50            | 0,98469                    | 0,97733                    | 0,98101                   | 4,50            | 0,98263                    | 0,97447                    | 0,97855                   | 1,00838         | 0,98730                    | 0,98099                    | 0,98415                   | 1,00644                                                     |
| 1,60            | 0,98486                    | 0,97757                    | 0,98121                   | 4,60            | 0,98279                    | 0,97469                    | 0,97874                   | 1,00831         | 0,98776                    | 0,98164                    | 0,98470                   | 1,00624                                                     |
| 1,70            | 0,98494                    | 0,97768                    | 0,98131                   | 4,70            | 0,98288                    | 0,97481                    | 0,97884                   | 1,00828         | 0,98835                    | 0,98248                    | 0,98542                   | 1,00598                                                     |
| 1,80            | 0,98520                    | 0,97804                    | 0,98162                   | 4,80            | 0,98306                    | 0,97506                    | 0,97906                   | 1,00820         | 0,98915                    | 0,98361                    | 0,98638                   | 1,00563                                                     |
| 1,90            | 0,98545                    | 0,97840                    | 0,98192                   | 4,90            | 0,98324                    | 0,97531                    | 0,97927                   | 1,00813         | 0,98983                    | 0,98459                    | 0,98721                   | 1,00532                                                     |
| 2,00            | 0,98587                    | 0,97898                    | 0,98243                   | 5,00            | 0,98351                    | 0,97569                    | 0,97960                   | 1,00802         | 0,99057                    | 0,98565                    | 0,98811                   | 1,00499                                                     |
| 2,20            | 0,98677                    | 0,98026                    | 0,98351                   | 5,10            | 0,98387                    | 0,97619                    | 0,98003                   | 1,00787         | 0,99132                    | 0,98674                    | 0,98903                   | 1,00464                                                     |
| 2,40            | 0,98813                    | 0,98217                    | 0,98515                   | 5,20            | 0,98431                    | 0,97680                    | 0,98056                   | 1,00769         | 0,99209                    | 0,98786                    | 0,98997                   | 1,00429                                                     |
| 2,50            | 0,98897                    | 0,98337                    | 0,98617                   | 5,30            | 0,98491                    | 0,97764                    | 0,98128                   | 1,00744         | 0,99267                    | 0,98871                    | 0,99069                   | 1,00400                                                     |

|      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |
|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|
| 2,60 | 0,98993 | 0,98475 | 0,98734 | 1,00526 | 5,40 | 0,98542 | 0,97835 | 0,98188 | 1,00723 | 10,4 | 0,99325 | 0,98955 | 0,99140 | 1,00374 |
| 2,70 | 0,99237 | 0,98828 | 0,99032 | 1,00413 | 5,50 | 0,98599 | 0,97915 | 0,98257 | 1,00699 | 10,6 | 0,99381 | 0,99036 | 0,99208 | 1,00348 |
| 2,74 | 0,99408 | 0,99081 | 0,99245 | 1,00330 | 5,60 | 0,98653 | 0,97991 | 0,98322 | 1,00676 | 10,8 | 0,99421 | 0,99095 | 0,99258 | 1,00330 |
| 2,77 | 0,99284 | 0,98898 | 0,99091 | 1,00391 | 5,70 | 0,98732 | 0,98102 | 0,98417 | 1,00642 | 10,9 | 0,99450 | 0,99136 | 0,99293 | 1,00317 |
| 2,80 | 0,98854 | 0,98271 | 0,98562 | 1,00591 | 5,80 | 0,98870 | 0,98298 | 0,98584 | 1,00583 | 11,0 | 0,99429 | 0,99102 | 0,99266 | 1,00330 |
| 2,85 | 0,98367 | 0,97588 | 0,97978 | 1,00797 | 5,85 | 0,98997 | 0,98478 | 0,98738 | 1,00527 | 11,1 | 0,99392 | 0,99043 | 0,99217 | 1,00352 |
| 2,90 | 0,97969 | 0,97040 | 0,97505 | 1,00957 | 5,90 | 0,98789 | 0,98180 | 0,98484 | 1,00621 | 11,2 | 0,99339 | 0,98958 | 0,99148 | 1,00385 |
| 2,95 | 0,97636 | 0,96589 | 0,97112 | 1,01084 | 6,00 | 0,98360 | 0,97571 | 0,97966 | 1,00809 | 11,3 | 0,99280 | 0,98864 | 0,99072 | 1,00420 |
| 3,00 | 0,97176 | 0,95975 | 0,96576 | 1,01251 | 6,04 | 0,98235 | 0,97394 | 0,97814 | 1,00863 | 11,4 | 0,99238 | 0,98796 | 0,99017 | 1,00447 |
| 3,02 | 0,97102 | 0,95877 | 0,96490 | 1,01278 | 6,10 | 0,98135 | 0,97260 | 0,97697 | 1,00899 | 11,5 | 0,99198 | 0,98733 | 0,98965 | 1,00471 |
| 3,07 | 0,96313 | 0,94845 | 0,95579 | 1,01547 | 6,20 | 0,97982 | 0,97056 | 0,97519 | 1,00955 | 11,6 | 0,99142 | 0,98650 | 0,98896 | 1,00499 |
| 3,10 | 0,96404 | 0,94963 | 0,95683 | 1,01517 | 6,30 | 0,98080 | 0,97192 | 0,97636 | 1,00914 | 11,7 | 0,99060 | 0,98530 | 0,98795 | 1,00538 |
| 3,16 | 0,96553 | 0,95157 | 0,95855 | 1,01467 | 6,40 | 0,98182 | 0,97332 | 0,97757 | 1,00873 | 11,8 | 0,98968 | 0,98395 | 0,98682 | 1,00582 |
| 3,20 | 0,96661 | 0,95298 | 0,95980 | 1,01430 | 6,50 | 0,98270 | 0,97456 | 0,97863 | 1,00836 | 12,0 | 0,98828 | 0,98195 | 0,98511 | 1,00645 |
| 3,30 | 0,96955 | 0,95684 | 0,96319 | 1,01328 | 6,60 | 0,98324 | 0,97530 | 0,97927 | 1,00814 | 12,5 | 0,98259 | 0,97385 | 0,97822 | 1,00898 |
| 3,40 | 0,97201 | 0,96011 | 0,96606 | 1,01240 | 6,70 | 0,98369 | 0,97593 | 0,97981 | 1,00796 | 13,0 | 0,97532 | 0,96377 | 0,96954 | 1,01199 |
| 3,50 | 0,97476 | 0,96377 | 0,96926 | 1,01140 | 6,80 | 0,98387 | 0,97617 | 0,98002 | 1,00788 | 13,5 | 0,97081 | 0,95765 | 0,96423 | 1,01374 |
| 3,60 | 0,97689 | 0,96663 | 0,97176 | 1,01061 | 6,90 | 0,98395 | 0,97629 | 0,98012 | 1,00785 | 14,0 | 0,96608 | 0,95125 | 0,95867 | 1,01560 |
| 3,70 | 0,97894 | 0,96941 | 0,97418 | 1,00983 | 7,00 | 0,98411 | 0,97651 | 0,98031 | 1,00778 | 14,5 | 0,96075 | 0,94406 | 0,95241 | 1,01768 |
| 3,80 | 0,98065 | 0,97174 | 0,97620 | 1,00916 | 7,20 | 0,98479 | 0,97745 | 0,98112 | 1,00750 | 15,0 | 0,95729 | 0,93945 | 0,94837 | 1,01899 |

$$\varphi = 30^\circ$$

| $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\frac{ \varepsilon_{p\lambda} }{ \varepsilon_{s\lambda} }$ | $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\frac{ \varepsilon_{p\lambda} }{ \varepsilon_{s\lambda} }$ | $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\frac{ \varepsilon_{p\lambda} }{ \varepsilon_{s\lambda} }$ |
|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                                                             |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                                                             |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                                                             |
| 1,00            | 0,98853                    | 0,97010                    | 0,97923                   | 1,01900                                                     | 3,90            | 0,98667                    | 0,96604                    | 0,97634                   | 1,02135                                                     | 7,40            | 0,98977                    | 0,97284                    | 0,98130                   | 1,01740                                                     |
| 1,05            | 0,98860                    | 0,97025                    | 0,97942                   | 1,01891                                                     | 4,03            | 0,98709                    | 0,96695                    | 0,97702                   | 1,02083                                                     | 7,60            | 0,99006                    | 0,97350                    | 0,98178                   | 1,01701                                                     |
| 1,10            | 0,98866                    | 0,97040                    | 0,97953                   | 1,01882                                                     | 4,10            | 0,98716                    | 0,96710                    | 0,97713                   | 1,02074                                                     | 7,80            | 0,99033                    | 0,97410                    | 0,98221                   | 1,01666                                                     |
| 1,20            | 0,98873                    | 0,97054                    | 0,97964                   | 1,01874                                                     | 4,20            | 0,98730                    | 0,96740                    | 0,97734                   | 1,02057                                                     | 8,00            | 0,99045                    | 0,97437                    | 0,98241                   | 1,01650                                                     |
| 1,30            | 0,98886                    | 0,97084                    | 0,97985                   | 1,01857                                                     | 4,30            | 0,98736                    | 0,96754                    | 0,97745                   | 1,02049                                                     | 8,20            | 0,99063                    | 0,97479                    | 0,98271                   | 1,01625                                                     |
| 1,40            | 0,98786                    | 0,96862                    | 0,97824                   | 1,01986                                                     | 4,40            | 0,98743                    | 0,96767                    | 0,97755                   | 1,02041                                                     | 8,40            | 0,99075                    | 0,97507                    | 0,98291                   | 1,01608                                                     |
| 1,50            | 0,98906                    | 0,97128                    | 0,98017                   | 1,01830                                                     | 4,50            | 0,98748                    | 0,96780                    | 0,97764                   | 1,02034                                                     | 8,60            | 0,99104                    | 0,97575                    | 0,98339                   | 1,01568                                                     |
| 1,60            | 0,98919                    | 0,97157                    | 0,98038                   | 1,01814                                                     | 4,60            | 0,98761                    | 0,96807                    | 0,97784                   | 1,02018                                                     | 8,80            | 0,99139                    | 0,97655                    | 0,98397                   | 1,01520                                                     |
| 1,70            | 0,98925                    | 0,97171                    | 0,98048                   | 1,01805                                                     | 4,70            | 0,98767                    | 0,96821                    | 0,97794                   | 1,02010                                                     | 9,00            | 0,99183                    | 0,97758                    | 0,98470                   | 1,01458                                                     |
| 1,80            | 0,98945                    | 0,97215                    | 0,98080                   | 1,01780                                                     | 4,80            | 0,98781                    | 0,96851                    | 0,97816                   | 1,01993                                                     | 9,20            | 0,99242                    | 0,97897                    | 0,98570                   | 1,01373                                                     |
| 1,90            | 0,98964                    | 0,97258                    | 0,98111                   | 1,01754                                                     | 4,90            | 0,98795                    | 0,96882                    | 0,97839                   | 1,01975                                                     | 9,40            | 0,99293                    | 0,98019                    | 0,98656                   | 1,01300                                                     |
| 2,00            | 0,98996                    | 0,97330                    | 0,98163                   | 1,01711                                                     | 5,00            | 0,98816                    | 0,96929                    | 0,97873                   | 1,01947                                                     | 9,60            | 0,99347                    | 0,98151                    | 0,98749                   | 1,01219                                                     |
| 2,20            | 0,99064                    | 0,97486                    | 0,98275                   | 1,01619                                                     | 5,10            | 0,98844                    | 0,96989                    | 0,97917                   | 1,01912                                                     | 9,80            | 0,99402                    | 0,98286                    | 0,98844                   | 1,01135                                                     |
| 2,40            | 0,99165                    | 0,97721                    | 0,98443                   | 1,01477                                                     | 5,20            | 0,98877                    | 0,97064                    | 0,97970                   | 1,01869                                                     | 10,0            | 0,99458                    | 0,98426                    | 0,98942                   | 1,01048                                                     |
| 2,50            | 0,99228                    | 0,97870                    | 0,98549                   | 1,01387                                                     | 5,30            | 0,98923                    | 0,97166                    | 0,98044                   | 1,01809                                                     | 10,2            | 0,99500                    | 0,98533                    | 0,99017                   | 1,00981                                                     |

|      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |
|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|
| 2,60 | 0,99299 | 0,98041 | 0,98670 | 1,01283 | 5,40 | 0,98961 | 0,97252 | 0,98107 | 1,01758 | 10,4 | 0,99542 | 0,98639 | 0,99090 | 1,00916 |
| 2,70 | 0,99477 | 0,98482 | 0,98980 | 1,01010 | 5,50 | 0,99005 | 0,97350 | 0,98177 | 1,01700 | 10,6 | 0,99582 | 0,98740 | 0,99161 | 1,00853 |
| 2,74 | 0,99600 | 0,98801 | 0,99201 | 1,00809 | 5,60 | 0,99046 | 0,97443 | 0,98244 | 1,01645 | 10,8 | 0,99612 | 0,98812 | 0,99212 | 1,00810 |
| 2,77 | 0,99512 | 0,98568 | 0,99040 | 1,00957 | 5,70 | 0,99105 | 0,97579 | 0,98342 | 1,01564 | 10,9 | 0,99633 | 0,98864 | 0,99248 | 1,00778 |
| 2,80 | 0,99195 | 0,97787 | 0,98491 | 1,01440 | 5,80 | 0,99209 | 0,97819 | 0,98514 | 1,01420 | 11,0 | 0,99620 | 0,98819 | 0,99219 | 1,00811 |
| 2,85 | 0,98829 | 0,96950 | 0,97890 | 1,01937 | 5,85 | 0,99304 | 0,98042 | 0,98673 | 1,01286 | 11,1 | 0,99595 | 0,98740 | 0,99168 | 1,00866 |
| 2,90 | 0,98522 | 0,96288 | 0,97405 | 1,02319 | 5,90 | 0,99150 | 0,97671 | 0,98411 | 1,01513 | 11,2 | 0,99559 | 0,98628 | 0,99094 | 1,00945 |
| 2,95 | 0,98261 | 0,95748 | 0,97005 | 1,02624 | 6,00 | 0,98827 | 0,96923 | 0,97875 | 1,01964 | 11,3 | 0,99520 | 0,98503 | 0,99012 | 1,01032 |
| 3,00 | 0,97896 | 0,95021 | 0,96458 | 1,03026 | 6,04 | 0,98731 | 0,96706 | 0,97719 | 1,02094 | 11,4 | 0,99492 | 0,98412 | 0,98952 | 1,01097 |
| 3,02 | 0,97837 | 0,94905 | 0,96371 | 1,03089 | 6,10 | 0,98653 | 0,96547 | 0,97600 | 1,02181 | 11,5 | 0,99465 | 0,98329 | 0,98900 | 1,01155 |
| 3,07 | 0,97197 | 0,93698 | 0,95448 | 1,03734 | 6,20 | 0,98533 | 0,96304 | 0,97419 | 1,02314 | 11,6 | 0,99425 | 0,98224 | 0,98824 | 1,01222 |
| 3,10 | 0,97271 | 0,93835 | 0,95553 | 1,03662 | 6,30 | 0,98609 | 0,96469 | 0,97539 | 1,02218 | 11,7 | 0,99365 | 0,98073 | 0,98719 | 1,01317 |
| 3,16 | 0,97393 | 0,94062 | 0,95727 | 1,03542 | 6,40 | 0,98687 | 0,96640 | 0,97663 | 1,02118 | 11,8 | 0,99297 | 0,97906 | 0,98601 | 1,01421 |
| 3,20 | 0,97481 | 0,94226 | 0,95853 | 1,03454 | 6,50 | 0,98755 | 0,96790 | 0,97772 | 1,02030 | 12,0 | 0,99193 | 0,97657 | 0,98425 | 1,01573 |
| 3,30 | 0,97718 | 0,94680 | 0,96199 | 1,03209 | 6,60 | 0,98796 | 0,96880 | 0,97838 | 1,01978 | 12,5 | 0,98765 | 0,96659 | 0,97712 | 1,02178 |
| 3,40 | 0,97915 | 0,95064 | 0,96490 | 1,02999 | 6,70 | 0,98830 | 0,96956 | 0,97893 | 1,01933 | 13,0 | 0,98200 | 0,95438 | 0,96819 | 1,02894 |
| 3,50 | 0,98134 | 0,95498 | 0,96816 | 1,02760 | 6,80 | 0,98844 | 0,96986 | 0,97915 | 1,01916 | 13,5 | 0,97843 | 0,94707 | 0,96275 | 1,03311 |
| 3,60 | 0,98302 | 0,95839 | 0,97070 | 1,02570 | 6,90 | 0,98850 | 0,96999 | 0,97925 | 1,01907 | 14,0 | 0,97465 | 0,93942 | 0,95704 | 1,03750 |
| 3,70 | 0,98463 | 0,96171 | 0,97317 | 1,02382 | 7,00 | 0,98863 | 0,97028 | 0,97945 | 1,01891 | 14,5 | 0,97035 | 0,93087 | 0,95061 | 1,04241 |
| 3,80 | 0,98595 | 0,96451 | 0,97523 | 1,02223 | 7,20 | 0,98914 | 0,97142 | 0,98028 | 1,01824 | 15,0 | 0,96753 | 0,92543 | 0,94647 | 1,04550 |

$\varphi = 40^\circ$ 

| $\lambda$<br>МК | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\lambda$<br>МК | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\lambda$<br>МК | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\frac{ \varepsilon_{p\lambda} }{ \varepsilon_{s\lambda} }$ |
|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                                                             |
| 1,00            | 0,99443                    | 0,95820                    | 0,97631                   | 3,90            | 0,99333                    | 0,95291                    | 0,97312                   | 7,40            | 0,99514                    | 0,96178                    | 0,97846                   | 1,03469                                                     |
| 1,05            | 0,99447                    | 0,95839                    | 0,97643                   | 4,03            | 0,99358                    | 0,95409                    | 0,97384                   | 7,60            | 0,99531                    | 0,96265                    | 0,97898                   | 1,03393                                                     |
| 1,10            | 0,99450                    | 0,95859                    | 0,97654                   | 4,10            | 0,99362                    | 0,95429                    | 0,97395                   | 7,80            | 0,99545                    | 0,96343                    | 0,97944                   | 1,03324                                                     |
| 1,20            | 0,99454                    | 0,95878                    | 0,97666                   | 4,20            | 0,99370                    | 0,95467                    | 0,97419                   | 8,00            | 0,99552                    | 0,96380                    | 0,97966                   | 1,03291                                                     |
| 1,30            | 0,99462                    | 0,95916                    | 0,97689                   | 4,30            | 0,99374                    | 0,95485                    | 0,97430                   | 8,20            | 0,99563                    | 0,96436                    | 0,97999                   | 1,03242                                                     |
| 1,40            | 0,99403                    | 0,95626                    | 0,97515                   | 4,40            | 0,99378                    | 0,95503                    | 0,97440                   | 8,40            | 0,99569                    | 0,96472                    | 0,98021                   | 1,03210                                                     |
| 1,50            | 0,99473                    | 0,95974                    | 0,97724                   | 4,50            | 0,99381                    | 0,95519                    | 0,97450                   | 8,60            | 0,99586                    | 0,96563                    | 0,98074                   | 1,03130                                                     |
| 1,60            | 0,99481                    | 0,96012                    | 0,97746                   | 4,60            | 0,99389                    | 0,95554                    | 0,97471                   | 8,80            | 0,99605                    | 0,96669                    | 0,98137                   | 1,03037                                                     |
| 1,70            | 0,99485                    | 0,96031                    | 0,97758                   | 4,70            | 0,99392                    | 0,95573                    | 0,97483                   | 9,00            | 0,99629                    | 0,96807                    | 0,98218                   | 1,02914                                                     |
| 1,80            | 0,99496                    | 0,96089                    | 0,97792                   | 4,80            | 0,99401                    | 0,95612                    | 0,97506                   | 9,20            | 0,99661                    | 0,96994                    | 0,98326                   | 1,02749                                                     |
| 1,90            | 0,99507                    | 0,96146                    | 0,97826                   | 4,90            | 0,99409                    | 0,95652                    | 0,97501                   | 9,40            | 0,99688                    | 0,97158                    | 0,98423                   | 1,02604                                                     |
| 2,00            | 0,99525                    | 0,96249                    | 0,97882                   | 5,00            | 0,99421                    | 0,95713                    | 0,97567                   | 9,60            | 0,99716                    | 0,97337                    | 0,98527                   | 1,02445                                                     |
| 2,20            | 0,99563                    | 0,96447                    | 0,98005                   | 5,10            | 0,99437                    | 0,95792                    | 0,97615                   | 9,80            | 0,99745                    | 0,97521                    | 0,98633                   | 1,02281                                                     |
| 2,40            | 0,99619                    | 0,96761                    | 0,98190                   | 5,20            | 0,99457                    | 0,95890                    | 0,97673                   | 10,0            | 0,99773                    | 0,97713                    | 0,98743                   | 1,02109                                                     |
| 2,50            | 0,99653                    | 0,96961                    | 0,98307                   | 5,30            | 0,99483                    | 0,96024                    | 0,97753                   | 10,2            | 0,99795                    | 0,97860                    | 0,98827                   | 1,01976                                                     |

|      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |
|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|
| 2,60 | 0,99691 | 0,97192 | 0,98442 | 1,02572 | 5,40 | 0,99505 | 0,96138 | 0,97821 | 1,03503 | 10,4 | 0,99815 | 0,98005 | 0,98910 | 1,01847 |
| 2,70 | 0,99783 | 0,97794 | 0,98788 | 1,02033 | 5,50 | 0,99530 | 0,96267 | 0,97898 | 1,03389 | 10,6 | 0,99835 | 0,98144 | 0,98989 | 1,01723 |
| 2,74 | 0,99842 | 0,98237 | 0,99040 | 1,01634 | 5,60 | 0,99553 | 0,96339 | 0,97971 | 1,03282 | 10,8 | 0,99849 | 0,98241 | 0,99045 | 1,01637 |
| 2,77 | 0,99800 | 0,97912 | 0,98856 | 1,01928 | 5,70 | 0,99586 | 0,96569 | 0,98078 | 1,03124 | 10,9 | 0,99859 | 0,98311 | 0,99085 | 1,01574 |
| 2,80 | 0,99636 | 0,96846 | 0,98241 | 1,02880 | 5,80 | 0,99643 | 0,96890 | 0,98266 | 1,02812 | 11,0 | 0,99853 | 0,98241 | 0,99047 | 1,01641 |
| 2,85 | 0,99428 | 0,95738 | 0,97583 | 1,03854 | 5,85 | 0,99694 | 0,97188 | 0,98441 | 1,02578 | 11,1 | 0,99842 | 0,98124 | 0,98983 | 1,01751 |
| 2,90 | 0,99244 | 0,94880 | 0,97062 | 1,04600 | 5,90 | 0,99611 | 0,96687 | 0,98149 | 1,03024 | 11,2 | 0,99826 | 0,97956 | 0,98891 | 1,01910 |
| 2,95 | 0,99082 | 0,94190 | 0,96636 | 1,05194 | 6,00 | 0,99426 | 0,95689 | 0,97557 | 1,03906 | 11,3 | 0,99808 | 0,97770 | 0,98789 | 1,02085 |
| 3,00 | 0,98848 | 0,93274 | 0,96061 | 1,05976 | 6,04 | 0,99370 | 0,95403 | 0,97386 | 1,04158 | 11,4 | 0,99794 | 0,97632 | 0,98713 | 1,02214 |
| 3,02 | 0,98809 | 0,93129 | 0,95969 | 1,06099 | 6,10 | 0,99323 | 0,95201 | 0,97262 | 1,04329 | 11,5 | 0,99781 | 0,97510 | 0,98645 | 1,02329 |
| 3,07 | 0,98379 | 0,91641 | 0,95010 | 1,07353 | 6,20 | 0,99251 | 0,94895 | 0,97073 | 1,04590 | 11,6 | 0,99760 | 0,97364 | 0,98562 | 1,02461 |
| 3,10 | 0,98430 | 0,91808 | 0,95119 | 1,07213 | 6,30 | 0,99297 | 0,95111 | 0,97204 | 1,04402 | 11,7 | 0,99729 | 0,97158 | 0,98443 | 1,02646 |
| 3,16 | 0,98513 | 0,92086 | 0,95299 | 1,06980 | 6,40 | 0,99344 | 0,95333 | 0,97339 | 1,04207 | 11,8 | 0,99692 | 0,96931 | 0,98312 | 1,02848 |
| 3,20 | 0,98572 | 0,92289 | 0,95430 | 1,06809 | 6,50 | 0,99385 | 0,95529 | 0,97457 | 1,04036 | 12,0 | 0,99635 | 0,96599 | 0,98117 | 1,03143 |
| 3,30 | 0,98731 | 0,92851 | 0,95791 | 1,06332 | 6,60 | 0,99409 | 0,95647 | 0,97528 | 1,03933 | 12,5 | 0,99385 | 0,95271 | 0,97328 | 1,04318 |
| 3,40 | 0,98861 | 0,93332 | 0,96096 | 1,05924 | 6,70 | 0,99429 | 0,95747 | 0,97588 | 1,03846 | 13,0 | 0,99029 | 0,93690 | 0,96359 | 1,05698 |
| 3,50 | 0,99002 | 0,93877 | 0,96439 | 1,05460 | 6,80 | 0,99437 | 0,95786 | 0,97612 | 1,03812 | 13,5 | 0,98791 | 0,92763 | 0,95777 | 1,06498 |
| 3,60 | 0,99108 | 0,94309 | 0,96708 | 1,05089 | 6,90 | 0,99441 | 0,95804 | 0,97623 | 1,03796 | 14,0 | 0,98529 | 0,91795 | 0,95162 | 1,07336 |
| 3,70 | 0,99208 | 0,94733 | 0,96971 | 1,04724 | 7,00 | 0,99448 | 0,95840 | 0,97644 | 1,03633 | 14,5 | 0,98219 | 0,90721 | 0,94470 | 1,03265 |
| 3,80 | 0,99290 | 0,95093 | 0,97191 | 1,04413 | 7,20 | 0,99478 | 0,95991 | 0,97734 | 1,03633 | 15,0 | 0,98009 | 0,90043 | 0,94027 | 1,08848 |

$\varphi = 50^\circ$ 

| $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения      |                            |                         | $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения      |                            |                         | $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения      |                            |                         | $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения      |                            |                         |
|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|
|                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_\lambda $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_\lambda $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_\lambda $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_\lambda $ |
| 1,00            | 0,99953                    | 0,93508                    | 0,96731                 | 1,06893         | 0,99937                    | 0,93018                    | 0,96477                 | 1,07439         | 0,99976                    | 0,94553                    | 0,97264                 | 1,05735         |                            |                            |                         |
| 1,05            | 0,99954                    | 0,93535                    | 0,96745                 | 1,06863         | 0,99938                    | 0,93043                    | 0,96490                 | 1,07410         | 0,99978                    | 0,94706                    | 0,97342                 | 1,05567         |                            |                            |                         |
| 1,10            | 0,99955                    | 0,93562                    | 0,96758                 | 1,06833         | 0,99939                    | 0,93067                    | 0,96503                 | 1,07384         | 0,99981                    | 0,94904                    | 0,97443                 | 1,05350         |                            |                            |                         |
| 1,20            | 0,99956                    | 0,93589                    | 0,96772                 | 1,06803         | 0,99939                    | 0,93089                    | 0,96514                 | 1,07359         | 0,99985                    | 0,95175                    | 0,97580                 | 1,05054         |                            |                            |                         |
| 1,30            | 0,99957                    | 0,93643                    | 0,96800                 | 1,06743         | 0,99941                    | 0,93138                    | 0,96540                 | 1,07304         | 0,99987                    | 0,95413                    | 0,97700                 | 1,04794         |                            |                            |                         |
| 1,40            | 0,99945                    | 0,93238                    | 0,96591                 | 1,07193         | 0,99942                    | 0,93163                    | 0,96552                 | 1,07276         | 0,99990                    | 0,95676                    | 0,97833                 | 1,04509         |                            |                            |                         |
| 1,50            | 0,99959                    | 0,93723                    | 0,96842                 | 1,06653         | 0,99943                    | 0,93218                    | 0,96581                 | 1,07215         | 0,99991                    | 0,95947                    | 0,97969                 | 1,04215         |                            |                            |                         |
| 1,60            | 0,99961                    | 0,93777                    | 0,96869                 | 1,06594         | 0,99945                    | 0,93274                    | 0,96610                 | 1,07152         | 0,99993                    | 0,96234                    | 0,98113                 | 1,03905         |                            |                            |                         |
| 1,70            | 0,99962                    | 0,93804                    | 0,96883                 | 1,06564         | 0,99948                    | 0,93358                    | 0,96653                 | 1,07059         | 0,99993                    | 0,96456                    | 0,98224                 | 1,03667         |                            |                            |                         |
| 1,80            | 0,99964                    | 0,93885                    | 0,96924                 | 1,06475         | 0,99952                    | 0,93469                    | 0,96710                 | 1,06935         | 0,99992                    | 0,96673                    | 0,98332                 | 1,03424         |                            |                            |                         |
| 1,90            | 0,99966                    | 0,93965                    | 0,96966                 | 1,06386         | 0,99956                    | 0,93605                    | 0,96780                 | 1,06785         | 0,99990                    | 0,96879                    | 0,98434                 | 1,03210         |                            |                            |                         |
| 2,00            | 0,99969                    | 0,94099                    | 0,97034                 | 1,06238         | 0,99961                    | 0,93793                    | 0,96877                 | 1,06576         | 0,99984                    | 0,97018                    | 0,98501                 | 1,03057         |                            |                            |                         |
| 2,20            | 0,99976                    | 0,94393                    | 0,97184                 | 1,05914         | 0,99965                    | 0,93954                    | 0,96959                 | 1,06398         | 0,99982                    | 0,97123                    | 0,98552                 | 1,02944         |                            |                            |                         |
| 2,40            | 0,99984                    | 0,94844                    | 0,97414                 | 1,05420         | 0,99970                    | 0,94136                    | 0,97053                 | 1,06197         | 0,99975                    | 0,97000                    | 0,98488                 | 1,03066         |                            |                            |                         |
| 2,50            | 0,99988                    | 0,95133                    | 0,97561                 | 1,05104         | 0,99973                    | 0,94309                    | 0,97141                 | 1,06006         | 0,99965                    | 0,96801                    | 0,98383                 | 1,03268         |                            |                            |                         |
| 2,60            | 0,99992                    | 0,95470                    | 0,97731                 | 1,04737         | 0,99977                    | 0,94565                    | 0,97271                 | 1,05723         | 0,99950                    | 0,96517                    | 0,98234                 | 1,03557         |                            |                            |                         |
| 2,70            | 0,99998                    | 0,96366                    | 0,98182                 | 1,03769         | 0,99983                    | 0,95023                    | 0,97503                 | 1,05220         | 0,99932                    | 0,96204                    | 0,98068                 | 1,03875         |                            |                            |                         |

|      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |
|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|
| 2,74 | 0,99999 | 0,97042 | 0,98520 | 1,03047 | 5,85 | 0,99986 | 0,95454 | 0,97720 | 1,04747 | 11,4 | 0,99916 | 0,95972 | 0,97944 | 1,04110 |
| 2,77 | 0,99997 | 0,96542 | 0,98270 | 1,03579 | 5,90 | 0,99972 | 0,94721 | 0,97347 | 1,05544 | 11,5 | 0,99904 | 0,95770 | 0,97837 | 1,04316 |
| 2,80 | 0,99982 | 0,94961 | 0,97472 | 1,05288 | 6,00 | 0,99925 | 0,93293 | 0,96609 | 1,07108 | 11,6 | 0,99899 | 0,95552 | 0,97725 | 1,04550 |
| 2,85 | 0,99945 | 0,93387 | 0,96666 | 1,07022 | 6,04 | 0,99905 | 0,92890 | 0,96398 | 1,07551 | 11,7 | 0,99894 | 0,95250 | 0,97572 | 1,04876 |
| 2,90 | 0,99899 | 0,92206 | 0,96053 | 1,08343 | 6,10 | 0,99902 | 0,92624 | 0,96263 | 1,07857 | 11,8 | 0,99888 | 0,94922 | 0,97405 | 1,05232 |
| 2,95 | 0,99851 | 0,91278 | 0,95564 | 1,09393 | 6,20 | 0,99893 | 0,92219 | 0,96056 | 1,08321 | 12,0 | 0,99880 | 0,94449 | 0,97164 | 1,05750 |
| 3,00 | 0,99772 | 0,90069 | 0,94521 | 1,10773 | 6,30 | 0,99910 | 0,92518 | 0,96214 | 1,07990 | 12,5 | 0,99801 | 0,92573 | 0,96187 | 1,07807 |
| 3,02 | 0,99758 | 0,89880 | 0,94819 | 1,10990 | 6,40 | 0,99925 | 0,92827 | 0,96376 | 1,07647 | 13,0 | 0,99650 | 0,90425 | 0,95038 | 1,10203 |
| 3,07 | 0,99587 | 0,87971 | 0,93779 | 1,13204 | 6,50 | 0,99936 | 0,93099 | 0,96517 | 1,07344 | 13,5 | 0,99536 | 0,89203 | 0,94369 | 1,11584 |
| 3,10 | 0,99609 | 0,88183 | 0,93896 | 1,12957 | 6,60 | 0,99943 | 0,93263 | 0,96603 | 1,07162 | 14,0 | 0,99377 | 0,87931 | 0,93654 | 1,13017 |
| 3,16 | 0,99644 | 0,88537 | 0,94090 | 1,12545 | 6,70 | 0,99947 | 0,93403 | 0,96675 | 1,07007 | 14,5 | 0,99162 | 0,86535 | 0,92849 | 1,14591 |
| 3,20 | 0,99669 | 0,88796 | 0,94232 | 1,12244 | 6,80 | 0,99949 | 0,93457 | 0,96703 | 1,06947 | 15,0 | 0,99012 | 0,85670 | 0,92341 | 1,15574 |
| 3,30 | 0,99734 | 0,89524 | 0,94629 | 1,11405 | 6,90 | 0,99950 | 0,93482 | 0,96716 | 1,06918 |      |         |         |         |         |
| 3,40 | 0,99783 | 0,90150 | 0,94966 | 1,10685 | 7,00 | 0,99951 | 0,93533 | 0,96742 | 1,06862 |      |         |         |         |         |
| 3,50 | 0,99832 | 0,90868 | 0,95350 | 1,09864 | 7,20 | 0,99957 | 0,93743 | 0,96850 | 1,06629 |      |         |         |         |         |
| 3,60 | 0,99866 | 0,91443 | 0,95654 | 1,09210 | 7,40 | 0,99964 | 0,94006 | 0,96985 | 1,06338 |      |         |         |         |         |
| 3,70 | 0,99895 | 0,92015 | 0,95955 | 1,08564 | 7,60 | 0,99967 | 0,94129 | 0,97048 | 1,06202 |      |         |         |         |         |
| 3,80 | 0,99917 | 0,92504 | 0,96211 | 1,08013 | 7,80 | 0,99969 | 0,94240 | 0,97105 | 1,06079 |      |         |         |         |         |
| 3,90 | 0,99928 | 0,92776 | 0,96352 | 1,07709 | 8,00 | 0,99970 | 0,94293 | 0,97132 | 1,06021 |      |         |         |         |         |
| 4,03 | 0,99934 | 0,92938 | 0,96436 | 1,07527 | 8,20 | 0,99972 | 0,94372 | 0,97172 | 1,05934 |      |         |         |         |         |
| 4,10 | 0,99935 | 0,92965 | 0,96450 | 1,07498 | 8,40 | 0,99973 | 0,94424 | 0,97198 | 1,05877 |      |         |         |         |         |

$\varphi = 60^\circ$ 

| $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\frac{ \varepsilon_{p\lambda} }{ \varepsilon_{s\lambda} }$ | $\frac{ \varepsilon_{p\lambda} }{ \varepsilon_{s\lambda} }$ |
|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                                                             |                                                             |
| 1,00            | 0,99560                    | 0,88767                    | 0,94163                   | 3,90            | 0,99596                    | 0,87716                    | 0,93656                   | 7,40            | 0,99519                    | 0,89486                    | 0,94503                   | 1,13544                                                     | 1,11212                                                     |
| 1,05            | 0,99558                    | 0,88806                    | 0,94182                   | 4,03            | 0,99588                    | 0,87947                    | 0,93767                   | 7,60            | 0,99513                    | 0,89666                    | 0,94590                   | 1,13236                                                     | 1,10981                                                     |
| 1,10            | 0,99557                    | 0,88845                    | 0,94201                   | 4,10            | 0,99586                    | 0,87985                    | 0,93786                   | 7,80            | 0,99509                    | 0,89833                    | 0,94671                   | 1,13185                                                     | 1,10771                                                     |
| 1,20            | 0,99556                    | 0,88884                    | 0,94220                   | 4,20            | 0,99583                    | 0,88060                    | 0,93822                   | 8,00            | 0,99507                    | 0,89911                    | 0,94709                   | 1,13085                                                     | 1,10673                                                     |
| 1,30            | 0,99553                    | 0,88962                    | 0,94258                   | 4,30            | 0,99582                    | 0,88096                    | 0,93839                   | 8,20            | 0,99504                    | 0,90028                    | 0,94766                   | 1,13037                                                     | 1,10525                                                     |
| 1,40            | 0,99573                    | 0,88376                    | 0,93975                   | 4,40            | 0,99580                    | 0,88130                    | 0,93855                   | 8,40            | 0,99502                    | 0,90106                    | 0,94804                   | 1,12992                                                     | 1,10428                                                     |
| 1,50            | 0,99550                    | 0,89080                    | 0,94315                   | 4,50            | 0,99578                    | 0,88162                    | 0,93870                   | 8,60            | 0,99497                    | 0,90299                    | 0,94898                   | 1,12949                                                     | 1,10185                                                     |
| 1,60            | 0,99547                    | 0,89159                    | 0,94353                   | 4,60            | 0,99575                    | 0,88231                    | 0,93903                   | 8,80            | 0,99491                    | 0,90529                    | 0,95010                   | 1,12857                                                     | 1,09899                                                     |
| 1,70            | 0,99546                    | 0,89198                    | 0,94372                   | 4,70            | 0,99573                    | 0,88268                    | 0,93902                   | 9,00            | 0,99483                    | 0,90829                    | 0,95156                   | 1,12808                                                     | 1,09527                                                     |
| 1,80            | 0,99542                    | 0,89316                    | 0,94429                   | 4,80            | 0,99571                    | 0,88346                    | 0,93958                   | 9,20            | 0,99473                    | 0,91242                    | 0,95357                   | 1,12705                                                     | 1,09021                                                     |
| 1,90            | 0,99539                    | 0,89435                    | 0,94487                   | 4,90            | 0,99568                    | 0,88427                    | 0,93998                   | 9,40            | 0,99465                    | 0,91609                    | 0,95537                   | 1,12599                                                     | 1,08576                                                     |
| 2,00            | 0,99533                    | 0,89632                    | 0,94583                   | 5,00            | 0,99564                    | 0,88549                    | 0,94057                   | 9,60            | 0,99458                    | 0,92017                    | 0,95737                   | 1,12440                                                     | 1,08087                                                     |
| 2,20            | 0,99522                    | 0,90069                    | 0,94796                   | 5,10            | 0,99560                    | 0,88709                    | 0,94134                   | 9,80            | 0,99451                    | 0,92443                    | 0,95947                   | 1,12231                                                     | 1,07580                                                     |
| 2,40            | 0,99506                    | 0,90749                    | 0,95128                   | 5,20            | 0,99553                    | 0,88907                    | 0,94230                   | 10,0            | 0,99448                    | 0,92901                    | 0,96175                   | 1,11975                                                     | 1,07047                                                     |
| 2,50            | 0,99498                    | 0,91190                    | 0,95344                   | 5,30            | 0,99545                    | 0,89181                    | 0,94363                   | 10,2            | 0,99446                    | 0,93258                    | 0,96352                   | 1,11620                                                     | 1,06636                                                     |

|      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |
|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|
| 2,60 | 0,99491 | 0,91713 | 0,95602 | 1,08481 | 5,40 | 0,99538 | 0,89417 | 0,94477 | 1,11319 | 10,4 | 0,99439 | 0,93606 | 0,96522 | 1,06231 |
| 2,70 | 0,99482 | 0,93135 | 0,96309 | 1,06814 | 5,50 | 0,99529 | 0,89686 | 0,94607 | 1,10976 | 10,6 | 0,99421 | 0,93932 | 0,96676 | 1,05843 |
| 2,74 | 0,99490 | 0,94250 | 0,96870 | 1,05560 | 5,60 | 0,99520 | 0,89942 | 0,94731 | 1,10649 | 10,8 | 0,99390 | 0,94138 | 0,96764 | 1,05578 |
| 2,77 | 0,99473 | 0,93416 | 0,96445 | 1,06484 | 5,70 | 0,99506 | 0,90322 | 0,94914 | 1,10167 | 10,9 | 0,99378 | 0,94302 | 0,96840 | 1,05382 |
| 2,80 | 0,99482 | 0,90915 | 0,95199 | 1,09422 | 5,80 | 0,99478 | 0,91009 | 0,95243 | 1,09305 | 11,0 | 0,99326 | 0,94063 | 0,96694 | 1,05596 |
| 2,85 | 0,99539 | 0,88580 | 0,94059 | 1,12372 | 5,85 | 0,99451 | 0,91665 | 0,95558 | 1,08495 | 11,1 | 0,99260 | 0,93688 | 0,96474 | 1,05947 |
| 2,90 | 0,99598 | 0,86903 | 0,93250 | 1,14608 | 5,90 | 0,99453 | 0,90532 | 0,94993 | 1,09853 | 11,2 | 0,99163 | 0,93159 | 0,96161 | 1,06445 |
| 2,95 | 0,99650 | 0,85622 | 0,92636 | 1,16383 | 6,00 | 0,99444 | 0,88399 | 0,93922 | 1,12495 | 11,3 | 0,99055 | 0,92585 | 0,95820 | 1,06988 |
| 3,00 | 0,99721 | 0,83999 | 0,91860 | 1,18717 | 6,04 | 0,99433 | 0,87810 | 0,93622 | 1,13237 | 11,4 | 0,98965 | 0,92158 | 0,95561 | 1,07386 |
| 3,02 | 0,99732 | 0,83750 | 0,91741 | 1,19083 | 6,10 | 0,99487 | 0,87450 | 0,93469 | 1,13764 | 11,5 | 0,98902 | 0,91802 | 0,95352 | 1,07734 |
| 3,07 | 0,99837 | 0,81281 | 0,90559 | 1,22829 | 6,20 | 0,99561 | 0,86906 | 0,93233 | 1,14562 | 11,6 | 0,98892 | 0,91461 | 0,95177 | 1,08125 |
| 3,10 | 0,99826 | 0,81550 | 0,90688 | 1,22411 | 6,30 | 0,99566 | 0,87332 | 0,93449 | 1,14008 | 11,7 | 0,98895 | 0,91005 | 0,94950 | 1,08671 |
| 3,16 | 0,99809 | 0,82003 | 0,90906 | 1,21714 | 6,40 | 0,99564 | 0,87775 | 0,93670 | 1,13430 | 11,8 | 0,98908 | 0,90520 | 0,94714 | 1,09267 |
| 3,20 | 0,99799 | 0,82338 | 0,91068 | 1,21206 | 6,50 | 0,99558 | 0,88167 | 0,93863 | 1,12921 | 12,0 | 0,98936 | 0,89832 | 0,94384 | 1,10134 |
| 3,30 | 0,99772 | 0,83288 | 0,91530 | 1,19792 | 6,60 | 0,99555 | 0,88405 | 0,93980 | 1,12612 | 12,5 | 0,98922 | 0,87121 | 0,93021 | 1,13546 |
| 3,40 | 0,99742 | 0,84115 | 0,91928 | 1,18578 | 6,70 | 0,99549 | 0,88606 | 0,94078 | 1,12349 | 13,0 | 0,98885 | 0,84168 | 0,91526 | 1,17486 |
| 3,50 | 0,99703 | 0,85077 | 0,92390 | 1,17190 | 6,80 | 0,99546 | 0,88685 | 0,94116 | 1,12247 | 13,5 | 0,98856 | 0,82553 | 0,90705 | 1,19749 |
| 3,60 | 0,99670 | 0,85859 | 0,92765 | 1,16085 | 6,90 | 0,99545 | 0,88721 | 0,94133 | 1,12199 | 14,0 | 0,98725 | 0,80885 | 0,89805 | 1,22057 |
| 3,70 | 0,99638 | 0,86648 | 0,93143 | 1,14991 | 7,00 | 0,99542 | 0,88794 | 0,94168 | 1,12104 | 14,5 | 0,98511 | 0,79087 | 0,88799 | 1,24560 |
| 3,80 | 0,99611 | 0,87332 | 0,93471 | 1,14059 | 7,20 | 0,99531 | 0,89100 | 0,94316 | 1,11708 | 15,0 | 0,98365 | 0,77996 | 0,88181 | 1,26115 |

$\varphi = 70^\circ$ 

| $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\frac{ \varepsilon_{p\lambda} }{ \varepsilon_{s\lambda} }$ | $\frac{ \varepsilon_{p\lambda} }{ \varepsilon_{s\lambda} }$ |
|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                                                             |                                                             |
| 1,00            | 0,95272                    | 0,78417                    | 0,86844                   | 3,90            | 0,95284                    | 0,76956                    | 0,86120                   | 7,40            | 0,95228                    | 0,79429                    | 0,87329                   | 1,23816                                                     | 1,19890                                                     |
| 1,05            | 0,95272                    | 0,78472                    | 0,86872                   | 4,03            | 0,95278                    | 0,77274                    | 0,86276                   | 7,60            | 0,95228                    | 0,79688                    | 0,87458                   | 1,23300                                                     | 1,19502                                                     |
| 1,10            | 0,95272                    | 0,78527                    | 0,86900                   | 4,10            | 0,95277                    | 0,77326                    | 0,86302                   | 7,80            | 0,95237                    | 0,79929                    | 0,87583                   | 1,23215                                                     | 1,19150                                                     |
| 1,20            | 0,95273                    | 0,78583                    | 0,86928                   | 4,20            | 0,95275                    | 0,77430                    | 0,86353                   | 8,00            | 0,95239                    | 0,80043                    | 0,87641                   | 1,23047                                                     | 1,18984                                                     |
| 1,30            | 0,95273                    | 0,78694                    | 0,86984                   | 4,30            | 0,95274                    | 0,77479                    | 0,86376                   | 8,20            | 0,95244                    | 0,80215                    | 0,87729                   | 1,22967                                                     | 1,18736                                                     |
| 1,40            | 0,95273                    | 0,77869                    | 0,86571                   | 4,40            | 0,95272                    | 0,77526                    | 0,86399                   | 8,40            | 0,95247                    | 0,80328                    | 0,87788                   | 1,22890                                                     | 1,18572                                                     |
| 1,50            | 0,95275                    | 0,78861                    | 0,87068                   | 4,50            | 0,95269                    | 0,77570                    | 0,86420                   | 8,60            | 0,95256                    | 0,80613                    | 0,87934                   | 1,22818                                                     | 1,18164                                                     |
| 1,60            | 0,95276                    | 0,78973                    | 0,87125                   | 4,60            | 0,95266                    | 0,77665                    | 0,86466                   | 8,80            | 0,95267                    | 0,80952                    | 0,88109                   | 1,22662                                                     | 1,17683                                                     |
| 1,70            | 0,95277                    | 0,79030                    | 0,87153                   | 4,70            | 0,95265                    | 0,77716                    | 0,86490                   | 9,00            | 0,95282                    | 0,81400                    | 0,88341                   | 1,22581                                                     | 1,17055                                                     |
| 1,80            | 0,95279                    | 0,79199                    | 0,87239                   | 4,80            | 0,95264                    | 0,77825                    | 0,86545                   | 9,20            | 0,95310                    | 0,82022                    | 0,88666                   | 1,22408                                                     | 1,16200                                                     |
| 1,90            | 0,95282                    | 0,79369                    | 0,87325                   | 4,90            | 0,95264                    | 0,77938                    | 0,86601                   | 9,40            | 0,95337                    | 0,82582                    | 0,88960                   | 1,22230                                                     | 1,15446                                                     |
| 2,00            | 0,95287                    | 0,79654                    | 0,87471                   | 5,00            | 0,95265                    | 0,78109                    | 0,86687                   | 9,60            | 0,95377                    | 0,83214                    | 0,89295                   | 1,21964                                                     | 1,14616                                                     |
| 2,20            | 0,95305                    | 0,80291                    | 0,87898                   | 5,10            | 0,95266                    | 0,78335                    | 0,86801                   | 9,80            | 0,95420                    | 0,83882                    | 0,89651                   | 1,21615                                                     | 1,13755                                                     |
| 2,40            | 0,95346                    | 0,81299                    | 0,88322                   | 5,20            | 0,95268                    | 0,78614                    | 0,86941                   | 10,0            | 0,95489                    | 0,84617                    | 0,90053                   | 1,21184                                                     | 1,12144                                                     |
| 2,50            | 0,95383                    | 0,81967                    | 0,88675                   | 5,30            | 0,95271                    | 0,79004                    | 0,87138                   | 10,2            | 0,95542                    | 0,85196                    | 0,90369                   | 1,20590                                                     | 1,12144                                                     |

|      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |
|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|
| 2,60 | 0,95437 | 0,82771 | 0,89104 | 1,15303 | 5,40 | 0,95276 | 0,79342 | 0,87309 | 1,20083 | 10,4 | 0,95576 | 0,85759 | 0,90667 | 1,11448 |
| 2,70 | 0,95644 | 0,85042 | 0,90343 | 1,12467 | 5,50 | 0,95281 | 0,79729 | 0,87505 | 1,19506 | 10,6 | 0,95571 | 0,86275 | 0,90923 | 1,10775 |
| 2,74 | 0,95881 | 0,86919 | 0,91400 | 1,10311 | 5,60 | 0,95285 | 0,80101 | 0,87693 | 1,18956 | 10,8 | 0,95491 | 0,86568 | 0,91029 | 1,10307 |
| 2,77 | 0,95666 | 0,85494 | 0,90580 | 1,11898 | 5,70 | 0,95287 | 0,80655 | 0,87971 | 1,18142 | 10,9 | 0,95473 | 0,86821 | 0,91147 | 1,09965 |
| 2,80 | 0,95291 | 0,81530 | 0,88411 | 1,16878 | 5,80 | 0,95291 | 0,81669 | 0,88480 | 1,16680 | 11,0 | 0,95240 | 0,86333 | 0,90787 | 1,10317 |
| 2,85 | 0,95192 | 0,78135 | 0,86664 | 1,21830 | 5,85 | 0,95301 | 0,82655 | 0,88978 | 1,15300 | 11,1 | 0,94940 | 0,85614 | 0,90277 | 1,10894 |
| 2,90 | 0,95229 | 0,75837 | 0,85533 | 1,25572 | 5,90 | 0,95150 | 0,80924 | 0,88037 | 1,17579 | 11,2 | 0,94521 | 0,84618 | 0,89569 | 1,11703 |
| 2,95 | 0,95309 | 0,74146 | 0,84728 | 1,28542 | 6,00 | 0,94895 | 0,77814 | 0,86355 | 1,21952 | 11,3 | 0,94075 | 0,83570 | 0,88822 | 1,12571 |
| 3,00 | 0,95468 | 0,72074 | 0,83771 | 1,32457 | 6,04 | 0,94816 | 0,76984 | 0,85900 | 1,23163 | 11,4 | 0,93725 | 0,82798 | 0,88262 | 1,13197 |
| 3,02 | 0,95496 | 0,71762 | 0,83629 | 1,33072 | 6,10 | 0,94946 | 0,76521 | 0,85734 | 1,24078 | 11,5 | 0,93483 | 0,82186 | 0,87834 | 1,13745 |
| 3,07 | 0,95833 | 0,68754 | 0,82293 | 1,39386 | 6,20 | 0,95123 | 0,75820 | 0,85472 | 1,25460 | 11,6 | 0,93431 | 0,81681 | 0,87556 | 1,14384 |
| 3,10 | 0,95793 | 0,69075 | 0,82434 | 1,38680 | 6,30 | 0,95167 | 0,76407 | 0,85787 | 1,24553 | 11,7 | 0,93415 | 0,81032 | 0,87223 | 1,15282 |
| 3,16 | 0,95731 | 0,69620 | 0,82675 | 1,37505 | 6,40 | 0,95195 | 0,77019 | 0,86107 | 1,23599 | 11,8 | 0,93425 | 0,80356 | 0,86890 | 1,16265 |
| 3,20 | 0,95693 | 0,70027 | 0,82860 | 1,36652 | 6,50 | 0,95212 | 0,77564 | 0,86388 | 1,22753 | 12,0 | 0,93469 | 0,79412 | 0,86411 | 1,17700 |
| 3,30 | 0,95608 | 0,71197 | 0,83402 | 1,34287 | 6,60 | 0,95223 | 0,77898 | 0,86561 | 1,22240 | 12,5 | 0,93298 | 0,75702 | 0,84500 | 1,23243 |
| 3,40 | 0,95527 | 0,72232 | 0,83879 | 1,32252 | 6,70 | 0,95224 | 0,78180 | 0,86702 | 1,21800 | 13,0 | 0,93170 | 0,71896 | 0,82533 | 1,29589 |
| 3,50 | 0,95439 | 0,73456 | 0,84448 | 1,29926 | 6,80 | 0,95224 | 0,78291 | 0,86757 | 1,21629 | 13,5 | 0,93141 | 0,69911 | 0,81526 | 1,33228 |
| 3,60 | 0,95378 | 0,74471 | 0,84924 | 1,28074 | 6,90 | 0,95223 | 0,78342 | 0,86783 | 1,21548 | 14,0 | 0,92896 | 0,67886 | 0,80391 | 1,36841 |
| 3,70 | 0,95328 | 0,75513 | 0,85420 | 1,26240 | 7,00 | 0,95222 | 0,78444 | 0,86833 | 1,21388 | 14,5 | 0,92513 | 0,65757 | 0,79135 | 1,40688 |
| 3,80 | 0,95296 | 0,76433 | 0,85865 | 1,24679 | 7,20 | 0,95222 | 0,78877 | 0,87049 | 1,20723 | 15,0 | 0,92280 | 0,64498 | 0,78389 | 1,43073 |

Таблица 9

 $\varphi = 80^\circ$ 

| $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\frac{ \varepsilon_{p\lambda} }{ \varepsilon_{s\lambda} }$ | $\frac{ \varepsilon_{p\lambda} }{ \varepsilon_{s\lambda} }$ |
|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                                                             |                                                             |
| 1,00            | 0,76161                    | 0,54727                    | 0,65444                   | 3,90            | 0,76026                    | 0,53117                    | 0,64571                   | 7,40            | 0,76186                    | 0,55864                    | 0,66025                   | 1,43129                                                     | 1,36377                                                     |
| 1,05            | 0,76167                    | 0,54789                    | 0,65478                   | 4,03            | 0,76048                    | 0,53462                    | 0,64755                   | 7,60            | 0,76216                    | 0,56162                    | 0,66189                   | 1,42248                                                     | 1,35709                                                     |
| 1,10            | 0,76174                    | 0,54851                    | 0,65513                   | 4,10            | 0,76052                    | 0,53519                    | 0,64785                   | 7,80            | 0,76261                    | 0,56442                    | 0,66352                   | 1,42103                                                     | 1,35114                                                     |
| 1,20            | 0,76181                    | 0,54914                    | 0,65547                   | 4,20            | 0,76059                    | 0,53633                    | 0,64846                   | 8,00            | 0,76280                    | 0,56575                    | 0,66428                   | 1,41815                                                     | 1,34829                                                     |
| 1,30            | 0,76194                    | 0,55039                    | 0,65617                   | 4,30            | 0,76061                    | 0,53686                    | 0,64874                   | 8,20            | 0,76310                    | 0,56776                    | 0,66543                   | 1,41678                                                     | 1,34406                                                     |
| 1,40            | 0,76102                    | 0,54117                    | 0,65109                   | 4,40            | 0,76063                    | 0,53738                    | 0,64900                   | 8,40            | 0,76330                    | 0,56909                    | 0,66619                   | 1,41544                                                     | 1,34126                                                     |
| 1,50            | 0,76216                    | 0,55229                    | 0,65722                   | 4,50            | 0,76062                    | 0,53785                    | 0,64924                   | 8,60            | 0,76381                    | 0,57244                    | 0,66813                   | 1,41419                                                     | 1,33431                                                     |
| 1,60            | 0,76231                    | 0,55356                    | 0,65794                   | 4,60            | 0,76066                    | 0,53890                    | 0,64978                   | 8,80            | 0,76444                    | 0,57648                    | 0,67046                   | 1,41150                                                     | 1,32605                                                     |
| 1,70            | 0,76239                    | 0,55420                    | 0,65830                   | 4,70            | 0,76069                    | 0,53945                    | 0,65007                   | 9,00            | 0,76531                    | 0,58185                    | 0,67358                   | 1,41011                                                     | 1,31531                                                     |
| 1,80            | 0,76263                    | 0,55613                    | 0,65938                   | 4,80            | 0,76079                    | 0,54066                    | 0,65073                   | 9,20            | 0,76664                    | 0,58943                    | 0,67804                   | 1,40716                                                     | 1,30066                                                     |
| 1,90            | 0,76288                    | 0,55808                    | 0,66048                   | 4,90            | 0,76092                    | 0,54191                    | 0,65142                   | 9,40            | 0,76792                    | 0,59636                    | 0,68214                   | 1,40414                                                     | 1,28769                                                     |
| 2,00            | 0,76333                    | 0,56137                    | 0,66235                   | 5,00            | 0,76113                    | 0,54382                    | 0,65248                   | 9,60            | 0,76956                    | 0,60431                    | 0,68693                   | 1,39959                                                     | 1,27344                                                     |
| 2,20            | 0,76445                    | 0,56880                    | 0,66662                   | 5,10            | 0,76140                    | 0,54634                    | 0,65387                   | 9,80            | 0,77135                    | 0,61287                    | 0,69211                   | 1,39364                                                     | 1,25858                                                     |
| 2,40            | 0,76654                    | 0,58084                    | 0,67369                   | 5,20            | 0,76174                    | 0,54948                    | 0,65561                   | 10,0            | 0,77380                    | 0,62253                    | 0,69817                   | 1,38631                                                     | 1,24298                                                     |
| 2,50            | 0,76816                    | 0,58901                    | 0,67858                   | 5,30            | 0,76225                    | 0,55390                    | 0,65808                   | 10,2            | 0,77574                    | 0,63027                    | 0,70301                   | 1,37615                                                     | 1,23080                                                     |

|      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |
|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|
| 2,60 | 0,77034 | 0,59904 | 0,68469 | 1,28595 | 5,40 | 0,76274 | 0,55776 | 0,66025 | 1,36750 | 10,4 | 0,77719 | 0,63780 | 0,70749 | 1,21855 |
| 2,70 | 0,77797 | 0,62878 | 0,70338 | 1,23726 | 5,50 | 0,76330 | 0,56222 | 0,66276 | 1,35765 | 10,6 | 0,77758 | 0,64454 | 0,71106 | 1,20641 |
| 2,74 | 0,78612 | 0,65515 | 0,72064 | 1,19991 | 5,60 | 0,76381 | 0,56654 | 0,66518 | 1,34821 | 10,8 | 0,77580 | 0,64785 | 0,71183 | 1,19751 |
| 2,77 | 0,77905 | 0,63481 | 0,70693 | 1,22721 | 5,70 | 0,76452 | 0,57303 | 0,66877 | 1,33416 | 10,9 | 0,77552 | 0,65101 | 0,71327 | 1,19124 |
| 2,80 | 0,76565 | 0,58344 | 0,67455 | 1,31230 | 5,80 | 0,76582 | 0,58511 | 0,67546 | 1,30885 | 11,0 | 0,76931 | 0,64310 | 0,70620 | 1,19626 |
| 2,85 | 0,75970 | 0,54396 | 0,65183 | 1,39663 | 5,85 | 0,76722 | 0,59712 | 0,68217 | 1,28487 | 11,0 | 0,76151 | 0,63203 | 0,69677 | 1,20486 |
| 2,90 | 0,75807 | 0,51904 | 0,63856 | 1,46051 | 5,90 | 0,76195 | 0,57580 | 0,66887 | 1,32330 | 11,2 | 0,75110 | 0,61731 | 0,68420 | 1,21673 |
| 2,95 | 0,75803 | 0,50152 | 0,62977 | 1,51148 | 6,00 | 0,75349 | 0,53976 | 0,64663 | 1,39598 | 11,3 | 0,74061 | 0,60246 | 0,67154 | 1,22930 |
| 3,00 | 0,75933 | 0,48085 | 0,62009 | 1,57913 | 6,04 | 0,75115 | 0,53056 | 0,64086 | 1,41576 | 11,4 | 0,73273 | 0,59183 | 0,66228 | 1,23807 |
| 3,02 | 0,75962 | 0,47781 | 0,61872 | 1,58979 | 6,10 | 0,75325 | 0,52584 | 0,63955 | 1,43246 | 11,5 | 0,72743 | 0,58380 | 0,65562 | 1,24603 |
| 3,07 | 0,76397 | 0,44934 | 0,60666 | 1,70019 | 6,20 | 0,75601 | 0,51868 | 0,63734 | 1,45755 | 11,6 | 0,72633 | 0,57803 | 0,65218 | 1,25657 |
| 3,10 | 0,76340 | 0,45231 | 0,60785 | 1,68777 | 6,30 | 0,75741 | 0,52502 | 0,64122 | 1,44265 | 11,7 | 0,72592 | 0,57086 | 0,64839 | 1,27164 |
| 3,16 | 0,76256 | 0,45739 | 0,60998 | 1,66720 | 6,40 | 0,75858 | 0,53168 | 0,64513 | 1,42675 | 11,8 | 0,72599 | 0,56353 | 0,64476 | 1,28830 |
| 3,20 | 0,76211 | 0,46122 | 0,61167 | 1,65236 | 6,50 | 0,75948 | 0,53767 | 0,64858 | 1,41254 | 12,0 | 0,72654 | 0,55345 | 0,63999 | 1,31274 |
| 3,30 | 0,76129 | 0,47240 | 0,61685 | 1,61155 | 6,60 | 0,76006 | 0,54139 | 0,65072 | 1,40390 | 12,5 | 0,72160 | 0,51402 | 0,61781 | 1,40384 |
| 3,40 | 0,76056 | 0,48248 | 0,62152 | 1,57637 | 6,70 | 0,76038 | 0,54452 | 0,65245 | 1,39642 | 13,0 | 0,71777 | 0,47619 | 0,59698 | 1,50732 |
| 3,50 | 0,75989 | 0,49465 | 0,62727 | 1,53621 | 6,80 | 0,76050 | 0,54576 | 0,65313 | 1,39349 | 13,5 | 0,71670 | 0,45744 | 0,58707 | 1,56675 |
| 3,60 | 0,75962 | 0,50496 | 0,63229 | 1,50433 | 6,90 | 0,76055 | 0,54633 | 0,65344 | 1,39211 | 14,0 | 0,71223 | 0,43872 | 0,57547 | 1,62342 |
| 3,70 | 0,75965 | 0,51577 | 0,63771 | 1,47284 | 7,00 | 0,76063 | 0,54747 | 0,65405 | 1,38936 | 14,5 | 0,70590 | 0,41962 | 0,56276 | 1,68223 |
| 3,80 | 0,75996 | 0,52553 | 0,64275 | 1,44607 | 7,20 | 0,76112 | 0,55234 | 0,65673 | 1,37799 | 15,0 | 0,70229 | 0,40864 | 0,55546 | 1,71862 |

$\varphi = 82^\circ$ 

| $\lambda$<br>МК | Коэффициент излучения      |                            |                         | $\lambda$<br>МК | Коэффициент излучения      |                            |                         | $\lambda$<br>МК | Коэффициент излучения      |                            |                         | $\frac{ \varepsilon_{p\lambda} }{ \varepsilon_{s\lambda} }$ |
|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_\lambda $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_\lambda $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_\lambda $ |                                                             |
| 1,00            | 0,68013                    | 0,47091                    | 0,57552                 | 3,90            | 0,67851                    | 0,45578                    | 0,56715                 | 7,4             | 0,68054                    | 0,48165                    | 0,58109                 | 1,41295                                                     |
| 1,05            | 0,68021                    | 0,47150                    | 0,57585                 | 4,03            | 0,67879                    | 0,45901                    | 0,56890                 | 7,6             | 0,68090                    | 0,48446                    | 0,58268                 | 1,40547                                                     |
| 1,10            | 0,68029                    | 0,47208                    | 0,57618                 | 4,10            | 0,67884                    | 0,45955                    | 0,56919                 | 7,8             | 0,68141                    | 0,48714                    | 0,58427                 | 1,39881                                                     |
| 1,20            | 0,68036                    | 0,47267                    | 0,57652                 | 4,20            | 0,67893                    | 0,46062                    | 0,56977                 | 8,0             | 0,68163                    | 0,48840                    | 0,58501                 | 1,39564                                                     |
| 1,30            | 0,68053                    | 0,47386                    | 0,57719                 | 4,30            | 0,67896                    | 0,46112                    | 0,57004                 | 8,2             | 0,68196                    | 0,49031                    | 0,58613                 | 1,39090                                                     |
| 1,40            | 0,67944                    | 0,46517                    | 0,57230                 | 4,40            | 0,67898                    | 0,46160                    | 0,57029                 | 8,4             | 0,68219                    | 0,49157                    | 0,58688                 | 1,38777                                                     |
| 1,50            | 0,68078                    | 0,47565                    | 0,57821                 | 4,50            | 0,67898                    | 0,46205                    | 0,57051                 | 8,6             | 0,68277                    | 0,49477                    | 0,58887                 | 1,37998                                                     |
| 1,60            | 0,68096                    | 0,47685                    | 0,57890                 | 4,60            | 0,67903                    | 0,46303                    | 0,57103                 | 8,8             | 0,68349                    | 0,49862                    | 0,59160                 | 1,37076                                                     |
| 1,70            | 0,68104                    | 0,47746                    | 0,57925                 | 4,70            | 0,67907                    | 0,46355                    | 0,57131                 | 9,0             | 0,68448                    | 0,50376                    | 0,59412                 | 1,35872                                                     |
| 1,80            | 0,68132                    | 0,47929                    | 0,58030                 | 4,80            | 0,67920                    | 0,46468                    | 0,57194                 | 9,2             | 0,68598                    | 0,51104                    | 0,59851                 | 1,34233                                                     |
| 1,90            | 0,68161                    | 0,48113                    | 0,58137                 | 4,90            | 0,67935                    | 0,46587                    | 0,57261                 | 9,4             | 0,68743                    | 0,51771                    | 0,60257                 | 1,32782                                                     |
| 2,00            | 0,68213                    | 0,48425                    | 0,58319                 | 5,00            | 0,67959                    | 0,46766                    | 0,57362                 | 9,6             | 0,68926                    | 0,52541                    | 0,60733                 | 1,31187                                                     |
| 2,20            | 0,68340                    | 0,49132                    | 0,58736                 | 5,10            | 0,67991                    | 0,47003                    | 0,57497                 | 9,8             | 0,69128                    | 0,53372                    | 0,61250                 | 1,29522                                                     |
| 2,40            | 0,68577                    | 0,50283                    | 0,59430                 | 5,20            | 0,68031                    | 0,47299                    | 0,57665                 | 10,0            | 0,69401                    | 0,54315                    | 0,61858                 | 1,27776                                                     |
| 2,50            | 0,68759                    | 0,51067                    | 0,59913                 | 5,30            | 0,68090                    | 0,47717                    | 0,57904                 | 10,2            | 0,69619                    | 0,55073                    | 0,62346                 | 1,26411                                                     |

|      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |
|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|
| 2,60 | 0,69005 | 0,52035 | 0,60520 | 1,32611 | 5,40 | 0,68145 | 0,48082 | 0,58114 | 1,41726 | 10,4 | 0,69782 | 0,55811 | 0,62796 | 1,25032 |
| 2,70 | 0,69859 | 0,54935 | 0,62397 | 1,27167 | 5,50 | 0,68211 | 0,48506 | 0,58358 | 1,40623 | 10,6 | 0,69829 | 0,56470 | 0,63149 | 1,23656 |
| 2,74 | 0,70773 | 0,57546 | 0,64160 | 1,22985 | 5,60 | 0,68270 | 0,48916 | 0,58593 | 1,39566 | 10,8 | 0,69636 | 0,56786 | 0,63211 | 1,22628 |
| 2,77 | 0,69982 | 0,55526 | 0,62754 | 1,26034 | 5,70 | 0,68353 | 0,49534 | 0,58943 | 1,37922 | 10,9 | 0,69605 | 0,57094 | 0,63349 | 1,21914 |
| 2,80 | 0,68486 | 0,50529 | 0,59507 | 1,35538 | 5,80 | 0,68505 | 0,50689 | 0,59597 | 1,35150 | 11,0 | 0,68924 | 0,56294 | 0,62669 | 1,22436 |
| 2,85 | 0,67809 | 0,46777 | 0,57293 | 1,44963 | 5,85 | 0,68668 | 0,51843 | 0,60256 | 1,32455 | 11,1 | 0,68074 | 0,55188 | 0,61631 | 1,23351 |
| 2,90 | 0,67607 | 0,44444 | 0,56026 | 1,52118 | 5,90 | 0,68084 | 0,49792 | 0,58938 | 1,36735 | 11,2 | 0,66952 | 0,53729 | 0,60340 | 1,24612 |
| 2,95 | 0,67583 | 0,42818 | 0,55201 | 1,57836 | 6,00 | 0,67152 | 0,46374 | 0,56763 | 1,44806 | 11,3 | 0,65832 | 0,52272 | 0,59052 | 1,25942 |
| 3,00 | 0,67694 | 0,40917 | 0,54306 | 1,65443 | 6,04 | 0,66898 | 0,45510 | 0,56204 | 1,46996 | 11,4 | 0,64998 | 0,51235 | 0,58117 | 1,26863 |
| 3,02 | 0,67721 | 0,40639 | 0,54180 | 1,66643 | 6,10 | 0,67112 | 0,45072 | 0,56092 | 1,48899 | 11,5 | 0,64442 | 0,50460 | 0,57451 | 1,27711 |
| 3,07 | 0,68144 | 0,38048 | 0,53096 | 1,79101 | 6,20 | 0,67391 | 0,44408 | 0,55900 | 1,51754 | 11,6 | 0,64328 | 0,49913 | 0,57120 | 1,28881 |
| 3,10 | 0,68087 | 0,38317 | 0,53202 | 1,77697 | 6,30 | 0,67546 | 0,45000 | 0,56273 | 1,50102 | 11,7 | 0,64286 | 0,49237 | 0,56782 | 1,30564 |
| 3,16 | 0,68006 | 0,38776 | 0,53392 | 1,75375 | 6,40 | 0,67676 | 0,45624 | 0,56650 | 1,48334 | 11,8 | 0,64293 | 0,48550 | 0,56422 | 1,32427 |
| 3,20 | 0,67962 | 0,39125 | 0,53544 | 1,73704 | 6,50 | 0,67778 | 0,46186 | 0,56982 | 1,46749 | 12,0 | 0,64349 | 0,47608 | 0,55978 | 1,35164 |
| 3,30 | 0,67889 | 0,40144 | 0,54017 | 1,69113 | 6,60 | 0,67843 | 0,46536 | 0,57189 | 1,45786 | 12,5 | 0,63822 | 0,43931 | 0,53876 | 1,45276 |
| 3,40 | 0,67824 | 0,41067 | 0,54445 | 1,65156 | 6,70 | 0,67881 | 0,46831 | 0,57356 | 1,44949 | 13,0 | 0,63409 | 0,40454 | 0,51932 | 1,56744 |
| 3,50 | 0,67769 | 0,42186 | 0,54977 | 1,60641 | 6,80 | 0,67896 | 0,46947 | 0,57421 | 1,44621 | 13,5 | 0,63292 | 0,38750 | 0,51021 | 1,63335 |
| 3,60 | 0,67753 | 0,43138 | 0,55446 | 1,57059 | 6,90 | 0,67901 | 0,47001 | 0,57451 | 1,44467 | 14,0 | 0,62831 | 0,37057 | 0,49944 | 1,69555 |
| 3,70 | 0,67769 | 0,44142 | 0,55955 | 1,53525 | 7,00 | 0,67911 | 0,47109 | 0,57510 | 1,44158 | 14,5 | 0,62188 | 0,35340 | 0,48764 | 1,75972 |
| 3,80 | 0,67813 | 0,45051 | 0,56432 | 1,50525 | 7,20 | 0,67968 | 0,47568 | 0,57768 | 1,42887 | 15,0 | 0,61824 | 0,34358 | 0,48091 | 1,79940 |

$\varphi = 84^\circ$ 

| $\lambda$<br>МК | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\lambda$<br>МК | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\lambda$<br>МК | Коэффициент излучения      |                            |                           | $\frac{ \varepsilon_{p\lambda} }{ \varepsilon_{s\lambda} }$ |
|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_{\lambda} $ |                                                             |
| 1,0             | 0,57293                    | 0,38060                    | 0,47677                   | 3,90            | 0,57119                    | 0,36727                    | 0,46923                   | 7,40            | 0,57345                    | 0,39010                    | 0,48178                   | 1,47000                                                     |
| 1,05            | 0,57302                    | 0,38112                    | 0,47707                   | 4,03            | 0,57149                    | 0,37011                    | 0,47080                   | 7,60            | 0,57383                    | 0,39261                    | 0,48322                   | 1,46159                                                     |
| 1,10            | 0,57310                    | 0,38164                    | 0,47737                   | 4,10            | 0,57154                    | 0,37058                    | 0,47106                   | 7,80            | 0,57436                    | 0,39499                    | 0,48467                   | 1,45413                                                     |
| 1,20            | 0,57318                    | 0,38216                    | 0,47767                   | 4,20            | 0,57164                    | 0,37152                    | 0,47158                   | 8,00            | 0,57459                    | 0,39611                    | 0,48535                   | 1,45058                                                     |
| 1,30            | 0,57335                    | 0,38320                    | 0,47828                   | 4,30            | 0,57168                    | 0,37196                    | 0,47182                   | 8,20            | 0,57494                    | 0,39781                    | 0,48638                   | 1,44526                                                     |
| 1,40            | 0,57219                    | 0,37553                    | 0,47386                   | 4,40            | 0,57170                    | 0,37239                    | 0,47204                   | 8,40            | 0,57518                    | 0,39894                    | 0,48706                   | 1,44175                                                     |
| 1,50            | 0,57362                    | 0,38479                    | 0,47921                   | 4,50            | 0,57171                    | 0,37278                    | 0,47224                   | 8,60            | 0,57579                    | 0,40180                    | 0,48880                   | 1,43301                                                     |
| 1,60            | 0,57381                    | 0,38586                    | 0,47983                   | 4,60            | 0,57177                    | 0,37364                    | 0,47270                   | 8,80            | 0,57654                    | 0,40525                    | 0,49089                   | 1,42267                                                     |
| 1,70            | 0,57390                    | 0,38640                    | 0,48015                   | 4,70            | 0,57181                    | 0,37410                    | 0,47296                   | 9,00            | 0,57757                    | 0,40986                    | 0,49372                   | 1,40917                                                     |
| 1,80            | 0,57420                    | 0,38802                    | 0,48111                   | 4,80            | 0,57195                    | 0,37510                    | 0,47352                   | 9,20            | 0,57914                    | 0,41641                    | 0,49776                   | 1,39078                                                     |
| 1,90            | 0,57450                    | 0,38966                    | 0,48208                   | 4,90            | 0,57211                    | 0,37614                    | 0,47413                   | 9,40            | 0,58064                    | 0,42244                    | 0,50154                   | 1,37449                                                     |
| 2,00            | 0,57504                    | 0,39243                    | 0,48374                   | 5,00            | 0,57236                    | 0,37772                    | 0,47504                   | 9,60            | 0,58255                    | 0,42942                    | 0,50598                   | 1,35660                                                     |
| 2,20            | 0,57638                    | 0,39874                    | 0,48756                   | 5,10            | 0,57270                    | 0,37982                    | 0,47626                   | 9,80            | 0,58464                    | 0,43698                    | 0,51081                   | 1,33790                                                     |
| 2,40            | 0,57885                    | 0,40904                    | 0,49394                   | 5,20            | 0,57313                    | 0,38244                    | 0,47778                   | 10,0            | 0,58747                    | 0,44561                    | 0,51654                   | 1,31833                                                     |
| 2,50            | 0,58074                    | 0,41611                    | 0,49842                   | 5,30            | 0,57376                    | 0,38614                    | 0,47995                   | 10,2            | 0,58972                    | 0,45259                    | 0,52115                   | 1,30301                                                     |

|      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |
|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|
| 2,60 | 0,58329 | 0,42487 | 0,50408 | 1,37288 | 5,40 | 0,57434 | 0,38938 | 0,48186 | 1,47501 | 10,4 | 0,59142 | 0,45938 | 0,52540 | 1,28744 |
| 2,70 | 0,59216 | 0,45138 | 0,52177 | 1,31188 | 5,50 | 0,57503 | 0,39315 | 0,48409 | 1,46263 | 10,6 | 0,59193 | 0,46544 | 0,52869 | 1,27178 |
| 2,74 | 0,60167 | 0,47563 | 0,53865 | 1,26499 | 5,60 | 0,57566 | 0,39680 | 0,48623 | 1,45075 | 10,8 | 0,58996 | 0,46828 | 0,52912 | 1,25986 |
| 2,77 | 0,59345 | 0,45682 | 0,52513 | 1,29908 | 5,70 | 0,57654 | 0,40232 | 0,48943 | 1,43305 | 10,9 | 0,58965 | 0,47109 | 0,53037 | 1,25167 |
| 2,80 | 0,57796 | 0,41124 | 0,49460 | 1,40542 | 5,80 | 0,57817 | 0,41267 | 0,49542 | 1,40105 | 11,0 | 0,58269 | 0,46354 | 0,52312 | 1,25703 |
| 2,85 | 0,57089 | 0,47780 | 0,47435 | 1,51107 | 5,85 | 0,57990 | 0,42307 | 0,50149 | 1,37069 | 11,1 | 0,57407 | 0,45321 | 0,51364 | 1,26668 |
| 2,90 | 0,56867 | 0,35733 | 0,46300 | 1,59144 | 5,90 | 0,57390 | 0,40459 | 0,48924 | 1,41846 | 11,2 | 0,56278 | 0,43969 | 0,50124 | 1,27996 |
| 2,95 | 0,56827 | 0,34320 | 0,45574 | 1,65582 | 6,00 | 0,56439 | 0,37420 | 0,46929 | 1,50828 | 11,3 | 0,55164 | 0,42632 | 0,48898 | 1,29396 |
| 3,00 | 0,56918 | 0,32680 | 0,44799 | 1,74169 | 6,04 | 0,56182 | 0,36659 | 0,46420 | 1,53255 | 11,4 | 0,54341 | 0,41687 | 0,48014 | 1,30354 |
| 3,02 | 0,56942 | 0,32441 | 0,44692 | 1,75526 | 6,10 | 0,56388 | 0,36278 | 0,46333 | 1,55432 | 11,5 | 0,53796 | 0,40896 | 0,47391 | 1,31254 |
| 3,07 | 0,57333 | 0,30231 | 0,43782 | 1,89648 | 6,20 | 0,56655 | 0,35700 | 0,46178 | 1,58696 | 11,6 | 0,53685 | 0,40500 | 0,47093 | 1,32556 |
| 3,10 | 0,57279 | 0,30459 | 0,43869 | 1,88053 | 6,30 | 0,56813 | 0,36218 | 0,46516 | 1,56861 | 11,7 | 0,53646 | 0,39903 | 0,46774 | 1,34441 |
| 3,16 | 0,57204 | 0,30851 | 0,44027 | 1,85419 | 6,40 | 0,56946 | 0,36766 | 0,46856 | 1,54889 | 11,8 | 0,53653 | 0,39297 | 0,46475 | 1,36531 |
| 3,20 | 0,57164 | 0,31147 | 0,44156 | 1,83528 | 6,50 | 0,57053 | 0,37261 | 0,47157 | 1,53118 | 12,0 | 0,53706 | 0,38470 | 0,46088 | 1,39606 |
| 3,30 | 0,57102 | 0,32018 | 0,44560 | 1,78343 | 6,60 | 0,57120 | 0,37569 | 0,47344 | 1,52041 | 12,5 | 0,53184 | 0,35255 | 0,44219 | 1,50857 |
| 3,40 | 0,57047 | 0,32809 | 0,44928 | 1,73873 | 6,70 | 0,57160 | 0,37829 | 0,47495 | 1,51102 | 13,0 | 0,52774 | 0,32258 | 0,42516 | 1,63598 |
| 3,50 | 0,57003 | 0,33774 | 0,45389 | 1,68777 | 6,80 | 0,57176 | 0,37932 | 0,47554 | 1,50734 | 13,5 | 0,52656 | 0,30806 | 0,41731 | 1,70928 |
| 3,60 | 0,56997 | 0,34598 | 0,45798 | 1,64739 | 6,90 | 0,57181 | 0,37979 | 0,47580 | 1,50560 | 14,0 | 0,52212 | 0,29371 | 0,40791 | 1,77770 |
| 3,70 | 0,57023 | 0,35471 | 0,46247 | 1,60759 | 7,00 | 0,57193 | 0,38074 | 0,47634 | 1,50214 | 14,5 | 0,51599 | 0,27925 | 0,39762 | 1,84778 |
| 3,80 | 0,57075 | 0,36265 | 0,46670 | 1,57384 | 7,20 | 0,57254 | 0,38481 | 0,47867 | 1,48786 | 15,0 | 0,51255 | 0,27103 | 0,39179 | 1,89112 |

$\varphi = 86^\circ$ 

| $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения   |                         |                        | $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения   |                         |                        | $\lambda$<br>мк | Коэффициент излучения   |                         |                        | $\frac{ \epsilon_{p\lambda} }{ \epsilon_{s\lambda} }$ | $\frac{ \epsilon_{p\lambda} }{ \epsilon_{s\lambda} }$ |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
|                 | $ \epsilon_{p\lambda} $ | $ \epsilon_{s\lambda} $ | $ \epsilon_{\lambda} $ |                 | $ \epsilon_{p\lambda} $ | $ \epsilon_{s\lambda} $ | $ \epsilon_{\lambda} $ |                 | $ \epsilon_{p\lambda} $ | $ \epsilon_{s\lambda} $ | $ \epsilon_{\lambda} $ |                                                       |                                                       |
| 1,00            | 0,43182                 | 0,27391                 | 0,35287                | 3,90            | 0,43019                 | 0,26348                 | 0,34684                | 7,40            | 0,43234                 | 0,28138                 | 0,35686                | 1,53649                                               | 1,53649                                               |
| 1,05            | 0,43190                 | 0,27431                 | 0,35311                | 4,03            | 0,43048                 | 0,26569                 | 0,34809                | 7,60            | 0,43269                 | 0,28336                 | 0,35803                | 1,52700                                               | 1,52700                                               |
| 1,10            | 0,43197                 | 0,27472                 | 0,35335                | 4,10            | 0,43053                 | 0,26606                 | 0,34829                | 7,80            | 0,43318                 | 0,28524                 | 0,35921                | 1,51862                                               | 1,51862                                               |
| 1,20            | 0,43205                 | 0,27513                 | 0,35359                | 4,20            | 0,43062                 | 0,26679                 | 0,34871                | 8,00            | 0,43339                 | 0,28613                 | 0,35976                | 1,51462                                               | 1,51462                                               |
| 1,30            | 0,43221                 | 0,27596                 | 0,35408                | 4,30            | 0,43066                 | 0,26714                 | 0,34890                | 8,20            | 0,43371                 | 0,28748                 | 0,36060                | 1,50864                                               | 1,50864                                               |
| 1,40            | 0,43113                 | 0,26993                 | 0,35053                | 4,40            | 0,43068                 | 0,26747                 | 0,34908                | 8,40            | 0,43392                 | 0,28838                 | 0,36115                | 1,50469                                               | 1,50469                                               |
| 1,50            | 0,43246                 | 0,27720                 | 0,35483                | 4,50            | 0,43069                 | 0,26778                 | 0,34923                | 8,60            | 0,43448                 | 0,29065                 | 0,36257                | 1,49486                                               | 1,49486                                               |
| 1,60            | 0,43263                 | 0,27804                 | 0,35534                | 4,60            | 0,43075                 | 0,26845                 | 0,34960                | 8,80            | 0,43517                 | 0,29339                 | 0,36428                | 1,48323                                               | 1,48323                                               |
| 1,70            | 0,43272                 | 0,27847                 | 0,35559                | 4,70            | 0,43079                 | 0,26881                 | 0,34980                | 9,00            | 0,43611                 | 0,29707                 | 0,36659                | 1,46803                                               | 1,46803                                               |
| 1,80            | 0,43299                 | 0,27975                 | 0,35637                | 4,80            | 0,43092                 | 0,26959                 | 0,35026                | 9,20            | 0,43754                 | 0,30231                 | 0,36993                | 1,44734                                               | 1,44734                                               |
| 1,90            | 0,43327                 | 0,28104                 | 0,35715                | 4,90            | 0,43107                 | 0,27041                 | 0,35074                | 9,40            | 0,43891                 | 0,30715                 | 0,37303                | 1,42900                                               | 1,42900                                               |
| 2,00            | 0,43376                 | 0,28323                 | 0,35850                | 5,00            | 0,43130                 | 0,27165                 | 0,35148                | 9,60            | 0,44065                 | 0,31277                 | 0,37671                | 1,40887                                               | 1,40887                                               |
| 2,20            | 0,43498                 | 0,28823                 | 0,36161                | 5,10            | 0,43161                 | 0,27329                 | 0,35245                | 9,80            | 0,44256                 | 0,31889                 | 0,38073                | 1,38782                                               | 1,38782                                               |
| 2,40            | 0,43724                 | 0,29643                 | 0,36683                | 5,20            | 0,43201                 | 0,27535                 | 0,35368                | 10,0            | 0,44514                 | 0,32591                 | 0,38552                | 1,36583                                               | 1,36583                                               |
| 2,50            | 0,43896                 | 0,30208                 | 0,37052                | 5,30            | 0,43258                 | 0,27827                 | 0,35543                | 10,2            | 0,44720                 | 0,33161                 | 0,38940                | 1,34858                                               | 1,34858                                               |

|      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |
|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|
| 2,60 | 0,44129 | 0,30912 | 0,37520 | 1,42756 | 5,40 | 0,43312 | 0,28082 | 0,35697 | 1,54234 | 10,4 | 0,44876 | 0,33717 | 0,39296 | 1,33096 |
| 2,70 | 0,44939 | 0,33066 | 0,39002 | 1,35906 | 5,50 | 0,43376 | 0,28380 | 0,35878 | 1,52840 | 10,6 | 0,44923 | 0,34213 | 0,39568 | 1,31304 |
| 2,74 | 0,45812 | 0,35068 | 0,40440 | 1,30638 | 5,60 | 0,43434 | 0,28669 | 0,36052 | 1,51501 | 10,8 | 0,44745 | 0,34442 | 0,39593 | 1,29916 |
| 2,77 | 0,45058 | 0,33511 | 0,39284 | 1,34456 | 5,70 | 0,43515 | 0,29107 | 0,36311 | 1,49503 | 10,9 | 0,44717 | 0,34671 | 0,39694 | 1,28974 |
| 2,80 | 0,43647 | 0,29817 | 0,36732 | 1,46383 | 5,80 | 0,43666 | 0,29931 | 0,36799 | 1,45888 | 11,0 | 0,44067 | 0,34041 | 0,39064 | 1,29513 |
| 2,85 | 0,43001 | 0,27170 | 0,35086 | 1,58262 | 5,85 | 0,43826 | 0,30764 | 0,37296 | 1,42456 | 11,1 | 0,43314 | 0,33185 | 0,38249 | 1,30522 |
| 2,90 | 0,42792 | 0,25574 | 0,34183 | 1,67324 | 5,90 | 0,43283 | 0,29285 | 0,36284 | 1,47800 | 11,2 | 0,43310 | 0,32075 | 0,37193 | 1,31909 |
| 2,95 | 0,42748 | 0,24483 | 0,33615 | 1,74604 | 6,00 | 0,42429 | 0,26885 | 0,34657 | 1,57821 | 11,3 | 0,41329 | 0,30988 | 0,36159 | 1,33370 |
| 3,00 | 0,42815 | 0,23226 | 0,33021 | 1,84342 | 6,04 | 0,42201 | 0,26290 | 0,34245 | 1,60518 | 11,4 | 0,40611 | 0,30225 | 0,35418 | 1,34359 |
| 3,02 | 0,42835 | 0,23044 | 0,32939 | 1,85883 | 6,10 | 0,42378 | 0,25995 | 0,34186 | 1,63022 | 11,5 | 0,40137 | 0,29663 | 0,34900 | 1,35311 |
| 3,07 | 0,43160 | 0,21369 | 0,32265 | 2,01975 | 6,20 | 0,42607 | 0,25548 | 0,34078 | 1,66772 | 11,6 | 0,40042 | 0,29279 | 0,34661 | 1,36764 |
| 3,10 | 0,43115 | 0,21541 | 0,32328 | 2,00154 | 6,30 | 0,42748 | 0,25951 | 0,34349 | 1,64728 | 11,7 | 0,40009 | 0,28808 | 0,34409 | 1,38880 |
| 3,16 | 0,43052 | 0,21837 | 0,32445 | 1,97150 | 6,40 | 0,42868 | 0,26377 | 0,34623 | 1,62521 | 11,8 | 0,40016 | 0,28333 | 0,34174 | 1,41233 |
| 3,20 | 0,43019 | 0,22061 | 0,32540 | 1,94999 | 6,50 | 0,42965 | 0,26764 | 0,34865 | 1,60535 | 12,0 | 0,40061 | 0,27686 | 0,33873 | 1,44700 |
| 3,30 | 0,42971 | 0,22722 | 0,32847 | 1,89113 | 6,60 | 0,43026 | 0,27005 | 0,35016 | 1,59327 | 12,5 | 0,39606 | 0,25186 | 0,32396 | 1,57253 |
| 3,40 | 0,42928 | 0,23325 | 0,33127 | 1,84041 | 6,70 | 0,43064 | 0,27209 | 0,35136 | 1,58270 | 13,0 | 0,39248 | 0,22891 | 0,31070 | 1,71452 |
| 3,50 | 0,42897 | 0,24064 | 0,33480 | 1,78262 | 6,80 | 0,43078 | 0,27290 | 0,35184 | 1,57856 | 13,5 | 0,39143 | 0,21791 | 0,30467 | 1,79630 |
| 3,60 | 0,42897 | 0,24698 | 0,33798 | 1,73689 | 6,90 | 0,43083 | 0,27327 | 0,35205 | 1,57660 | 14,0 | 0,38764 | 0,20710 | 0,29737 | 1,87173 |
| 3,70 | 0,42926 | 0,25372 | 0,34149 | 1,69188 | 7,00 | 0,43094 | 0,27402 | 0,35248 | 1,57269 | 14,5 | 0,38245 | 0,19629 | 0,28937 | 1,94840 |
| 3,80 | 0,42978 | 0,25988 | 0,34483 | 1,65375 | 7,20 | 0,43151 | 0,27721 | 0,35436 | 1,55660 | 15,0 | 0,37955 | 0,19018 | 0,28487 | 1,99580 |

$\varphi = 88^\circ$ 

| $\lambda$<br>МК | Коэффициент излучения      |                            |                         | $\lambda$<br>МК | Коэффициент излучения      |                            |                         | $\lambda$<br>МК | Коэффициент излучения      |                            |                         | $\frac{ \varepsilon_{p\lambda} }{ \varepsilon_{s\lambda} }$ | $\frac{ \varepsilon_{p\lambda} }{ \varepsilon_{s\lambda} }$ |
|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_\lambda $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_\lambda $ |                 | $ \varepsilon_{p\lambda} $ | $ \varepsilon_{s\lambda} $ | $ \varepsilon_\lambda $ |                                                             |                                                             |
| 1,0             | 0,24580                    | 0,14808                    | 0,19694                 | 3,90            | 0,24468                    | 0,14196                    | 0,19332                 | 7,40            | 0,24617                    | 0,15248                    | 0,19933                 | 1,72359                                                     | 1,61438                                                     |
| 1,05            | 0,24585                    | 0,14832                    | 0,19708                 | 4,03            | 0,24488                    | 0,14326                    | 0,19407                 | 7,60            | 0,24641                    | 0,15365                    | 0,20003                 | 1,70939                                                     | 1,60364                                                     |
| 1,10            | 0,24590                    | 0,14856                    | 0,19723                 | 4,10            | 0,24492                    | 0,14347                    | 0,19419                 | 7,80            | 0,24673                    | 0,15477                    | 0,20075                 | 1,70706                                                     | 1,59418                                                     |
| 1,20            | 0,24595                    | 0,14880                    | 0,19738                 | 4,20            | 0,24498                    | 0,14390                    | 0,19444                 | 8,00            | 0,24687                    | 0,15530                    | 0,20109                 | 1,70242                                                     | 1,58967                                                     |
| 1,30            | 0,24606                    | 0,14928                    | 0,19767                 | 4,30            | 0,24500                    | 0,14410                    | 0,19455                 | 8,20            | 0,24709                    | 0,15610                    | 0,20160                 | 1,70019                                                     | 1,58291                                                     |
| 1,40            | 0,24533                    | 0,14574                    | 0,19553                 | 4,40            | 0,24502                    | 0,14430                    | 0,19466                 | 8,40            | 0,24724                    | 0,15663                    | 0,20194                 | 1,69802                                                     | 1,57845                                                     |
| 1,50            | 0,24623                    | 0,15002                    | 0,19812                 | 4,50            | 0,24503                    | 0,14448                    | 0,19475                 | 8,60            | 0,24762                    | 0,15798                    | 0,20280                 | 1,69596                                                     | 1,56735                                                     |
| 1,60            | 0,24635                    | 0,15051                    | 0,19843                 | 4,60            | 0,24507                    | 0,14487                    | 0,19497                 | 8,80            | 0,24808                    | 0,15962                    | 0,20385                 | 1,69161                                                     | 1,55421                                                     |
| 1,70            | 0,24640                    | 0,15076                    | 0,19858                 | 4,70            | 0,24510                    | 0,14508                    | 0,19509                 | 9,00            | 0,24872                    | 0,16182                    | 0,20527                 | 1,68936                                                     | 1,53704                                                     |
| 1,80            | 0,24659                    | 0,15152                    | 0,19905                 | 4,80            | 0,24518                    | 0,14554                    | 0,19536                 | 9,20            | 0,24969                    | 0,16495                    | 0,20732                 | 1,68463                                                     | 1,51367                                                     |
| 1,90            | 0,24678                    | 0,15228                    | 0,19953                 | 4,90            | 0,24529                    | 0,14602                    | 0,19565                 | 9,40            | 0,25061                    | 0,16786                    | 0,20924                 | 1,67980                                                     | 1,49296                                                     |
| 2,00            | 0,24711                    | 0,15358                    | 0,20035                 | 5,00            | 0,24545                    | 0,14675                    | 0,19610                 | 9,60            | 0,25179                    | 0,17126                    | 0,21152                 | 1,67256                                                     | 1,47024                                                     |
| 2,20            | 0,24794                    | 0,15654                    | 0,20224                 | 5,10            | 0,24566                    | 0,14772                    | 0,19669                 | 9,80            | 0,25308                    | 0,17497                    | 0,21403                 | 1,66304                                                     | 1,44645                                                     |
| 2,40            | 0,24946                    | 0,16143                    | 0,20545                 | 5,20            | 0,24592                    | 0,14893                    | 0,19743                 | 10,0            | 0,25483                    | 0,17925                    | 0,21704                 | 1,65131                                                     | 1,42167                                                     |
| 2,50            | 0,25063                    | 0,16482                    | 0,20773                 | 5,30            | 0,24632                    | 0,15065                    | 0,19848                 | 10,2            | 0,25623                    | 0,18273                    | 0,21948                 | 1,63508                                                     | 1,40219                                                     |

|      |         |         |         |         |      |         |         |         |         |      |         |          |         |         |
|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|---------|------|---------|----------|---------|---------|
| 2,60 | 0,25220 | 0,16906 | 0,21063 | 1,49180 | 5,40 | 0,24668 | 0,15215 | 0,19942 | 1,62126 | 10,4 | 0,25729 | 0,18615  | 0,22172 | 1,38217 |
| 2,70 | 0,25770 | 0,18217 | 0,21993 | 1,41463 | 5,50 | 0,24711 | 0,15392 | 0,20051 | 1,60549 | 10,6 | 0,25761 | 0,18920  | 0,22341 | 1,36160 |
| 2,74 | 0,26366 | 0,19454 | 0,22910 | 1,35529 | 5,60 | 0,24751 | 0,15563 | 0,20157 | 1,59034 | 10,8 | 0,25641 | 0,19059  | 0,22350 | 1,34534 |
| 2,77 | 0,25851 | 0,18490 | 0,22171 | 1,39813 | 5,70 | 0,24806 | 0,15823 | 0,20315 | 1,56770 | 10,9 | 0,25622 | 0,19200  | 0,22411 | 1,33445 |
| 2,80 | 0,24896 | 0,16247 | 0,20572 | 1,53232 | 5,80 | 0,24909 | 0,16316 | 0,20612 | 1,52670 | 11,0 | 0,25197 | 0,18807  | 0,22002 | 1,33974 |
| 2,85 | 0,24459 | 0,14678 | 0,19569 | 1,66640 | 5,85 | 0,25018 | 0,16816 | 0,20917 | 1,48774 | 11,1 | 0,24679 | 0,18278  | 0,21479 | 1,35018 |
| 2,90 | 0,24316 | 0,13745 | 0,19031 | 1,76905 | 5,90 | 0,24653 | 0,15929 | 0,20291 | 1,54771 | 11,2 | 0,24013 | 0,17598  | 0,20805 | 1,36452 |
| 2,95 | 0,24283 | 0,13114 | 0,18698 | 1,85176 | 6,00 | 0,24083 | 0,14509 | 0,19296 | 1,65986 | 11,3 | 0,23367 | 0,16937  | 0,20152 | 1,37966 |
| 3,00 | 0,24323 | 0,12392 | 0,18358 | 1,96280 | 6,04 | 0,23931 | 0,14161 | 0,19046 | 1,68992 | 11,4 | 0,22898 | 0,16476  | 0,19687 | 1,38975 |
| 3,02 | 0,24335 | 0,12288 | 0,18312 | 1,98041 | 6,10 | 0,24046 | 0,13989 | 0,19018 | 1,71888 | 11,5 | 0,22591 | 0,16139  | 0,19865 | 1,39976 |
| 3,07 | 0,24543 | 0,11337 | 0,17940 | 2,16491 | 6,20 | 0,24195 | 0,13730 | 0,18962 | 1,76220 | 11,6 | 0,22530 | 0,15911  | 0,19220 | 1,41603 |
| 3,10 | 0,24514 | 0,11434 | 0,17974 | 2,14398 | 6,30 | 0,24289 | 0,13964 | 0,19126 | 1,73936 | 11,7 | 0,22509 | 0,15633  | 0,19071 | 1,43987 |
| 3,16 | 0,24474 | 0,11602 | 0,18038 | 2,10951 | 6,40 | 0,24369 | 0,14213 | 0,19291 | 1,71458 | 11,8 | 0,22513 | 0,15352  | 0,18933 | 1,46646 |
| 3,20 | 0,24453 | 0,11729 | 0,18091 | 2,08488 | 6,50 | 0,24434 | 0,14439 | 0,19437 | 1,69222 | 12,0 | 0,22542 | 0,14971  | 0,18757 | 1,50568 |
| 3,30 | 0,24423 | 0,12105 | 0,18264 | 2,01770 | 6,60 | 0,24476 | 0,14581 | 0,19528 | 1,67862 | 12,5 | 0,22247 | 0,13514  | 0,17880 | 1,64622 |
| 3,40 | 0,24397 | 0,12449 | 0,18423 | 1,95980 | 6,70 | 0,24501 | 0,14701 | 0,19601 | 1,66667 | 13,0 | 0,22014 | 0,12196  | 0,17105 | 1,80500 |
| 3,50 | 0,24380 | 0,12873 | 0,18626 | 1,89391 | 6,80 | 0,24511 | 0,14748 | 0,19629 | 1,66198 | 13,5 | 0,21946 | 0,111571 | 0,16759 | 1,89659 |
| 3,60 | 0,24382 | 0,13637 | 0,18810 | 1,84185 | 6,90 | 0,24514 | 0,14770 | 0,19642 | 1,65976 | 14,0 | 0,21704 | 0,10962  | 0,16333 | 1,97998 |
| 3,70 | 0,24404 | 0,13628 | 0,19016 | 1,79069 | 7,00 | 0,24522 | 0,14814 | 0,19668 | 1,65532 | 14,5 | 0,21374 | 0,10355  | 0,15864 | 2,06400 |
| 3,80 | 0,24440 | 0,13986 | 0,19213 | 1,74741 | 7,20 | 0,24560 | 0,15002 | 0,19781 | 1,63712 | 15,0 | 0,21190 | 0,10015  | 0,15603 | 2,11594 |

Если волна отражается под этим углом, то отраженное излучение линейно поляризуется в плоскости падения. Этот вывод является приближенным. Хотя формулы Френеля очень хорошо передают результаты наблюдений, однако в действительности составляющая отраженного света в плоскости падения никогда не может быть полностью погашена.

Тем не менее есть смысл рассмотреть, какие значения принимает угол Брюстера для воды, поскольку это наимыгоднейший случай применения поляризационных фильтров (см. табл. 1 и рис. 3).

$p$ -составляющая излучения стремится к максимуму ( $\epsilon_{p\lambda} \rightarrow 1$ ) и, во всяком случае, очень близка к своему значению при нормальном

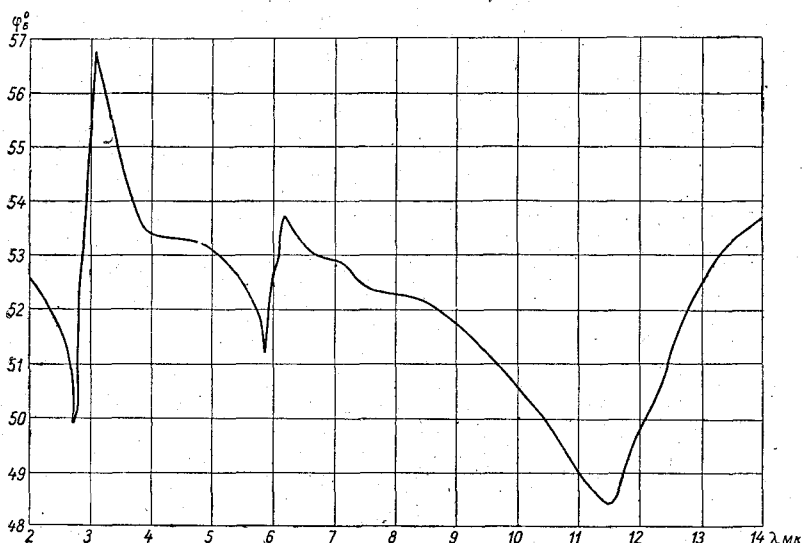


Рис. 3. Угол Брюстера для воды в инфракрасной области спектра.

визировании. В то же время,  $p$ -составляющая отражения стремится к минимуму ( $\rho_{p\lambda} \rightarrow 0$ ), что обеспечивает минимальный уровень радиационных искажений и флуктуаций.

Следовательно, при изучении собственного излучения температурных неоднородностей на водной поверхности выгоднее всего работать на  $p$ -составляющей.

Для комплексных величин  $\dot{n}_\lambda$  приближенный аналог угла Брюстера может быть определен по модулю  $|\dot{n}_\lambda|$ , хотя отступления от полной поляризации в этом случае неизбежны.

Так как индекс поглощения воды в инфракрасной области спектра  $\chi_\lambda = \frac{x_\lambda}{n_\lambda} < 0,3$ , то ошибки не очень существенны.

Приведем далее схему расчета коэффициентов отражения и излучения для комплексных  $n_\lambda$  [4].

Пусть

$$\sin \dot{\phi}_\lambda = \frac{\sin \varphi}{\dot{n}_\lambda}, \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{\phi}_\lambda &= \phi_{1\lambda} + j\phi_{2\lambda}, \\ \dot{n}_\lambda &= n_\lambda - jx_\lambda. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Чтобы найти модули комплексных выражений (3), (4) и (5), необходимо проделать значительные по объему преобразования. Поэтому без использования машинных методов расчета получение подробных характеристик весьма затруднительно.

Из формул (17) и (18) следует, что

$$\sin \dot{\psi}_{\lambda} = \sin(\psi_{1\lambda} + j\psi_{2\lambda}) = \sin \psi_{1\lambda} \operatorname{ch} \psi_{2\lambda} + j \cos \psi_{1\lambda} \operatorname{sh} \psi_{2\lambda}. \quad (19)$$

С другой стороны,

$$\frac{\sin \varphi}{n_{\lambda}} = \frac{\sin \varphi}{n_{\lambda} - j\kappa_{\lambda}} = \frac{n_{\lambda} \sin \varphi}{n_{\lambda}^2 + \kappa_{\lambda}^2} + j \frac{\kappa_{\lambda} \sin \varphi}{n_{\lambda}^2 + \kappa_{\lambda}^2}. \quad (20)$$

Приравняв действительные и мнимые части, получим

$$\sin \psi_{1\lambda} \operatorname{ch} \psi_{2\lambda} = \frac{n_{\lambda} \sin \varphi}{n_{\lambda}^2 + \kappa_{\lambda}^2} = y_{\lambda}, \quad (21)$$

$$\cos \psi_{1\lambda} \operatorname{sh} \psi_{2\lambda} = \frac{\kappa_{\lambda} \sin \varphi}{n_{\lambda}^2 + \kappa_{\lambda}^2} = z_{\lambda}, \quad (22)$$

откуда

$$\operatorname{sh} \psi_{2\lambda} = \frac{z_{\lambda}}{\cos \psi_{1\lambda}} \quad (23)$$

и

$$\operatorname{ch} \psi_{2\lambda} = \sqrt{1 + \operatorname{sh}^2 \psi_{2\lambda}} = \sqrt{1 + \frac{z_{\lambda}^2}{\cos^2 \psi_{1\lambda}}}, \quad (24)$$

$$\sin \psi_{1\lambda} = \frac{y_{\lambda}}{\operatorname{ch} \psi_{2\lambda}} = \frac{y_{\lambda}}{\sqrt{1 + \frac{z_{\lambda}^2}{\cos^2 \psi_{1\lambda}}}} = \frac{y_{\lambda}}{\sqrt{1 + \frac{z_{\lambda}^2}{1 - \sin^2 \psi_{1\lambda}}}}. \quad (25)$$

Решая уравнение (25) относительно  $\sin \psi_{1\lambda}$ , получим

$$\sin^4 \psi_{1\lambda} - (1 + y_{\lambda}^2 + z_{\lambda}^2) \sin^2 \psi_{1\lambda} + y_{\lambda}^2 = 0, \quad (26)$$

$$\sin \psi_{1\lambda} = \sqrt{\frac{1 + y_{\lambda}^2 + z_{\lambda}^2 - \sqrt{(1 + y_{\lambda}^2 + z_{\lambda}^2)^2 - 4y_{\lambda}^2}}{2}} = A_{\lambda} \quad (27)$$

(интерес представляет только положительное решение  $0 < \sin \psi_{1\lambda} < 1$ ),

$$\psi_{1\lambda} = \arcsin A_{\lambda}. \quad (28)$$

$\psi_{2\lambda}$  определяется по известному  $\psi_{1\lambda}$  и формуле (23):

$$\operatorname{sh} \psi_{2\lambda} = \frac{z_{\lambda}}{\cos \psi_{1\lambda}} = \frac{z_{\lambda}}{\sqrt{1 - A_{\lambda}^2}} = B_{\lambda}, \quad (29)$$

$$\psi_{2\lambda} = \operatorname{Ar sh} B_{\lambda} = \ln(B_{\lambda} + \sqrt{B_{\lambda}^2 + 1}). \quad (30)$$

Введем далее обозначения:

$$\varphi - \dot{\psi}_{\lambda} = \varphi - \psi_{1\lambda} - j\psi_{2\lambda} = \xi_{\lambda} - j\psi_{2\lambda}, \quad (31)$$

$$\varphi + \dot{\psi}_{\lambda} = \varphi + \psi_{1\lambda} + j\psi_{2\lambda} = \theta_{\lambda} + j\psi_{2\lambda}. \quad (32)$$

Тогда:

$$\operatorname{tg}(\xi_\lambda - j\psi_{2\lambda}) = \frac{\sin 2\xi_\lambda}{\cos 2\xi_\lambda + \operatorname{ch} 2\psi_{2\lambda}} - j \frac{\operatorname{sh} 2\psi_{2\lambda}}{\cos 2\xi_\lambda + \operatorname{ch} 2\psi_{2\lambda}} = M_{p\lambda} - jN_{p\lambda}, \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\theta_\lambda + j\psi_{2\lambda}) &= \frac{\sin 2\theta_\lambda}{\cos 2\theta_\lambda + \operatorname{ch} 2\psi_{2\lambda}} + j \frac{\operatorname{sh} 2\psi_{2\lambda}}{\cos 2\theta_\lambda + \operatorname{ch} 2\psi_{2\lambda}} = \\ &= M'_{p\lambda} + jN'_{p\lambda}, \end{aligned} \quad (34)$$

$$\sin(\xi_\lambda - j\psi_{2\lambda}) = \sin \xi_\lambda \operatorname{ch} \psi_{2\lambda} - j \cos \xi_\lambda \operatorname{sh} \psi_{2\lambda} = M_{s\lambda} - jN_{s\lambda}, \quad (35)$$

$$\sin(\theta_\lambda + j\psi_{2\lambda}) = \sin \theta_\lambda \operatorname{ch} \psi_{2\lambda} + j \cos \theta_\lambda \operatorname{sh} \psi_{2\lambda} = M'_{s\lambda} + jN'_{s\lambda}, \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \frac{\operatorname{tg}(\xi_\lambda - j\psi_{2\lambda})}{\operatorname{tg}(\theta_\lambda + j\psi_{2\lambda})} &= \frac{M_{p\lambda} - jN_{p\lambda}}{M'_{p\lambda} + jN'_{p\lambda}} = \frac{M_{p\lambda}M'_{p\lambda} - N_{p\lambda}N'_{p\lambda}}{M'^2_{p\lambda} + N'^2_{p\lambda}} - \\ &- j \frac{M'_{p\lambda}N_{p\lambda} + M_{p\lambda}N'_{p\lambda}}{M'^2_{p\lambda} + N'^2_{p\lambda}} = D_{p\lambda} - jD'_{p\lambda}, \end{aligned} \quad (37)$$

$$\rho_{p\lambda} = (D_{p\lambda} - jD'_{p\lambda})^2 = D^2_{p\lambda} - D'^2_{p\lambda} - j2D_{p\lambda}D'_{p\lambda}. \quad (38)$$

Для решения практических задач наибольший интерес представляют модули  $|\rho|$  и  $|\varepsilon|$  как характеристики энергетического взаимодействия излучения с веществом:

$$|\rho_{p\lambda}| = \rho_{p\lambda} = \left[ (D^2_{p\lambda} - D'^2_{p\lambda})^2 + 4D^2_{p\lambda}D'^2_{p\lambda} \right]^{\frac{1}{2}} = D^2_{p\lambda} + D'^2_{p\lambda}, \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \frac{\sin(\xi_\lambda - j\psi_{2\lambda})}{\sin(\theta_\lambda + j\psi_{2\lambda})} &= \frac{M_{s\lambda} - jN_{s\lambda}}{M'_{s\lambda} + jN'_{s\lambda}} = \frac{M_{s\lambda}M'_{s\lambda} - N_{s\lambda}N'_{s\lambda}}{M'^2_{s\lambda} + N'^2_{s\lambda}} - \\ &- j \frac{M'_{s\lambda}N_{s\lambda} + M_{s\lambda}N'_{s\lambda}}{M'^2_{s\lambda} + N'^2_{s\lambda}} = D_{s\lambda} - jD'_{s\lambda}, \end{aligned} \quad (40)$$

$$\rho_{s\lambda} = (D_{s\lambda} - jD'_{s\lambda})^2 = D^2_{s\lambda} - D'^2_{s\lambda} - j2D_{s\lambda}D'_{s\lambda}, \quad (41)$$

$$|\rho_{s\lambda}| = \rho_{s\lambda} = D^2_{s\lambda} + D'^2_{s\lambda}, \quad (42)$$

$$\rho_\lambda = \frac{1}{2} (\rho_{p\lambda} + \rho_{s\lambda}) = \frac{1}{2} (D^2_{p\lambda} + D'^2_{p\lambda} + D^2_{s\lambda} + D'^2_{s\lambda}). \quad (43)$$

Соответственно

$$\varepsilon_{p\lambda} = 1 - \rho_{p\lambda}, \quad (44)$$

$$\varepsilon_{s\lambda} = 1 - \rho_{s\lambda}, \quad (45)$$

$$\varepsilon_\lambda = 1 - \rho_\lambda. \quad (46)$$

Формулы (39), (42), (43), (44), (45) и (46) одновременно выражают зависимость от угла падения (угла визирования)  $\varphi$ .

По приведенной схеме был произведен на машине «Урал» расчет  $|\varepsilon_{p\lambda}|$ ,  $|\varepsilon_{s\lambda}|$ ,  $|\varepsilon_\lambda|$ ,  $|\frac{\varepsilon_{p\lambda}}{\varepsilon_{s\lambda}}|$  для фиксированных значений  $\varphi$ , равных 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 82, 84, 86, 88 в диапазоне длин волн от 1 до 15 мк с неравномерным шагом (согласно шагу табл. 1).

Результаты расчета приведены в табл. 2—13 и иллюстрируются рис. 4—8, которые для наглядности показывают ход зависимости как в линейном, так и в функциональном растянутом масштабе (вероятностный масштаб).

Анализ этих данных, так же как и анализ величин  $\rho_\lambda$ , позволит выявить целый ряд интересных особенностей излучения водной поверхности. Следует подчеркнуть, что наряду с собственным излучением важное значение в ряде случаев может иметь также зеркальное и рассеянное отражение в водной поверхности частей небосвода, небесных светил и т. п.

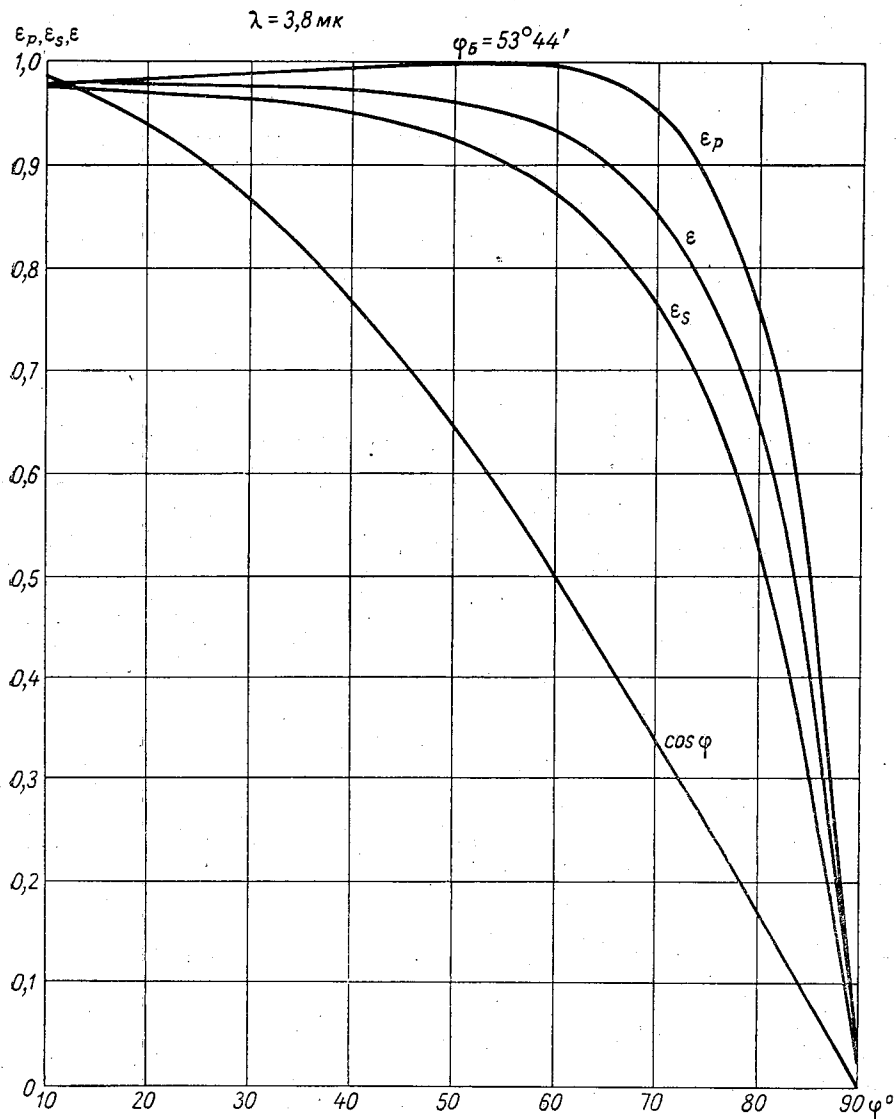


Рис. 4. Пример изменения спектрального коэффициента излучения ( $\lambda = 3,8 \text{ мк}$ ) при различных углах визирования.

Разбор этого вопроса в связи с многообразием возможных случаев представляет существенные трудности и может быть проведен поэтому только в ограниченном объеме.

Наибольшие изменения претерпевает с ростом угла визирования s-составляющая излучения.

Неполяризованное излучение довольно стабильно от 0 до  $40^\circ$ , а затем начинается быстрое уменьшение излучательной способности.

$p$ -составляющая излучения растет до угла Брюстера ( $\epsilon_p=1$ ), а затем начинается уменьшение, но более медленное, чем для неполяризованного потока или  $s$ -составляющей.

В пределах углов визирования от 0 до 60—70° изменения  $p$ -составляющей наименьшие. Кроме того, поскольку  $\epsilon_p \rightarrow 1$  при  $\varphi = \varphi_B$ , для

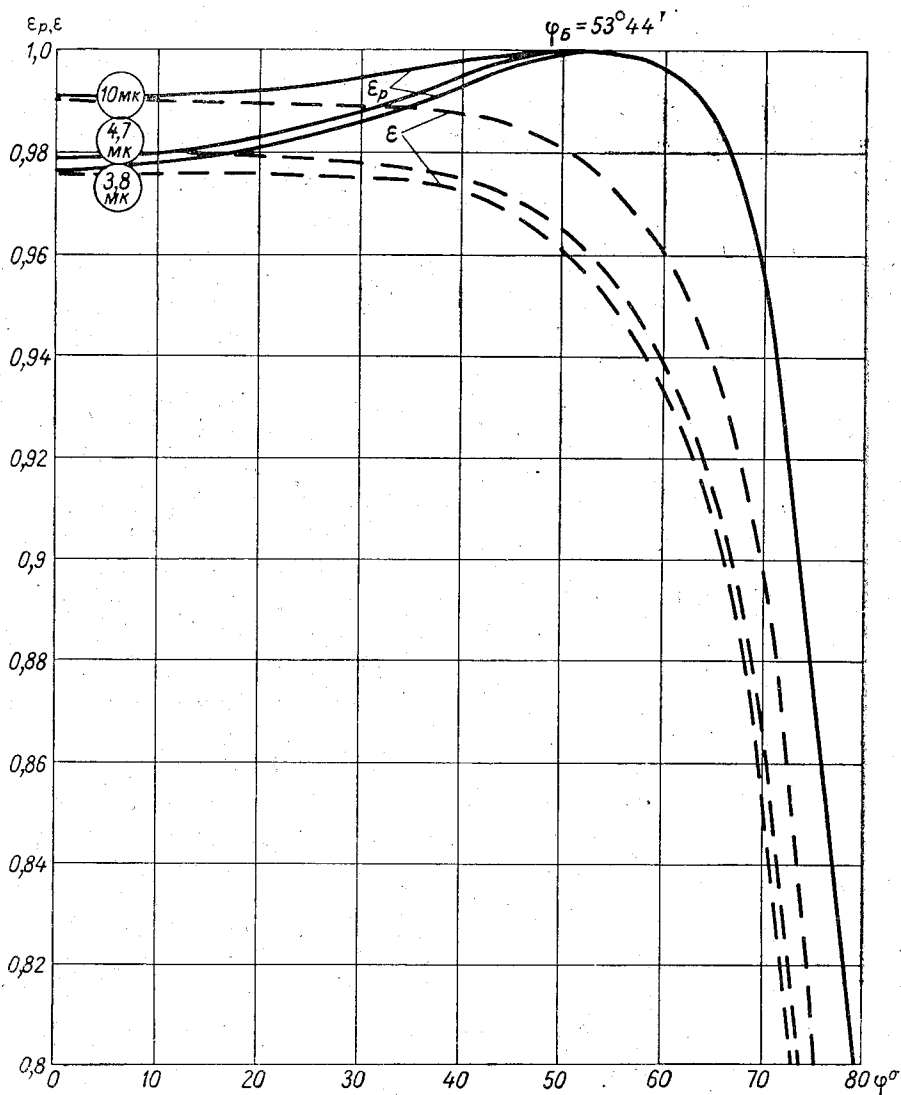


Рис. 5. Изменение коэффициента излучения и  $p$ -составляющей поляризации при различных углах визирования для  $\lambda$ , равной 3,8, 4,7 и 10 мк.

$p$ -составляющей имеет место минимальное отраженное излучение. Особенно существенно, что  $p$ -составляющая практически неизменна в районе  $\varphi_B \pm (10 \div 15)^\circ$  (рис. 4—5).

Спектральный ход кривых  $\epsilon_\lambda$ ,  $\epsilon_{p\lambda}$ ,  $\epsilon_{s\lambda}$  характеризуется экстремальными точками, в основном соответствующими аналогичным максимумам и минимумам кривых  $n_\lambda$  и  $\kappa_\lambda$  (см. рис. 1), однако экстремумы проявляются значительно слабее, особенно при углах визирования  $\varphi > 80^\circ$ .

Наиболее существенные изменения претерпевают спектральные характеристики  $p$ -составляющей вблизи углов Брюстера ( $\varphi$  от  $50^\circ$  до  $60^\circ$ ). Поскольку угол Брюстера — также селективная характеристика (см. рис. 3), то  $\varepsilon_{pl} = 1$  при различных значениях угла  $\varphi$ . В результате этого закономерности хода спектральных кривых нарушаются и появляются дополнительные максимумы и минимумы на кривых  $\varphi = 50^\circ$  и  $\varphi = 60^\circ$  (рис. 6—8).

Поскольку цель настоящей статьи — подробно изложить все исходные данные по излучательной способности воды, проведение более подробного анализа применительно к конкретным инженерным и физическим задачам выходит за рамки настоящей работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде. Гостехиздат, М.—Л., 1951.
2. JOSA, v. 45, N 6, 1955, 451—454.
3. JOSA, v. 31, N 3, 1941, 244—247.
4. Зельманович И. Л. Труды ГГО, вып. 125, 1962.

## К МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА ДЛИННОВОЛНОВЫХ ПОТОКОВ В ТРОПОСФЕРЕ ПРИ БЕЗОБЛАЧНОМ НЕБЕ

Проведено исследование корреляции длинноволновых потоков, рассчитанных по диаграмме Шехтер для разных уровней в тропосфере, с различными метеорологическими элементами. В результате получены простые формулы для нисходящего потока

$$E_{Az} = 0,76 \sigma T_z^4 w_z^{0,12}$$

и восходящего

$$E_{3z} = \sigma T_{\Pi}^4 \cdot 10^{-0,0036 \Delta t},$$

где  $w_z$  — поглощающая масса выше уровня  $z$ ,

$T_z$  — температура воздуха на уровне  $z$ ,

$T_{\Pi}$  — температура подстилающей поверхности,  $\Delta t = T_{\Pi} - T_z$ .

Произведена проверка полученных формул. Кроме того, дана средняя зависимость от высоты  $E_{Az}$  и  $E_{3z}$  для безоблачного неба в Одессе.

В последние годы в связи с анализом синоптических ситуаций над большими территориями все больше и больше внимание исследователей привлекает изучение радиационного баланса атмосферы и ее отдельных слоев. Однако, к сожалению, имеются только единичные случаи измерений радиационного баланса и его составляющих на разных уровнях в атмосфере с помощью подъемных средств в виде самолетов, аэростатов и радиозондов. Методика таких измерений еще недостаточно отработана и проведение каждой серии измерений требует большой затраты средств. Поэтому до настоящего времени для оценки радиационного баланса на разных уровнях в атмосфере используют расчетные методы.

Для расчета составляющих длинноволнового баланса рядом авторов предложены радиационные диаграммы, использующие результаты температурного зондирования. По данным Х. Нийлиск [1], наиболее надежными из этих диаграмм являются диаграммы Ф. Н. Шехтер [2] и Брукса [3]. Расчеты по радиационным диаграммам сводятся к графическому интегрированию; удобное в единичных случаях, оно становится очень трудоемкой операцией при большом количестве расчетов.

Возникает вопрос, нельзя ли для расчета составляющих длинноволнового баланса на разных уровнях в тропосфере использовать простые формулы, типа формул Брента и Онгстрема [4], связывающие длинноволновые потоки с температурой и влажностью воздуха.

Вследствие недостатка эмпирических данных мы для выяснения этого вопроса использовали результаты расчетов по диаграмме Шехтер и сопоставили их с рядом метеорологических элементов. Расчеты производились на основании данных о температуре и влажности воздуха,

полученных в результате радиозондирования в Одессе в 1955 г. для всех случаев безоблачного неба. Там, где это позволяли данные аэрологического зондирования, расчеты были произведены для высот  $z$ , равных 0,5; 1,0; 1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 7 и 8 км, при этом использовалась методика, изложенная в [5]. Излучательная способность подстилающей поверхности принята равной единице.

Рассмотрим отдельно восходящий и нисходящий потоки.

Известно, что величина нисходящего потока у подстилающей поверхности (противоизлучение атмосферы)  $E_A$  в основном определяется температурой и влажностью воздуха на этом уровне. Из сопоставления величин нисходящего потока  $E_{Az}$  на высоте  $z$  с температурой воздуха на той же высоте  $t_z$  следует, что  $E_{Az}$  линейно растет с увеличением  $t_z$  (рис. 1). Характер изменения  $E_{Az}$  при изменении температуры воздуха сохраняется на всех высотах. Коэффициент корреляции величин  $E_{Az}$  и  $t_z$   $r=0,9977 \pm 0,0007$ , а уравнение регрессии

$$E_{Az} = 0,313 + 0,0085 t_z,$$

где  $E_{Az}$  выражено в кал/см<sup>2</sup> мин., а  $t_z$  — в °С.

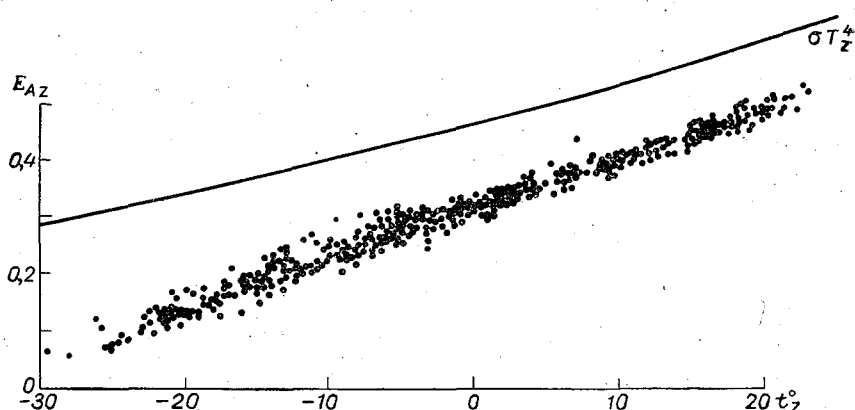


Рис. 1. Связь нисходящего потока  $E_{Az}$  на высоте  $z$  с температурой воздуха на той же высоте  $t_z$ .

При вычислении коэффициента корреляции и коэффициентов уравнения регрессии использовалась совокупность величин  $E_{Az}$  для всех  $z$ .

Высокий коэффициент корреляции  $t_z$  и  $E_{Az}$ , соответствующих разным значениям влажности, объясняется тем, что между температурой и влажностью воздуха в свою очередь существует определенная зависимость.

С другой стороны, наблюдается достаточно тесная связь  $E_{Az}$  с удельной влажностью  $q_z$ . В этом случае корреляционное отношение  $\eta=0,934$ , а уравнение, связывающее средние величины  $E_{Az}$  и  $q_z$ , может быть представлено в виде

$$E_{Az} = 0,20 q_z^{0,43},$$

где  $E_{Az}$  выражено в кал/см<sup>2</sup> мин., а  $q_z$  — в г/кг.

Несколько более высокое корреляционное отношение  $\eta=0,957$  отмечается при рассмотрении связи  $E_{Az}$  с поглощающей массой  $w_z$ , расположенной выше уровня  $z$  (рис. 2):

$$w_z = \int_z^{\infty} \sqrt{\frac{p}{p_0}} q_p dz.$$

Здесь  $q$  — удельная влажность воздуха,  $\rho$  — плотность воздуха,  $p$  — давление воздуха.

Средняя зависимость  $E_{Az}$  от  $w_z$  представляется в виде параболы:

$$E_{Az} = 0,41 w_z^{0,275}.$$

Чтобы исключить влияние температуры, мы рассмотрели отношение  $\frac{E_{Az}}{\sigma T_z^4}$ . Это отношение всегда меньше единицы, и величина его растет по

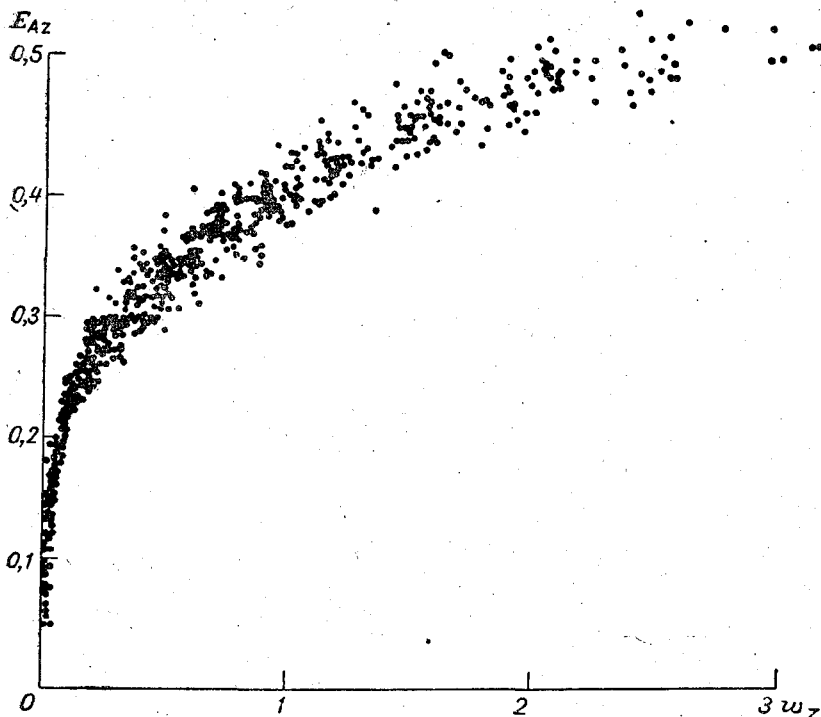


Рис. 2. Связь нисходящего потока  $E_{Az}$  на высоте  $z$  с поглощающей массой  $w_z$ , расположенной выше уровня  $z$ .

мере увеличения  $w_z$  или  $q$  (рис. 3а, 3б). Корреляционное отношение величин  $\frac{E_{Az}}{\sigma T_z^4}$  и удельной влажности  $q_z$  составляет  $\eta = 0,806$ , а с поглощающей массой  $w_z$   $\eta = 0,946$ .

В среднем

$$\frac{E_{Az}}{\sigma T_z^4} = 0,76 w_z^{0,12}. \quad (1)$$

Следует отметить, что при расчете  $\sigma T_z^4$  использовалось значение  $\sigma = 0,826 \cdot 10^{-10}$  кал/см<sup>2</sup>мин·град.<sup>4</sup>, а в основу радиационной диаграммы, по которой рассчитывалась величина  $E_{Az}$ , положено  $\sigma = 0,842 \cdot 10^{-10}$ , поэтому величина коэффициента, равная в данном случае 0,76, может измениться на 1—1,5%, если использовать другие значения  $\sigma$ .

Формула (1) позволяет представить величину нисходящего потока на уровне  $z$  в виде произведения излучения черного тела при темпера-

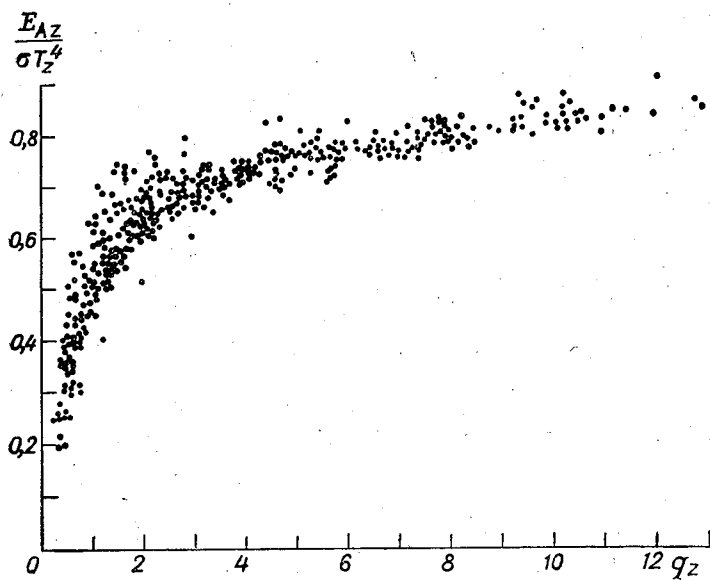


Рис. 3а. Связь отношения  $\frac{E_{Az}}{\sigma T_z^4}$  с удельной влажностью  $q_z$ .

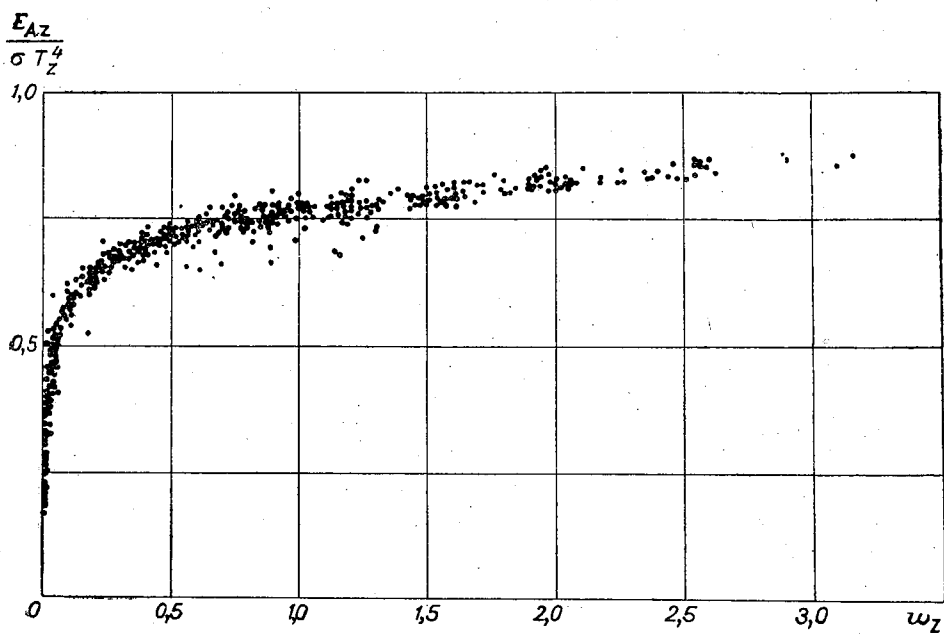


Рис. 3б. Связь отношения  $\frac{E_{Az}}{\sigma T_z^4}$  с поглощающей массой  $w_z$ .

Таблица I

 $0,76 w_z^{0,12}$ 

| $w_z$ | 0,00  | 0,01  | 0,02  | 0,03  | 0,04  | 0,05  | 0,06  | 0,07  | 0,08  | 0,09  |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,00  | 0,000 | 0,437 | 0,475 | 0,499 | 0,516 | 0,530 | 0,542 | 0,552 | 0,561 | 0,568 |
| 10    | 577   | 583   | 589   | 595   | 601   | 605   | 610   | 615   | 619   | 622   |
| 20    | 626   | 630   | 634   | 637   | 641   | 644   | 647   | 650   | 653   | 655   |
| 30    | 657   | 660   | 663   | 665   | 668   | 670   | 673   | 674   | 677   | 678   |
| 40    | 680   | 682   | 684   | 686   | 688   | 690   | 692   | 694   | 696   | 698   |
| 50    | 699   | 701   | 702   | 704   | 706   | 708   | 709   | 711   | 712   | 713   |
| 60    | 715   | 716   | 717   | 719   | 720   | 721   | 723   | 724   | 726   | 727   |
| 70    | 728   | 729   | 730   | 732   | 733   | 734   | 735   | 736   | 737   | 738   |
| 80    | 740   | 741   | 742   | 743   | 744   | 745   | 747   | 748   | 748   | 749   |
| 90    | 750   | 751   | 752   | 753   | 754   | 755   | 756   | 757   | 758   | 758   |
| 1,00  | 759   | 760   | 761   | 762   | 763   | 764   | 765   | 766   | 767   | 767   |
| 10    | 768   | 769   | 770   | 771   | 772   | 773   | 773   | 774   | 775   | 776   |
| 20    | 776   | 777   | 778   | 779   | 780   | 781   | 782   | 782   | 783   | 784   |
| 30    | 784   | 785   | 786   | 786   | 787   | 788   | 788   | 789   | 790   | 791   |
| 40    | 792   | 792   | 793   | 794   | 794   | 795   | 796   | 796   | 797   | 798   |
| 50    | 798   | 799   | 799   | 800   | 800   | 801   | 802   | 802   | 803   | 803   |
| 60    | 804   | 804   | 805   | 805   | 806   | 807   | 807   | 808   | 809   | 809   |
| 70    | 810   | 810   | 811   | 812   | 812   | 813   | 813   | 814   | 814   | 815   |
| 80    | 815   | 816   | 817   | 817   | 818   | 818   | 819   | 819   | 820   | 820   |
| 90    | 821   | 821   | 822   | 822   | 823   | 823   | 824   | 824   | 825   | 825   |
| 2,00  | 826   | 826   | 827   | 827   | 828   | 828   | 829   | 829   | 830   | 830   |
| 10    | 831   | 831   | 832   | 832   | 833   | 833   | 834   | 834   | 835   | 835   |
| 20    | 836   | 836   | 837   | 837   | 837   | 838   | 838   | 839   | 839   | 840   |
| 30    | 840   | 840   | 841   | 841   | 842   | 842   | 843   | 843   | 844   | 844   |
| 40    | 845   | 845   | 846   | 847   | 847   | 847   | 848   | 848   | 848   | 849   |
| 50    | 849   | 850   | 850   | 851   | 851   | 852   | 852   | 852   | 853   | 853   |
| 60    | 854   | 854   | 854   | 855   | 855   | 855   | 856   | 856   | 857   | 857   |
| 70    | 857   | 857   | 858   | 858   | 858   | 859   | 859   | 859   | 860   | 860   |
| 80    | 860   | 860   | 861   | 861   | 862   | 862   | 862   | 862   | 862   | 863   |
| 90    | 863   | 863   | 863   | 864   | 864   | 864   | 865   | 865   | 865   | 866   |
| 3,00  | 866   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |

туре воздуха на уровне  $z$  и параболической функции поглощающей массы  $w_z$ , т. е. в виде, удобном при производстве массовых вычислений. Значение  $w_z$  при этом вычисляется по данным аэрологического зондирования способом, изложенным в [5].

Для удобства расчетов величина  $0,76 w_z^{0,12}$  была представлена в виде табл. 1, в которой входной параметр  $w_z$  дан через  $0,01 \text{ г/см}^2$ .

Для проверки формулы (1) были сопоставлены результаты расчетов  $E_{Az}^\Phi$ , проведенных по этой формуле, и  $E_{Az}^A$ , полученных по диаграмме Шехтер. Исходными данными для расчетов послужили результаты аэрологического зондирования за отдельные дни 1957—1958 гг. при безоблачном небе в Архангельске, Минске, Киеве и Одессе, т. е. в пунктах, расположенных в различных климатических зонах. Всего было сопоставлено 170 пар значений  $E_{Az}$ , соответствующих разным высотам. Для характеристики степени совпадения этих величин была использована

величина их отношения  $K_1 = \frac{E_{Az}^\Phi}{E_{Az}^A}$ .

В 164 случаях из 170, что составляет 97% всех рассмотренных случаев, отклонение  $E_{Az}^\Phi$  от  $E_{Az}^A$  не превышает  $\pm 5\%$ , т. е. лежит в пределах точности расчетов по диаграмме. Никакой зависимости отношения  $K_1$  от высоты не отмечается. Ниже дана повторяемость величин  $K_1$ :

| $K_1$  | Число случаев | %    | $K_1$  | Число случаев | %    |
|--------|---------------|------|--------|---------------|------|
| < 0,95 | 4             | 2,4  | 1,01   | 36            | 21,2 |
| 0,95   | 1             | 0,6  | 1,02   | 34            | 20,0 |
| 0,96   | 2             | 1,2  | 1,03   | 17            | 10,0 |
| 0,97   | 5             | 2,9  | 1,04   | 7             | 4,1  |
| 0,98   | 16            | 9,4  | 1,05   | 1             | 0,6  |
| 0,99   | 22            | 12,9 | > 1,05 | 2             | 1,2  |
| 1,00   | 23            | 13,5 |        |               |      |

Таким образом, предложенная формула (1) позволяет при определении  $E_{Az}$  избежать планиметрирования, что значительно ускоряет процесс вычислений без потери в точности. В этом случае наиболее трудоемким этапом остается вычисление поглощающей массы.

Чтобы избежать и этой операции, была сделана попытка использовать связь  $\frac{E_{Az}}{\sigma T_z^4}$  непосредственно с удельной влажностью  $q_z$ , представленную в табл. 2.

Таблица 2

Средняя зависимость  $\frac{E_{Az}}{\sigma T_z^4}$  от удельной влажности  $q_z$

| $q_z$ | 0,0  | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,0   | 0,00 | 0,06 | 0,20 | 0,25 | 0,32 | 0,37 | 0,40 | 0,45 | 0,51 | 0,53 |
| 1,0   | 0,55 | 56   | 57   | 58   | 59   | 60   | 61   | 62   | 63   | 64   |
| 2,0   | 65   | 66   | 66   | 67   | 67   | 68   | 68   | 69   | 69   | 70   |
| 3,0   | 70   | 70   | 71   | 71   | 71   | 72   | 72   | 72   | 72   | 73   |
| 4,0   | 73   | 73   | 73   | 73   | 74   | 74   | 74   | 74   | 75   | 75   |
| 5,0   | 75   | 75   | 75   | 76   | 76   | 76   | 76   | 77   | 77   | 77   |
| 6,0   | 77   | 77   | 78   | 78   | 78   | 78   | 79   | 79   | 79   | 79   |
| 7,0   | 79   | 79   | 79   | 80   | 80   | 80   | 80   | 80   | 80   | 80   |
| 8,0   | 80   | 81   | 81   | 81   | 81   | 81   | 82   | 82   | 82   | 82   |
| 9,0   | 82   | 82   | 82   | 83   | 83   | 83   | 83   | 83   | 83   | 83   |
| 10,0  | 83   | 84   | 84   | 84   | 84   | 84   | 84   | 85   | 85   | 85   |
| 11,0  | 85   | 85   | 85   | 86   | 86   | 86   | 86   | 86   | 86   | 86   |
| 12,0  | 86   | 87   | 87   | 87   | 87   | 87   | 87   | 87   | 87   | 87   |

Ниже дана повторяемость  $K_2$  — отношения значений  $E_{Az}$ , рассчитанных на основании средней зависимости  $\frac{E_{Az}}{\sigma T_z^4}$  от  $q_z$ , к рассчитанным по диаграмме Шехтер:

| $K_2$ | Число случаев | %   | $K_2$ | Число случаев | %   |
|-------|---------------|-----|-------|---------------|-----|
| 0,89  | 6             | 3,5 | 1,01  | 13            | 7,6 |
| 0,90  | 1             | 0,6 | 1,02  | 15            | 8,7 |
| 0,91  | 1             | 0,6 | 1,03  | 15            | 8,7 |
| 0,92  | 2             | 1,2 | 1,04  | 10            | 5,8 |
| 0,93  | 5             | 2,9 | 1,05  | 9             | 5,2 |
| 0,94  | 2             | 1,2 | 1,06  | 6             | 3,5 |
| 0,95  | 8             | 4,6 | 1,07  | 7             | 4,1 |
| 0,96  | 8             | 4,6 | 1,08  | 3             | 1,7 |
| 0,97  | 12            | 7,0 | 1,09  | 2             | 1,2 |
| 0,98  | 11            | 6,4 | 1,10  | 3             | 1,7 |
| 0,99  | 16            | 9,3 | 1,10  | 3             | 1,7 |
| 1,00  | 14            | 8,2 |       |               |     |

Из приведенных данных следует, что при использовании зависимости  $\frac{E_{Az}}{\sigma T_z^4}$  от  $q_z$  пределы изменения отношения  $K_2$  значительно расширяются.

Отклонение в пределах  $\pm 5\%$  сохраняется только в 131 случае из 172, что составляет 76% общего числа случаев. Таким образом, использование последнего способа расчета приводит к некоторому снижению точности результатов, но зато значительно упрощает и ускоряет их получение. В ряде случаев такая точность может быть вполне приемлемой.

Остановимся теперь на анализе восходящего потока  $E_3$ . Основным фактором, определяющим величину восходящего потока, является прежде всего температура подстилающей поверхности, поэтому следует ожидать высокой корреляции между величинами  $E_{3z}$  и  $t_n$ .

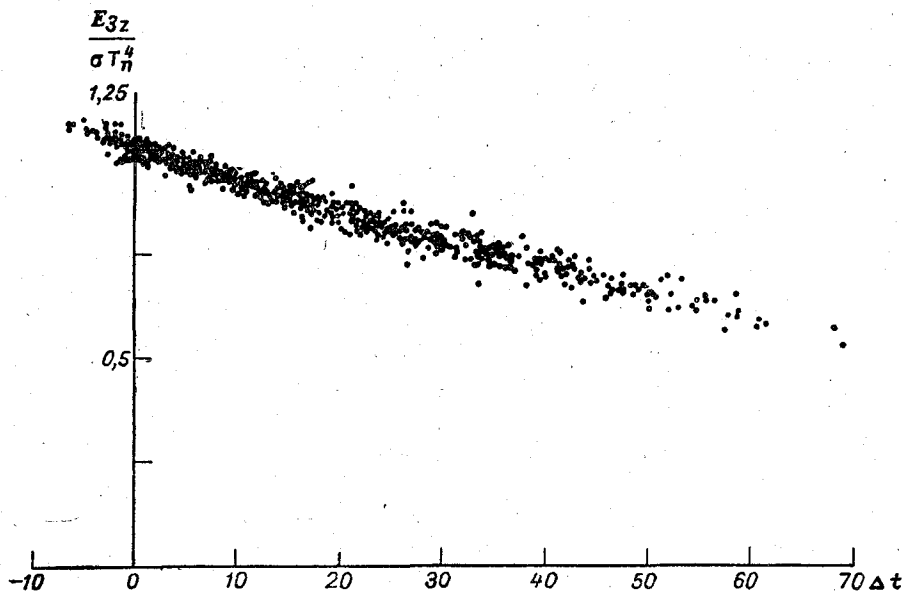


Рис. 4. Связь отношения  $\frac{E_{3z}}{\sigma T_n^4}$  с разностью температур почвы и воздуха  $\Delta t$ .

До высоты 5 км корреляционное отношение величин  $E_{3z}$  и  $t_n$  порядка 0,9, в более высоких слоях оно уменьшается, но остается не меньше 0,7.

Чтобы исключить влияние температуры подстилающей поверхности, в дальнейшем мы перешли к рассмотрению величин  $\frac{E_{3z}}{\sigma T_n^4}$ , где  $T_n = 273 + t_n$ .

Было установлено, что изменение  $\frac{E_{3z}}{\sigma T_n^4}$  с высотой связано с изменением разности температур  $\Delta t = t_n - t_z$ . Корреляционное отношение  $\frac{E_{3z}}{\sigma T_n^4}$  и  $\Delta t$  составляет 0,952.

Представленная на рис. 4 связь  $\frac{E_{3z}}{\sigma T_n^4}$  с  $\Delta t$  для средних значений может быть выражена формулой

$$\lg \frac{E_{3z}}{\sigma T_n^4} = -0,0036 \Delta t,$$

откуда

$$E_{3z} = \sigma T_n^4 \cdot 10^{-0,0036 \Delta t}. \quad (2)$$

Таблица 3

 $10^{-0,0036\Delta t}$ 

| $\Delta t$ | 0,0   | -0,1  | -0,2  | -0,3  | -0,4  | -0,5  | -0,6  | -0,7  | -0,8  | -0,9  |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| -10        | 1,086 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| -9         | 1,077 | 1,078 | 1,079 | 1,080 | 1,081 | 1,082 | 1,082 | 1,083 | 1,084 | 1,085 |
| -8         | 69    | 70    | 70    | 71    | 72    | 73    | 74    | 75    | 75    | 76    |
| -7         | 60    | 61    | 62    | 63    | 64    | 65    | 65    | 66    | 67    | 68    |
| -6         | 51    | 52    | 53    | 54    | 55    | 56    | 56    | 57    | 58    | 59    |
| -5         | 42    | 43    | 44    | 45    | 46    | 47    | 48    | 48    | 49    | 50    |
| -4         | 33    | 34    | 35    | 36    | 37    | 38    | 39    | 39    | 40    | 41    |
| -3         | 25    | 26    | 26    | 27    | 28    | 29    | 30    | 30    | 31    | 32    |
| -2         | 16    | 17    | 18    | 19    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    |
| -1         | 08    | 09    | 10    | 11    | 11    | 12    | 13    | 13    | 14    | 15    |
| 0          | 00    | 01    | 02    | 02    | 03    | 04    | 05    | 06    | 07    | 08    |

| $\Delta t$ | 0,0   | 0,1   | 0,2   | 0,3   | 0,4   | 0,5   | 0,6   | 0,7   | 0,8   | 0,9   |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0          | 1,000 | 0,999 | 0,998 | 0,997 | 0,996 | 0,995 | 0,994 | 0,993 | 0,992 | 0,991 |
| 1          | 0,991 | 90    | 89    | 88    | 88    | 87    | 86    | 85    | 85    | 84    |
| 2          | 84    | 83    | 82    | 80    | 79    | 79    | 78    | 77    | 77    | 76    |
| 3          | 75    | 74    | 73    | 73    | 72    | 71    | 70    | 70    | 69    | 68    |
| 4          | 68    | 67    | 66    | 65    | 64    | 63    | 62    | 61    | 61    | 60    |
| 5          | 59    | 58    | 57    | 57    | 56    | 55    | 54    | 54    | 53    | 52    |
| 6          | 51    | 50    | 49    | 48    | 48    | 47    | 46    | 45    | 45    | 44    |
| 7          | 44    | 43    | 42    | 41    | 40    | 40    | 39    | 38    | 37    | 36    |
| 8          | 35    | 34    | 34    | 33    | 33    | 32    | 31    | 30    | 30    | 29    |
| 9          | 29    | 28    | 27    | 27    | 26    | 25    | 24    | 23    | 22    | 21    |
| 10         | 20    | 19    | 18    | 18    | 17    | 16    | 16    | 15    | 14    | 13    |
| 11         | 12    | 12    | 11    | 10    | 10    | 09    | 08    | 07    | 07    | 06    |
| 12         | 06    | 05    | 04    | 03    | 02    | 01    | 01    | 00    | 899   | 898   |
| 13         | 897   | 896   | 896   | 895   | 894   | 894   | 893   | 892   | 892   | 891   |
| 14         | 91    | 90    | 89    | 88    | 88    | 87    | 86    | 85    | 85    | 84    |
| 15         | 83    | 82    | 81    | 81    | 80    | 79    | 78    | 78    | 77    | 76    |
| 16         | 75    | 75    | 74    | 74    | 73    | 72    | 71    | 71    | 70    | 69    |
| 17         | 69    | 68    | 67    | 66    | 65    | 64    | 63    | 63    | 62    | 62    |
| 18         | 61    | 61    | 60    | 59    | 58    | 58    | 57    | 56    | 56    | 55    |
| 19         | 55    | 54    | 53    | 52    | 51    | 50    | 50    | 49    | 48    | 48    |
| 20         | 47    | 47    | 46    | 45    | 45    | 44    | 43    | 43    | 42    | 41    |
| 21         | 40    | 40    | 39    | 38    | 38    | 37    | 37    | 36    | 35    | 34    |
| 22         | 34    | 33    | 33    | 32    | 31    | 30    | 30    | 29    | 28    | 27    |
| 23         | 27    | 26    | 26    | 25    | 24    | 24    | 23    | 22    | 22    | 21    |
| 24         | 20    | 19    | 18    | 18    | 17    | 17    | 16    | 16    | 15    | 14    |
| 25         | 13    | 13    | 12    | 11    | 10    | 09    | 09    | 08    | 08    | 07    |
| 26         | 06    | 05    | 04    | 04    | 03    | 03    | 02    | 02    | 01    | 00    |
| 27         | 799   | 798   | 798   | 797   | 797   | 796   | 795   | 795   | 794   | 793   |
| 28         | 92    | 92    | 91    | 91    | 90    | 89    | 89    | 88    | 88    | 87    |
| 29         | 87    | 86    | 86    | 85    | 84    | 84    | 83    | 83    | 82    | 81    |
| 30         | 80    | 79    | 78    | 78    | 77    | 77    | 76    | 75    | 74    | 74    |
| 31         | 73    | 72    | 72    | 71    | 71    | 70    | 69    | 68    | 68    | 67    |
| 32         | 67    | 66    | 65    | 65    | 64    | 64    | 63    | 62    | 62    | 61    |
| 33         | 60    | 59    | 58    | 58    | 57    | 57    | 56    | 56    | 55    | 55    |
| 34         | 54    | 54    | 53    | 52    | 52    | 51    | 50    | 50    | 49    | 48    |
| 35         | 48    | 47    | 46    | 45    | 44    | 43    | 42    | 42    | 42    | 41    |
| 36         | 41    | 41    | 40    | 39    | 39    | 38    | 37    | 37    | 36    | 36    |
| 37         | 36    | 35    | 34    | 33    | 33    | 32    | 32    | 32    | 31    | 31    |
| 38         | 30    | 29    | 28    | 28    | 27    | 27    | 26    | 25    | 25    | 24    |
| 39         | 24    | 23    | 22    | 22    | 21    | 20    | 20    | 19    | 19    | 18    |
| 40         | 18    | 18    | 17    | 16    | 15    | 15    | 14    | 13    | 13    | 12    |
| 41         | 11    | 11    | 10    | 10    | 09    | 08    | 08    | 07    | 07    | 06    |

| $\Delta t$ | 0,0   | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
|------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 42         | 06    | 05  | 05  | 04  | 04  | 03  | 03  | 02  | 02  | 01  |
| 43         | 700   | 700 | 699 | 698 | 698 | 697 | 697 | 696 | 696 | 695 |
| 44         | 695   | 694 | 693 | 692 | 692 | 692 | 691 | 691 | 690 | 690 |
| 45         | 89    | 88  | 88  | 87  | 86  | 85  | 85  | 84  | 83  | 83  |
| 46         | 82    | 82  | 82  | 81  | 80  | 80  | 79  | 79  | 78  | 78  |
| 47         | 77    | 77  | 76  | 76  | 75  | 74  | 73  | 73  | 72  | 72  |
| 48         | 71    | 71  | 70  | 70  | 69  | 69  | 68  | 68  | 68  | 67  |
| 49         | 67    | 66  | 66  | 65  | 65  | 64  | 64  | 63  | 62  | 62  |
| 50         | 61    | 61  | 60  | 60  | 59  | 58  | 58  | 57  | 57  | 56  |
| 51         | 55    | 55  | 54  | 54  | 53  | 53  | 52  | 52  | 51  | 51  |
| 52         | 50    | 50  | 49  | 49  | 48  | 48  | 47  | 47  | 46  | 46  |
| 53         | 45    | 45  | 44  | 44  | 43  | 43  | 42  | 42  | 41  | 41  |
| 54         | 40    | 40  | 39  | 39  | 38  | 38  | 37  | 36  | 36  | 35  |
| 55         | 34    | 34  | 33  | 32  | 31  | 31  | 30  | 30  | 29  | 29  |
| 56         | 28    | 28  | 27  | 27  | 26  | 26  | 25  | 25  | 24  | 24  |
| 57         | 23    | 23  | 22  | 22  | 21  | 21  | 20  | 20  | 19  | 19  |
| 58         | 0,618 | *   |     |     |     |     |     |     |     |     |

Таким образом, вычисление восходящего потока также сводится к умножению двух величин, из которых одна является излучением черного тела при температуре подстилающей поверхности, а другая — функцией разности температуры подстилающей поверхности и температуры воздуха на рассматриваемом уровне. Последняя для удобства расчетов была затабулирована (табл. 3). Использование формулы (2) для расчета восходящего потока  $E_{3z}$  на разных высотах  $z$  приводит к незначительным отклонениям от полученных по диаграмме.

$K_3$  — отношение величин  $E_{3z}^{\Phi}$ , полученных по формуле (2), к величинам  $E_{3z}^d$ , рассчитанным по диаграмме, распределяется следующим образом:

| $K_3$ | Число случаев | %    | $K_3$ | Число случаев | %   |
|-------|---------------|------|-------|---------------|-----|
| 1,02  | 9             | 5,4  | 0,97  | 9             | 5,4 |
| 1,01  | 25            | 15,0 | 0,96  | 2             | 1,2 |
| 1,00  | 51            | 30,6 | 0,95  | 4             | 2,4 |
| 0,99  | 38            | 22,8 | 0,94  | 5             | 2,8 |
| 0,98  | 21            | 12,6 | 0,93  | 2             | 1,2 |

Рассчитанные двумя различными способами, величины  $E_{3z}$  совпадают с точностью  $\pm 2\%$  в 144 случаях из 167, что составляет 86% всех случаев. Совпадение с точностью до 3% отмечается в 92% всех случаев. Заниженные отношения  $K_3 < 0,98$  наблюдаются главным образом для высот 8 км.

С меньшей точностью определяется длинноволновый баланс  $F$ , получаемый как разность двух величин. Наибольшая относительная ошибка в определении  $F = E_A - E_3$  отмечается на небольших высотах, где величина  $F$  имеет преимущественно наименьшие значения. Так, в приземном слое на высоте 0,5 км отношение длинноволнового баланса, рассчитанного на основании формул (1) и (2), к рассчитанному по диаграмме меняется от 0,85 до 1,23, а на высоте 4 км — от 0,90 до 1,07.

Для всей совокупности высот отношение  $K_4 = \frac{F\Phi}{F\Delta}$  меняется следующим образом:

| $K_4$       | Число случаев | %    |
|-------------|---------------|------|
| $< 0,85$    | 6             | 3,7  |
| $0,85-0,90$ | 15            | 9,9  |
| $0,91-0,95$ | 38            | 23,4 |
| $0,96-1,00$ | 49            | 30,2 |
| $1,01-1,05$ | 27            | 16,7 |
| $1,06-1,10$ | 17            | 10,5 |
| $1,11-1,15$ | 4             | 2,5  |
| $> 1,15$    | 5             | 3,1  |

Совпадение результатов с точностью до  $\pm 5\%$  отмечается в 85 случаях, что составляет 52% общего числа случаев, с точностью до  $\pm 10\%$  — в 135 случаях (85%), с точностью до  $\pm 15\%$  — в 151 случае (91%).

Из сказанного выше следует, что предложенные формулы (1) и (2) достаточно точно представляют результаты расчетов по диаграмме Шехтер как восходящего, так и нисходящего потоков. Возникает вопрос, насколько точно эти формулы и диаграмма представляют действительное распределение радиации.

Во многих работах, относящихся к подстилающей поверхности, отмечается достаточно точное совпадение измеренных и рассчитанных данных. Однако с увеличением высоты, как указывает В. Л. Гаевский [6], согласие измеренных и рассчитанных величин нарушается: измеренные величины — это относится как к восходящим, так и к нисходящим потокам — больше полученных по диаграмме. Расхождение растет с высотой, достигая 18—22% на высоте 6 км.

С другой стороны, по данным С. С. Гейгерова и В. Г. Кастрова [7], отмечается хорошее совпадение измеренных и рассчитанных величин длинноволнового баланса на всех высотах.

В настоящее время мы не располагаем достаточным количеством данных, чтобы сделать определенные выводы о соответствии или расхождении измеренных и рассчитанных величин.

Полученные нами величины длинноволновых потоков наряду с исследованием их связи с метеорологическими элементами могут быть использованы для анализа изменений составляющих длинноволнового баланса с высотой. Для этой цели были рассмотрены отдельно случаи, соответствующие летнему и зимнему периодам как для дневного, так и для ночного времени.

Из табл. 4, где дана зависимость от высоты  $E_{Az}$ ,  $E_{3z}$ ,  $F_z$ ,  $t_z$ ,  $q_z$ ,  $w_z$ , видно, что в летний период днем восходящий поток  $E_{3z}$  является убывающей функцией высоты. Наибольшие градиенты отмечаются в нижнем километровом слое. Средние значения градиентов следующие:

| Слой, км | $\frac{dE_{3z}}{dz}$ кал/см <sup>2</sup> мин. км |
|----------|--------------------------------------------------|
| 0,0—0,5  | 0,12                                             |
| 0,5—1,0  | 0,06                                             |
| 1,0—1,5  | 0,04                                             |
| 1,5—2,0  | 0,04                                             |

Таблица 4

Зависимость составляющих длинноволнового баланса от высоты при  
безоблачном небе

|                         | z км  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         | 0,04  | 0,50  | 1,00  | 1,50  | 2,00  | 3,00  | 4,00  | 5,00  | 6,00  | 7,00  | 8,00  |
| Лето, день (14 случаев) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| $E_{3z}$                | 0,742 | 0,678 | 0,650 | 0,626 | 0,607 | 0,580 | 0,557 | 0,534 | 0,518 | 0,486 | 0,446 |
| $E_{Az}$                | 0,523 | 0,490 | 0,452 | 0,419 | 0,384 | 0,342 | 0,298 | 0,246 | 0,193 | 0,136 |       |
| $F_z$                   | 0,219 | 0,188 | 0,198 | 0,207 | 0,223 | 0,238 | 0,259 | 0,288 | 0,325 | 0,350 |       |
| $t_z$                   | 24,0  | 20,8  | 17,2  | 13,4  | 10,1  | 4,7   | -0,6  | -5,9  | -12,3 | -19,3 | -26,4 |
| $q_z$                   | 8,9   | 7,3   | 6,1   | 5,1   | 3,6   | 3,2   | 2,3   | 1,6   | 1,0   | 0,6   | 0,3   |
| $w_z$                   | 2,000 | 1,628 | 1,260 | 0,970 | 0,738 | 0,434 | 0,232 | 0,117 | 0,055 | 0,022 |       |
| Лето, ночь (17 случаев) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| $E_{3z}$                | 0,608 | 0,616 | 0,604 | 0,584 | 0,567 | 0,545 | 0,521 | 0,495 | 0,476 | 0,449 | 0,418 |
| $E_{Az}$                | 0,501 | 0,480 | 0,448 | 0,414 | 0,384 | 0,337 | 0,299 | 0,242 | 0,173 | 0,115 |       |
| $F_z$                   | 0,107 | 0,136 | 0,156 | 0,170 | 0,183 | 0,208 | 0,222 | 0,253 | 0,303 | 0,334 |       |
| $t_z$                   | 17,8  | 18,1  | 15,5  | 11,7  | 8,5   | 2,9   | -2,5  | -8,5  | -14,9 | -25,0 | -26,4 |
| $q_z$                   | 9,8   | 8,9   | 7,5   | 6,1   | 5,1   | 3,8   | 2,5   | 1,6   | 1,1   | 0,6   | 0,4   |
| $w_z$                   | 2,300 | 1,782 | 1,390 | 1,054 | 0,801 | 0,446 | 0,225 | 0,109 | 0,043 | 0,013 |       |
| Зима, день (3 случая)   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| $E_{3z}$                | 0,476 | 0,494 | 0,490 | 0,492 | 0,472 | 0,439 | 0,419 | 0,399 |       |       |       |
| $E_{Az}$                | 0,360 | 0,336 | 0,318 | 0,294 | 0,268 | 0,215 | 0,166 | 0,095 |       |       |       |
| $F_z$                   | 0,116 | 0,158 | 0,162 | 0,198 | 0,204 | 0,224 | 0,253 | 0,304 |       |       |       |
| $t_z$                   | 3,6   | 0,1   | -0,7  | -2,4  | -4,7  | -10,1 | -16,6 | -22,6 | -30,0 |       |       |
| $q_z$                   | 3,6   | 2,9   | 5,2   | 2,0   | 1,6   | 0,9   | 0,5   | 0,3   | 0,2   |       |       |
| $w_z$                   | 0,720 | 0,540 | 0,392 | 0,273 | 0,187 | 0,082 | 0,033 | 0,008 |       |       |       |
| Зима, ночь (13 случаев) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| $E_{3z}$                | 0,440 | 0,460 | 0,460 | 0,441 | 0,437 | 0,426 | 0,410 | 0,398 |       |       |       |
| $E_{Az}$                | 0,340 | 0,326 | 0,310 | 0,288 | 0,266 | 0,228 | 0,172 | 0,138 |       |       |       |
| $F_z$                   | 0,100 | 0,134 | 0,150 | 0,153 | 0,171 | 0,198 | 0,238 | 0,260 |       |       |       |
| $t_z$                   | -2,1  | -2,1  | -2,8  | -4,6  | -6,8  | -10,9 | -16,1 | -21,0 | -25,6 |       |       |
| $q_z$                   | 2,9   | 2,9   | 2,5   | 2,1   | 1,7   | 1,2   | 0,7   | 0,5   | 0,3   |       |       |
| $w_z$                   | 0,760 | 0,580 | 0,437 | 0,314 | 0,226 | 0,114 | 0,045 | 0,021 |       |       |       |

С высоты 3 км начинается линейное убывание  $E_{3z}$  с высотой порядка 0,03 кал/см<sup>2</sup> мин. км. В отдельные дни в зависимости от стратификации атмосферы величина градиентов может отклоняться от приведенных выше, однако общий характер изменения  $E_{3z}$  с  $z$  сохраняется.

В ночное время в нижних слоях тропосферы отмечается несколько иная картина изменения  $E_{3z}$  с высотой: в нижнем полукилометровом

слое происходит незначительное увеличение; в более высоких слоях, так же как и днем,  $E_{3z}$  убывает с высотой, и с трехкилометровой высоты зависимость  $E_{3z}$  от  $z$  линейна. Ночные значения  $E_{3z}$  на всех высотах ниже дневных. Наибольшее различие в ночных и дневных значениях  $E_{3z}$  отмечается в нижних слоях, где оно достигает  $0,14$  кал/см<sup>2</sup> мин. км. Начиная с высоты  $1$  км эта разность почти постоянна по высоте и составляет около  $0,04$  кал/см<sup>2</sup> мин. км.

Зимой в ночное время увеличение  $E_{3z}$  с высотой в нижних слоях проявляется более отчетливо и распространяется до высоты  $1$  км. В дневное время в зимний период, в отличие от летнего, в нижнем слое до высоты  $1,5$  км также отмечается некоторое увеличение  $E_{3z}$  (в нашем распоряжении за этот период было всего только 3 случая). Дневные значения по-прежнему остаются выше ночных.

Таким образом, вертикальное распределение  $E_{3z}$  испытывает как сезонные, так и суточные изменения.

Что касается нисходящего потока  $E_{Az}$ , то, независимо от сезона и времени суток, во всей толще тропосферы наблюдается убывание  $E_{Az}$  с высотой. Отмечается только некоторое различие в градиентах  $\frac{dE_{Az}}{dz}$ .

Так, например, в летний период днем в нижнем двухкилометровом слое градиент  $\frac{dE_{Az}}{dz}$  приблизительно равен  $0,08$  кал/см<sup>2</sup> мин. км. В слое от  $2$  до  $5$  км происходит изменение градиента до  $0,05$  кал/см<sup>2</sup> мин. км, а с  $5$  км  $\frac{dE_{Az}}{dz}$  снова увеличивается до  $0,06$  кал/см<sup>2</sup> мин. км. В ночное время в нижнем двухкилометровом слое происходит некоторое, очень незначительное (на  $0,01$ — $0,02$  кал/см<sup>2</sup> мин. км), уменьшение  $E_{Az}$  и градиента  $\frac{dE_{Az}}{dz}$  по сравнению с дневными значениями.

В зимний период днем в нижнем полуторакилометровом слое  $\frac{dE_{Az}}{dz}$  составляет около  $0,05$  кал/см<sup>2</sup> мин. км, выше  $4$  км — около  $0,04$  кал/см<sup>2</sup> мин. км. Ночью в нижнем слое  $\frac{dE_{Az}}{dz}$  уменьшается до  $0,03$  кал/см<sup>2</sup> мин. км.

Различие величин  $E_{Az}$  в ночное и дневное время очень незначительно, переход от летнего сезона к зимнему вызывает изменение  $E_{Az}$  на  $0,16$  кал/см<sup>2</sup> мин. км в приземном слое и на  $0,12$  кал/см<sup>2</sup> мин. км в более высоких слоях.

Изменение градиентов  $\frac{dE_{Az}}{dz}$  отмечается на тех же высотах, что и изменение градиентов температуры.

Длинноволновый баланс, как правило, увеличивается с высотой. Исключение составляет дневное время в летний период, когда в приземном слое от  $0$  до  $0,5$  км, где наблюдаются сверхadiaбатические градиенты  $t_z$ , происходит уменьшение  $F$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Нийлиск Х. К вопросу о расчете теплового излучения атмосферы. Исследования по физике атмосферы, № 2, Ин-т физики и астрономии АН ЭССР, 1960.
2. Шехтер Ф. Н. К вычислению лучистых потоков тепла в атмосфере. Труды ГГО, вып. 22 (84), 1950.

3. Brooks F. A. Journ. Met., 9, No 1, 41, 1952.
4. Кондратьев К. Я. Лучистый теплообмен в атмосфере (гл. 4). Гидрометеоздат, Л., 1956.
5. Борушко И. С., Кириллова Т. В., Ковалева Е. Д., Лайхтман Д. Л., Цейтин Г. Х., Шехтер Ф. Н. Руководство по предвычислению температуры поверхности почвы в отдельной точке. Труды ГГО, вып. 27, 1951.
6. Гаевский В. Л. Исследование длинноволнового излучения атмосферы. Труды ГГО, вып. 100, 1960.
7. Гейгеров С. С., Кастров В. Г. Некоторые обобщения относительно термической трансформации воздуха на основании полетов свободных аэростатов ЦАО. Труды ЦАО, вып. 13, 1954.

## РАСЧЕТ НЕКОТОРЫХ ОШИБОК БОЛОМЕТРИЧЕСКОГО ПИРГЕЛИОМЕТРА

Для однопластинчатого пиргелиометра с приемником из проволоочной спирали вычислены влияния теплоотдачи через проволоки, служащие опорами и подводками тока, а также различия в положении источников тепла при облучении и при нагреве током. Учтены нетеплопроводные части спирали, состоящие из клея и черной краски.

Исследования 1951—1953 гг. пиргелиометра П. В. Вьюшкова [1, 4] показали пригодность метода для абсолютных измерений прямой солнечной радиации. Для выяснения вопроса о пиргелиометрической шкале в Научно-исследовательском институте механики и физики при Саратовском университете изготовлены 3 пиргелиометра Вьюшкова конструкции автора. Ниже оцениваются возможные систематические ошибки, присущие сконструированному прибору.

1. Приемником радиации болометрического пиргелиометра служит плоская однослойная спираль из медной эмалированной проволоки диаметром около 0,05 мм, бифилярно намотанной и включенной в одно из плеч измерительного моста. Остальные плечи выполнены из толстой манганиновой проволоки, причем плечо, симметричное приемнику относительно нуль-гальванометра, переменное.

При облучении спирали через нее протекает определенный, необходимый для уравнивания моста ток. При затенении спирали равновесие моста достигается увеличением тока. Зная обе силы тока, сопротивление, площадь и поглощательную способность приемника, можно определить интенсивность прямой солнечной радиации в абсолютных единицах.

Приемник радиации пиргелиометра подвешен к установочному металлическому кольцу на проволочных растяжках (рис. 1). При прочих равных условиях потоки тепла через растяжки к кольцу будут различными при открытой и закрытой трубке прибора. В первом случае часть подвесок облучается солнцем (пунктиром на рис. 1 показана наименьшая диафрагма). Это и обуславливает ошибку в определяемой интенсивности прямой солнечной радиации, вносимую растяжками.

Пусть температура нижней поверхности приемника в обоих случаях (солнце—тень) одинакова и равна  $t_0$ . В качестве  $t$  в дальнейшем рассматриваются избытки температур над температурой воздуха и кольца. Длина затененной части растяжки  $d$ , а общая длина  $l$ . Температуру в сечении для всей растяжки считаем одинаковой.

Количество тепла, переданное приемником через растяжку, можно выразить, как известно, следующим образом:

$$q = -\lambda \left( \frac{dt}{dx} \right)_{x=0} s.$$

Здесь  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $s$  — площадь поперечного сечения растяжки. Надо найти распределение температуры в растяжке при открытой и закрытой трубке пиргелиометра.

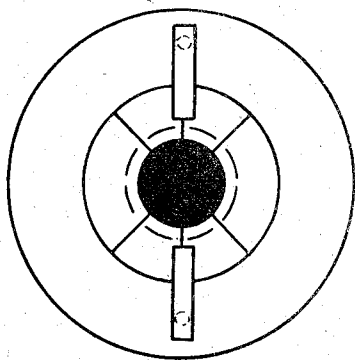


Рис. 1.

При открытой трубке прибора кривая для  $t$  будет состоять из двух частей: в освещенной и в неосвещенной частях растяжки, которые переходят друг в друга.

В освещенной части растяжки (рис. 2) ход  $t$  будет описываться уравнением (см., например, [3, 6])

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - \alpha^2 t + I\gamma = 0,$$

где  $\alpha = \sqrt{\frac{Kp}{\lambda s}}$ ,  $\gamma = \frac{\beta\delta}{\lambda s}$ ,  $I$  — интенсивность прямой солнечной радиации,  $\beta$  — коэффициент поглощения облучаемой поверхности растяжки,  $K$  — коэффициент тепло-

отдачи,  $p$  — периметр,  $s$  — площадь поперечного сечения,  $\delta$  — диаметр и  $\lambda$  — коэффициент внутренней теплопроводности растяжки.

Для неосвещенной части имеем уравнение

$$\frac{d^2 t_1}{dx_1^2} - \alpha^2 t_1 = 0.$$

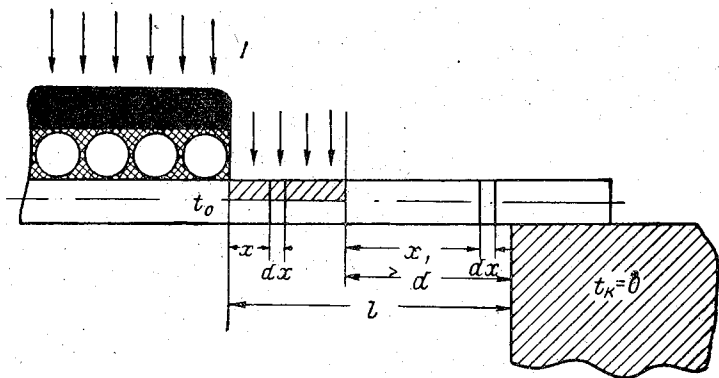


Рис. 2.

Общие решения этих уравнений будут соответственно:

$$t = Re^{-\alpha x} + Ke^{\alpha x} + I\frac{\gamma}{\alpha^2} \text{ и } t_1 = Me^{-\alpha x_1} + Ne^{\alpha x_1}.$$

Крайевые условия и условия на стыке  $t$  и  $t_1$  будут следующими:

$$t = t_0 \text{ при } x = 0, \quad t_1 = 0 \text{ при } x_1 = d;$$

$$t_{x=l-d} = t_{1x_1=0}, \quad \left( \frac{dt}{dx} \right)_{x=l-d} = \left( \frac{dt_1}{dx_1} \right)_{x_1=0}.$$

Последнее следует из того, что растяжка не бесконечно тонка и состоит из одного и того же материала.

Эти условия дают уравнения для определения постоянных:

$$t_0 = R + K + I \frac{\gamma}{\alpha^2},$$

$$Re^{-\alpha(l-d)} + Ke^{\alpha(l-d)} + I \frac{\gamma}{\alpha^2} = M + N,$$

$$-Re^{-\alpha(l-d)} + Ke^{\alpha(l-d)} = -M + N,$$

$$Me^{-\alpha d} + Ne^{\alpha d} = 0.$$

Найдя из этих уравнений  $R$  и  $K$ , получим выражение для  $t$

$$t = \frac{t_0 + I \frac{\gamma}{\alpha^2} (e^{-\alpha l} \operatorname{ch} \alpha d - 1)}{1 - e^{-2\alpha l}} e^{-\alpha x} + \frac{t_0 + I \frac{\gamma}{\alpha^2} (e^{\alpha l} \operatorname{ch} \alpha d - 1)}{1 - e^{2\alpha l}} e^{\alpha x} + I \frac{\gamma}{\alpha^2}.$$

Взяв  $\left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=0}$ , после ряда преобразований получим окончательно для потока тепла через начальное сечение растяжки при облучении ее следующее выражение:

$$q_{\odot} = \lambda \alpha s t_0 \operatorname{cth} \alpha l - \frac{I \gamma \lambda s}{\alpha} \left[ \frac{\operatorname{ch} \alpha l - \operatorname{ch} \alpha d}{\operatorname{sh} \alpha l} \right]. \quad (a)$$

В случае закрытой трубки уравнение для распределения  $t$  в растяжке будет

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - \alpha^2 t = 0.$$

Его решение  $t = A e^{-\alpha x} + B e^{\alpha x}$  должно удовлетворять следующим крайним условиям:

$$t = t_0 \text{ при } x = 0 \text{ и } t = 0 \text{ при } x = l.$$

Прделав все необходимые операции, получим

$$q_{\tau} = \lambda \alpha s t_0 \operatorname{cth} \alpha l. \quad (b)$$

Видно, что при облучении солнцем поток тепла через растяжку (а) меньше (b) на величину второго члена в (а), который и выражает зависимость  $q$  от длины освещенной части растяжки.

Для учета возникающей вследствие этого ошибки в интенсивности прямой солнечной радиации напомним уравнения для теплового баланса приемника в обоих случаях:

$$I \rho S_0 + E_{\odot} = h S_0 t_0 + 4 \lambda \alpha s t_0 \operatorname{cth} \alpha l - \frac{4 I \gamma \lambda s}{\alpha} \left[ \frac{\operatorname{ch} \alpha l - \operatorname{ch} \alpha d}{\operatorname{sh} \alpha l} \right],$$

$$E_{\tau} = h S_0 t_0 + 4 \lambda \alpha s t_0 \operatorname{cth} \alpha l.$$

Здесь  $\rho$  — поглощательная способность приемника радиации,  $S_0$  — его площадь,  $E_{\odot}$  и  $E_{\tau}$  — энергия, выделяемая током в облучаемом и затененном приемнике,  $h$  — суммарный коэффициент теплоотдачи для поверхностей приемника. В нашем случае 4 подвески, поэтому введен коэффициент 4.

Из этих уравнений получим

$$I \left( 1 + 4 \frac{\gamma \lambda s}{\rho \alpha S_0} \left[ \frac{\operatorname{ch} \alpha l - \operatorname{ch} \alpha d}{\operatorname{sh} \alpha l} \right] \right) = \frac{E_{\tau} - E_{\odot}}{\rho S_0} = W.$$

В правой части  $W$  как раз и выражает интенсивность радиации, определяемую из самого принципа действия прибора. Таким образом, из-за влияния растяжек необходимо  $W$  исправить на величину в скобках

$$I = \frac{W}{1 + 4 \frac{\gamma \lambda s}{\rho \alpha S_0} \left[ \frac{\text{ch } \alpha l - \text{ch } \alpha d}{\text{sh } \alpha l} \right]}.$$

Из формулы видно, что если бы  $d=l$ , т. е. растяжка в обоих случаях была бы затенена, то  $I=W$ . Наибольшая поправка получается при  $d=0$ , т. е. вся растяжка облучается.

Для применявшихся нами в 1953 г. растяжек и диафрагмы имеем:  $l=0,6$  см,  $d=0,4$  см,  $\delta=0,005$  см,  $\lambda \simeq 1$  (медь),  $k=0,0004$  кал/см<sup>2</sup> сек. (определен нами экспериментально из теплового баланса приемника, что близко к литературным данным),  $\beta=0,8$ ,  $\rho=0,985$ , площадь приемника радиации  $S_0=0,6$  см<sup>2</sup>.

С этими данными получим  $I = \frac{W}{1 + 0,0045} = W \cdot 0,9955$ , т. е. для исключения влияния растяжек нужно полученные пиргелиометром интенсивности радиации снизить приблизительно на 0,5%.

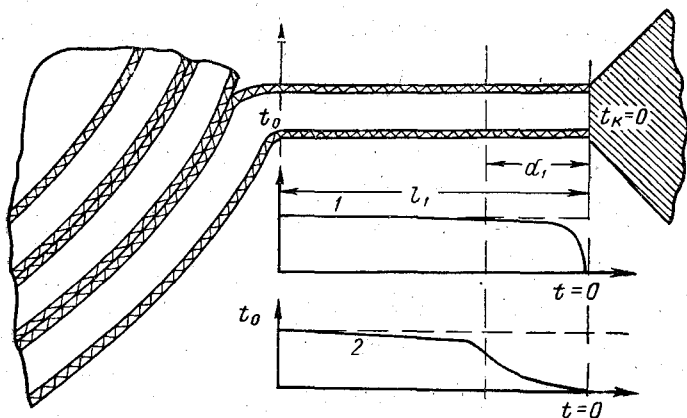


Рис. 3.

2. Влияние концов приемника, подводящих к нему ток (рис. 3), будет иным. В нашем случае они имели длину 3 мм, следовательно, при облучении солнцем освещается 2 мм, а 1 мм диафрагмируется. Эти подводящие проводники являются частью приемника радиации. Подвергающаяся облучению часть их поверхности входила в эффективную площадь приемника.

Тепловое стационарное состояние приемника при закрытой трубке прибора наступает при некоторой силе тока  $i_T$  в нем. При этом подводящий проводник прогревается по всей длине, начиная от спая с контактной пластиной. Распределение температуры в нем изображается кривой 1 (рис. 3). При облучении солнцем и установлении той же температуры приемника освещается только часть подводящего проводника ( $l-d_1$ ), а в остальной части течет ток  $i_{\odot}$ .

Если бы не было  $i_{\odot}$ , то ход температуры в подводящем проводнике изображался бы кривой 2, т. е. в нем в чистом виде наблюдался бы краевой эффект, занижающий показания.

Не производя вычислений, отметим следующее: 1) если в пиргелиометре Онгстрема краевой эффект относится ко всему приемнику

радиации, то в нашем случае он имеет место только для подводящих проводников; 2) величина краевого эффекта при этом снижается благодаря току в проводнике, который приближает ход кривой температуры к случаю 1 (на рис. 3); 3) если краевой эффект в нашем случае для подводящего проводника и составит несколько процентов, то в определяемую радиацию эта ошибка войдет с весом, близким к отношению облучаемой площади подводящего проводника ко всей площади приемника радиации. Это отношение меньше  $10^{-2}$ . Следовательно, болометрический пиргелиометр практически свободен от краевого эффекта.

3. Измеряемое излучение нагревает приемник радиации с поверхности. Создаваемый в зачерненной поверхности тепловой поток нагревает спираль, проходя через слой сажи, склеивающую пленку и изоляцию провода. Температура приемной поверхности в этом случае будет выше температуры спирали. При подогреве же спирали током до равной температуры, что фиксируется мостом по равенству сопротивлений спирали в обоих случаях, температура приемной поверхности будет ниже температуры спирали. Это неравенство условий теплообмена приемной поверхности в обоих случаях приводит к занижению измеренных значений радиации.

Подобная ошибка определялась для учета влияния оболочки термометров при нестационарном тепловом режиме [5]. Для стационарного режима этот эффект исследовался применительно к пиргелиометру Онгстрема [6].

В обоих случаях необходимая поправка вводилась умножением результатов измерений на выражение вида  $1 + \alpha \frac{d}{\lambda}$ . Здесь  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи приемной поверхности,  $d$  — толщина и  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности слоев между приемной поверхностью и телом, температура которого измерялась.

В болометрическом пиргелиометре приемник радиации не сплошной. Между витками проволоки размещены двойные слои эмалевой изоляции и склеивающий состав, теплопроводность которых составляет  $10^{-3}$  и меньше теплопроводности меди. Толщина эмалевой изоляции у проволок диаметром до 0,09 мм равна 0,008 мм. Поэтому даже при плотной намотке спирали малотеплопроводные промежутки между витками составят в зависимости от применяемой для спирали проволоки 15—30% общей площади приемника. Это может внести дополнительную ошибку в измерения радиации данным прибором.

Влияние слоев между витками можно учесть, оценив величину теплового потока от нагретых проводников через эти слои.

Рассмотрим два соседних витка спирали с изоляцией между ними. Будем считать, что эти витки на выбранном участке параллельны и вдоль них передачи тепла нет. Для упрощения заменим круглый провод квадратным с диагональю, равной диаметру провода спирали. Пусть промежуток между сторонами квадратного провода полностью заполнен изоляцией, что только усилит исследуемое влияние. Предположим также, что коэффициент теплоотдачи одинаков для верхней и нижней поверхностей.

При таких предположениях распределение линий теплового потока в изоляции между проводами изображено на рис. 4. Ось  $z$  направлена вверх, перпендикулярно плоскости рисунка.

Очевидно, что через изоляцию на участке единичной длины в направлении оси  $z$  и шириной  $L$  пройдет тепловой поток, отданный поверхностью провода высотой  $a$ .

Температурное поле в изоляции при стационарном процессе должно удовлетворять следующим условиям:

- 1) функция  $\vartheta = \vartheta(x, y)$  должна быть решением уравнения Лапласа

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} = 0,$$

так как во всем объеме изоляции нет внутренних источников тепла. В качестве  $\vartheta$  принимаем безразмерное выражение для превышения температуры  $\vartheta = \frac{t - t_0}{t_1 - t_0}$ . Здесь  $t$  — температура в любой точке,  $t_0$  — температура охлаждающей среды и  $t_1$  — температура провода;

- 2)  $-\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} = \alpha \vartheta$  при  $x = \pm a$  (вдоль  $L$ );

- 3) при  $y = 0$   $\vartheta = 1$  для  $-a < x < a$ ;

- 4)  $\frac{\partial \vartheta}{\partial y} = 0$  при  $y = L$ .

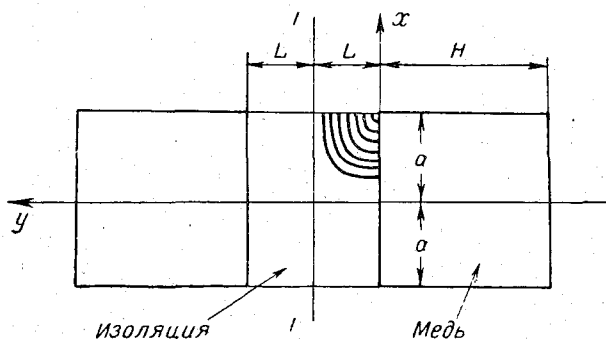


Рис. 4.

Подобная задача решена в [6].

Общее решение уравнения Лапласа, удовлетворяющее всем граничным условиям, имеет вид

$$\vartheta = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \frac{\text{ch}[n_k(L-y)]}{\text{ch}(n_k L)} \cos(n_k x). \quad (1)$$

Здесь  $n_k$  находится из корней трансцендентного уравнения

$$\delta_k = \frac{\alpha}{\lambda} a \text{ctg } \delta_k, \quad (2)$$

в котором

$$\delta_k = n_k a;$$

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи с поверхностями и  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности изоляции;  $a$  и  $L$  понятны из рис. 4.

Для расчета коэффициентов  $A_k$  применяется формула

$$A_k = \frac{2 \sin \delta_k}{\delta_k + \sin \delta_k \cos \delta_k}. \quad (3)$$

Проведем расчет для реально применяемого в спиральных проводах толщины 0,08 мм или для квадратного провода со стороной 0,06 мм и, следовательно,  $a = 0,03$  мм. При этом расстояние между соседними квадратными проводами получается 0,04 мм, а  $L = 0,02$  мм. Примем  $\alpha = 12$  Вт/м<sup>2</sup>град.,  $\lambda = 0,18$  Вт/м град.; при расчете используем данные, выраженные в технической системе единиц.

Тогда  $\frac{\alpha}{\lambda}a = 0,002$ . Для таких малых величин  $\frac{\alpha}{\lambda}a$  в [2] не даны значения корней уравнения (2).

Решая его методом последовательных приближений Ньютона, мы получили следующие значения корней:  $\delta_1 = 0,0447$ ,  $\delta_2 = 3,1422$ ,  $\delta_3 = 6,2835$ ,  $\delta_4 = 9,4250$ .

С этими корнями уравнения (2) по формуле (3) вычислены значения коэффициентов  $A_k$ :  $A_1 = 1,0001$ ,  $A_2 = -0,0004$ ,  $A_3 = 0,0001$ ,  $A_4 = 0,0000$ .

В качестве контроля используем условие  $\sum A_k = 1$ , что в нашем случае дает  $\sum A_k = 0,9998$ , т. е. искомое решение (1) с точностью до 0,02% представляет реальное распределение температуры в слое изоляции.

Средняя плотность теплового потока, проходящего на участке изоляции шириной  $L$ , рассчитывается по формуле

$$w_L = \frac{t_1 - t_0}{L} \lambda \sum_{k=1}^{\infty} A_k \operatorname{th}(n_k L) \sin(n_k a), \quad (4)$$

где  $(t_1 - t_0)$  — превышение температуры медного провода.

Считая  $(t_1 - t_0)$  равным  $20^\circ \text{C}$ , получим  $w_L = 239,80 \text{ Вт/м}^2$ .

Непосредственно же с поверхности провода будет отдаваться тепловой поток (вдоль  $H$  на рис. 4)  $w_H = \alpha(t_1 - t_0)$ . Это дает в нашем случае  $240,00 \text{ Вт/м}^2$ .

Таким образом, через изоляцию между проводами ответвляется поток, отличающийся от потока с поверхности провода на 0,08%.

Расчеты, проведенные при тех же условиях теплопередачи, дают для различных значений  $L$  следующее.

При  $L$ , равном 0,04, 0,05, 0,10 мм, плотность теплового потока через изоляцию отличается от плотности теплового потока с поверхности проводника соответственно на 0,2, 0,3, 0,8%.

При плотной намотке спирали круглым проводом расстояние между соседними проводниками будет равно удвоенной толщине изоляции, т. е. в нашем случае 0,02 мм. При этом разница рассматриваемых потоков будет меньше 0,08%.

Имеющие место отдельные неплотности в намотке между витками спирали, заполненные склеивающим составом, не превышают по толщине 0,03 мм. Следовательно, их влияние на тепловой поток, идущий через эти слои, будет порядка 0,10—0,15%.

Расчеты делались в предположении, что теплоотдача происходит непосредственно с поверхностей проводников и заключенных между ними слоев изоляции. Очевидно, что наличие изолирующих слоев и сажи над поверхностями  $x = \pm a$ , что имеет место в действительности, будет способствовать выравниванию обоих рассматриваемых потоков.

Неодинаковость коэффициентов теплоотдачи с верхней и нижней поверхностей также существенно не изменит полученного вывода.

Криволинейность проводников и слоев изоляции между ними приводит к изменению плотности теплового потока, проходящего через изоляцию. Максимальная величина подобного изменения получится, если предположить, что тепловой поток прошел по радиальному направлению спирали через изоляцию до нейтральной поверхности, а только потом отдан теплоотдающей поверхностью. В этом случае

$$\frac{w_L}{w_a} = \frac{r}{r + L}.$$

Здесь  $w_L$  — плотность теплового потока, проходящего через слой изоляции толщиной  $L$ ,  $w_a$  — плотность теплового потока на поверхности проводника  $a$ ,  $r$  — радиус кривизны поверхности проводника  $a$ . Ввиду ма-

лости  $L$  по сравнению с  $r$  ( $L=0,02$  мм, а  $r$  мал только в первых центральных витках, радиус же спирали равен 4,5 мм) отношение  $\frac{r}{r+L}$  почти для всех витков спирали практически равно единице.

Следовательно, предположение о параллельности соседних витков спирали, принятое при расчете, для тонких слоев изоляции между витками близко соответствует реальным условиям.

Некоторая несимметрия условий между витками спирали может вызываться наличием температурного градиента от центра спирали к краю вследствие теплоотдачи по периметру крайнего витка. Но благодаря наличию между витками слоев изоляции и одинаковой плотности тока

в проволоке спирали это может сказаться практически только на условиях в крайнем витке.

Таким образом, можно сделать окончательный вывод, что тонкая спираль плотной намотки в процессах теплопередачи ведет себя как однородная пластина.

Поскольку спираль в пределах толщины проволоки без изоляции можно считать однородной пластиной, нетрудно оценить величину ошибки за счет различия в нагреве током и радиацией.

Пусть  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты теплоотдачи верхней (приемной) и нижней поверхностей спирали,  $\delta_1, \lambda_1$  и  $\delta_2, \lambda_2$  — толщины и коэффициенты теплопроводности изолирующих слоев соответственно, причем  $\lambda_1$  является суммарным коэффициентом теплопроводности слоев эмалевой изоляции, склеивающей пленки и сажи. Теплопроводности меди на три порядка выше, чем у названных слоев, поэтому перепадом температуры в медной проволоке можно пренебречь, считая ее одинаковой в обоих случаях нагрева.

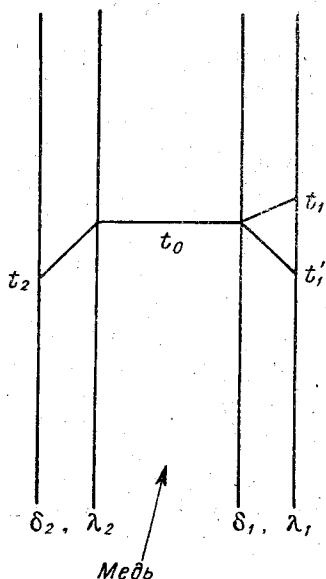


Рис. 5.

Ход температуры в приемнике радиации при облучении представится ломаной линией  $t_1 t_0 t_2$  на рис. 5, где  $t_1$  — температура приемной поверхности. При этом в спирали выделяется тепловой поток  $w_{\odot}$ , создаваемый компенсирующим током.

Пусть интенсивность падающей радиации  $I$  (в болометрическом пиргелиометре  $w_{\odot} < I$ ). Тогда через приемник от приемной поверхности (в направлении от  $t_1$  к  $t_2$ ) пройдет некоторый тепловой поток

$$I - \alpha_1 t_1 = \alpha_2 t_2 - w.$$

Здесь в качестве  $t$  приняты избытки температуры поверхностей над температурой окружающей среды.

Выражая  $t_1$  и  $t_2$  через  $t_0$  и остальные параметры, получим

$$I = t_0 \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_1 \alpha_2 R}{1 + \alpha_2 \frac{\delta_2}{\lambda_2}} - w_{\odot} \left( 1 + \alpha_1 \frac{\delta_1}{\lambda_1} \right), \quad (5)$$

где  $R = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}$ .

При закрытой трубке компенсация производится током, при этом выделяется энергия  $w_T$ . Ход температуры в приемнике в этом случае

представится линией  $t_1't_0t_2$ , поскольку при компенсации температуры медной проволоки одна и та же линия  $t_1't_0t_2$  будет совпадать с  $t_1t_0t_2$  на участке  $t_0t_2$ .

Аналогично в этом случае можно получить

$$\omega_T = t_0 \left[ \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_1 \alpha_2 R}{\left(1 + \alpha_1 \frac{\delta_1}{\lambda_1}\right) \left(1 + \alpha_2 \frac{\delta_2}{\lambda_2}\right)} \right]. \quad (6)$$

Исключая из выражений (5) и (6)  $t_0$ , получим

$$I = (\omega_T - \omega_{\odot}) \left(1 + \alpha_1 \frac{\delta_1}{\lambda_1}\right). \quad (7)$$

Здесь  $(\omega_T - \omega_{\odot})$  — разность энергии компенсирующих токов при закрытой и открытой трубке прибора, т. е. величина радиации, полученная из измерений болометрическим пиргелиометром.

Таким образом, значение радиации, свободной от исследуемой ошибки, получается умножением результатов измерений на член вида  $1 + \alpha_1 \frac{\delta_1}{\lambda_1}$ . Он совпадает с подобным поправочным членом в работах [5] и [6], хотя получен при несколько иных предположениях. По-видимому, выражение вида  $1 + \alpha_1 \frac{\delta_1}{\lambda_1}$  является общим для учета ошибок подобного рода.

Чтобы судить о величине возможной за счет данного эффекта ошибки, примем, что  $\alpha = 12$  Вт/м<sup>2</sup>град., суммарная толщина слоев изоляции и сажи  $\delta_1 = 1 \cdot 10^{-4}$  м, средняя теплопроводность слоев  $\lambda = 0,15$  Вт/м град., что близко соответствует действительным условиям. Тогда

$$I = (\omega_T - \omega_{\odot}) \cdot 1,008,$$

т. е. показания прибора нужно увеличить на 0,8%.

Необходимо отметить, что в качестве  $\alpha_1$  должно быть взято суммарное значение коэффициента теплоотдачи как за счет конвекции, так и за счет лучеиспускания. Значение  $\alpha_1$  сильно зависит от условий охлаждения, в особенности от ветра. Следовательно, для точного учета ошибки за счет различия в способах нагрева приемной спирали радиацией и током необходим тщательный учет входящих в (7) параметров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вьюшков П. В. и Ридель Е. А. О болометрическом пиргелиометре для абсолютных измерений прямой солнечной радиации. Астроном. журн., 34, вып. 3, 1957.
2. Готтер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин. Госэнергоиздат. М., 1961, стр. 260—266.
3. Савинов С. И. К теории пластинчатых актинометров типа Михельсона. Труды ГГО, вып. 14 (76), 1949.
4. Скларов Ю. А. О болометрическом пиргелиометре П. В. Вьюшкова. Науч. ежегодник СГУ, Саратов, 1954.
5. Смирнов З. Д. Об измерении радиации помощью термометров. Зап. имп. акад. наук, 16, № 2, 1904.
6. Angström A. Meteorol. Zeitschr., 31, 1914, 369—373.

## ОСЛАБЛЕНИЕ СУММАРНОЙ РАДИАЦИИ ОБЛАКАМИ ВЕРХНЕГО ЯРУСА

Рассматривается вопрос об ослаблении суммарной радиации ледяными облаками верхнего яруса при различной мутности подоблачной атмосферы и различной величине альbedo подстилающей поверхности. Определены мгновенные и среднесуточные коэффициенты ослабления суммарной радиации облаками верхнего яруса.

Вопрос о коэффициенте пропускания суммарной радиации ледяными облаками верхнего яруса до сих пор не подвергался теоретическому рассмотрению. По-видимому, это объясняется тем, что отсутствуют экспериментальные данные по целому ряду оптических характеристик, необходимых для теоретического решения данной задачи. К таким характеристикам относятся: индикатриса рассеяния, коэффициент ослабления, водность ледяных облаков и др.

Однако представляется возможным решить поставленную задачу и без использования этих величин.

Согласно результатам работы [1], величина суммарной радиации на уровне земной поверхности может быть представлена в виде

$$Q = \frac{CS_0 \sin h_{\odot}}{e^{\frac{p}{m_{\odot}}} (1 - e^{m_{\odot} \tau^*}) + (1 - a_c) \frac{2}{m_{\odot}} \Gamma_D e^{-\frac{p}{m_{\odot}}} e^{m_{\odot} \tau^*} \cdot F}, \quad (1)$$

где  $F = \left[ Ei\left(\frac{p}{m_{\odot}}\right) - Ei\left(\frac{p}{m_{\odot}} e^{m_{\odot} \tau^*}\right) \right]$ ,  $C$  — коэффициент пропускания суммарной радиации подоблачной атмосферой,  $S_0$  — солнечная постоянная,  $h_{\odot}$  — высота солнца над горизонтом,  $m_{\odot} = \frac{1}{\sin h_{\odot}}$ ,  $a_c$  — величина альbedo системы подоблачная атмосфера—земля,  $\tau^*$  — оптическая толщина облаков,  $p = (2\Gamma_D - m_{\odot} \beta) e^{-m_{\odot} \tau^*}$ ,  $\beta_{\odot}$  — некоторая функция индикатрисы рассеяния, характеризующая долю прямой радиации, рассеянной в верхнюю полусферу,  $\Gamma_D$  — также функция индикатрисы рассеяния, определяющая долю диффузной радиации, рассеянной в верхнюю полусферу [2],  $Ei(x)$  — интегральная показательная функция. Коэффициенты  $c$  и  $a_c$  могут быть рассчитаны достаточно надежно с помощью метода, предложенного в работах [3, 4, 5],

$$C = \frac{Q_1}{m^* (1 + fm^*)}, \quad a_c = \frac{a_3 + fm^*}{1 + fm^*},$$

$Q_1$  — величина суммарной радиации на уровне нижней границы облаков,  $m^*$  — средний секанс угла, определяющего направление распространения центра тяжести нисходящей радиации на уровне нижней границы облаков. Согласно данным работы [1],  $m^* = (m_{\odot} - 2)e^{-m_{\odot} \tau^*} + 2$ ,  $f$  — коэффициент, характеризующий прозрачность подоблачной атмосферы (см. [5]),  $a_s$  — величина альбеда подстилающей поверхности.

Для расчета коэффициентов  $\Gamma_D$  и  $\beta_{\odot}$  необходимо знать индикатрису рассеяния на ледяных частицах.

Оказывается, индикатрису рассеяния радиации облачными частицами приблизительно можно определить исходя из простых физических соображений.

Как известно, облака верхнего яруса состоят из кристалликов, которые могут образовывать сростки (друзы) из большого числа игл и пластинок. Ввиду многократного отражения от граней таких образований эти сростки будут рассеивать радиацию диффузно. Кроме того, в ледяных кристаллах встречаются многочисленные воздушные включения, благодаря чему их рассеивающая способность весьма велика.

Вследствие сказанного выше мы можем в первом приближении рассматривать облака верхнего яруса как среду, состоящую из частиц, рассеивающих радиацию равномерно по всем направлениям, за исключением очень малого угла в направлении распространения падающей радиации.

Всякая индикатриса для достаточно крупных (по сравнению с длиной волны) частиц может быть получена путем суммирования эффектов отражения и дифракции. Ошибка за счет того, что мы суммируем интенсивности, а не поля, не превышает нескольких процентов.

Индикатриса рассеяния  $x_1(\gamma)$ , обусловленная отражением, имеет, по видимому, в силу сказанного выше форму, близкую к сферической. Индикатриса, обусловленная дифракцией, представляет собой длинный узкий «нос». При этом вся дифрагированная энергия сосредоточена в пределах очень малого угла. Итак, суммарная индикатриса может быть представлена в следующем виде:

$$x(\gamma) = p_1 x_1(\gamma) + p_2 x_2(\gamma),$$

где  $p_1$  и  $p_2$  — относительные «веса» величин отраженной и дифрагированной радиации. Для крупных частиц, как известно,

$$p_1 = p_2 = \frac{1}{2}.$$

Таким образом,

$$x(\gamma) = \frac{1}{2} [1 + x_2(\gamma)],$$

так как при сферической индикатрисе  $x(\gamma) = 1$ .

Согласно [2],

$$\beta(h_{\odot}) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\pi/2}^{\pi} x(\gamma) \sin \vartheta d\vartheta,$$

где

$$\gamma = \arccos(\cos \vartheta \sin h_{\odot} + \sin \vartheta \cos h_{\odot} \cos \varphi),$$

и

$$\Gamma_D = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\pi/2}^{\pi} \beta(\vartheta) \sin \vartheta d\vartheta.$$

Учитывая, что индикатриса  $x_2(\gamma)$  отлична от нуля практически только в чрезвычайно узком конусе, величины  $\beta_{\odot}$  и  $\Gamma_{\odot}$  могут быть сразу определены:  $\beta_{\odot} = \Gamma_{\odot} = 0,25$ .

Последним параметром, который необходимо определить, является оптическая толщина облаков верхнего яруса.

Средняя величина оптической толщины облаков верхнего яруса определялась нами на основании осредненных многолетних данных по измерению прямой солнечной радиации как прошедшей через облака верхнего яруса, так и ослабленной лишь безоблачной атмосферой.

Пусть  $I_1(h_{\odot})$  — средняя величина прямой радиации при высоте солнца  $h_{\odot}$  в случае безоблачного неба,  $I_2(h_{\odot})$  — средняя величина прямой радиации, прошедшей через облако верхнего яруса при той же высоте солнца,  $\tau_1$  — средняя оптическая толщина безоблачной атмосферы,  $\tau_2$  — средняя оптическая толщина облачного слоя,  $I_0$  — солнечная постоянная.

Тогда

$$I_1 = I_0 e^{-\frac{\tau_1}{\sin h_{\odot}}} \text{ и } I_2 = I_0 e^{-\frac{(\tau_1 + \tau_2)}{\sin h_{\odot}}},$$

отсюда

$$\frac{I_2}{I_1} = e^{-\frac{\tau_2}{\sin h_{\odot}}}$$

или

$$\tau_2 = -\sin h_{\odot} \ln \frac{I_2}{I_1}. \quad (1)$$

По формуле (1) нами были рассчитаны средние величины  $\tau_2$  при различных высотах солнца.

Однако  $\tau_2$  — это еще не истинная оптическая толщина облачного слоя. Дело в том, что как уже было сказано выше, вся дифрагированная энергия сосредоточена внутри очень малого телесного угла, и поэтому эта часть рассеянной энергии (а она составляет ровно половину всей рассеянной радиации) попадает в приемное отверстие актинометра. Следовательно, оптическая толщина, определенная по формуле (1), будет в два раза меньше истинной  $\tau^*$ .

Ввиду того что нашей задачей является определение коэффициента ослабления облаков верхнего яруса в целом, мы не будем разделять облака этого яруса на виды Ci, Cs, Cc, и поэтому в табл. 1 приведена средняя оптическая толщина облаков Ci и Cs, полученная следующим обра-

$$\text{зом: } \tau^* = \frac{\tau_{Ci}^* + \tau^*}{2}.$$

Таблица 1

|                           |     |      |      |      |      |      |
|---------------------------|-----|------|------|------|------|------|
| $h_{\odot}^{\circ}$ . . . | 15  | 20   | 25   | 30   | 40   | 50   |
| $\tau^*$ . . .            | 1,6 | 1,35 | 1,00 | 0,90 | 0,63 | 0,47 |

Как видно из таблицы, величина оптической толщины облаков верхнего яруса имеет заметный суточный ход, который, очевидно, объясняется тем, что при увеличении высоты солнца над горизонтом, а следовательно, и потока солнечной радиации увеличивается величина поглощенной энергии, в результате чего облака частично испаряются.

Теперь мы располагаем всеми данными, необходимыми для расчета суммарной радиации при наличии облаков верхнего яруса.

На рис. 1 представлена рассчитанная нами зависимость суммарной радиации при облаках верхнего яруса от высоты солнца над горизонтом. Расчет был произведен для двух состояний подоблачной атмосферы: с большой прозрачностью атмосферы, характеризующейся параметром  $f=0,10$ , и с меньшей прозрачностью ( $f=0,15$ ). Величина альбеда

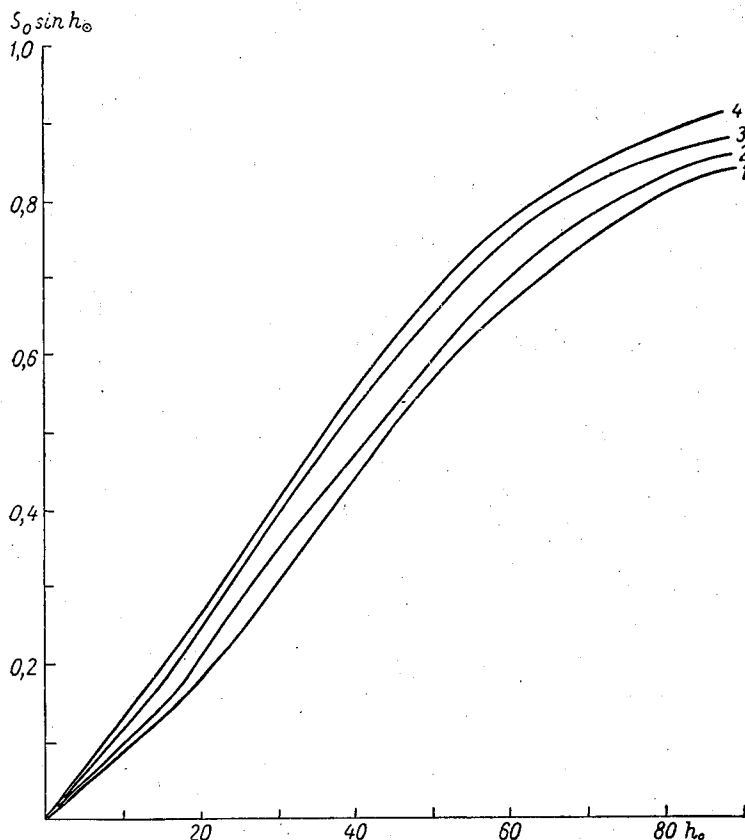


Рис. 1. Величина суммарной радиации при различных высотах солнца над горизонтом.

При облаках верхнего яруса: 1 —  $f=0,14$ , 2 —  $f=0,10$ ; при безоблачном небе: 3 —  $f=0,14$ , 4 —  $f=0,10$ .

подстилающей поверхности была принята равной 0,2. На этом же рисунке приведены кривые, соответствующие величинам суммарной радиации при безоблачной атмосфере для тех же параметров  $f$  ( $f_1=0,10$ ,  $f_2=0,15$ ).

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента ослабления суммарной радиации облаками верхнего яруса  $C_b(h_\odot)$  от высоты солнца над горизонтом. Из рассмотрения рисунка видно, что величина коэффициента  $C_b(h_\odot)$  существенно зависит от высоты солнца. Полученная нами зависимость достаточно хорошо подтверждается экспериментальным материалом. Столь сильная зависимость  $C_b$  от высоты солнца затрудняет использование этого коэффициента при решении ряда метеорологических задач, тем более что для решения очень многих вопросов требуются не мгновенные значения, а средние за сутки, декаду, месяц и т. д.

В связи с этим нами были рассчитаны суточные коэффициенты ослабления  $\bar{C}_B$ . Эта величина рассчитывалась следующим образом:

$$\bar{C}_B = 1 - \frac{\Sigma_2}{\Sigma_1},$$

где  $\Sigma_1$  — суточная сумма суммарной радиации при безоблачном небе,  $\Sigma_2$  — суточная сумма суммарной радиации при облаках верхнего яруса.

Суточные суммы суммарной радиации при безоблачном небе могут быть получены достаточно просто [5, 6].

Аналитическое выражение для суточных сумм суммарной радиации при облаках верхнего яруса получить затруднительно, так как для этого необходимо проинтегрировать выражение (1) по времени от восхода до захода солнца. В связи с этим нами было осуществлено численное интегрирование по следующей схеме. Все светлое время суток разбивалось на часовые интервалы и для каждого интервала определялась средняя высота солнца. По этой высоте солнца находилась по рис. 1 соответствующая величина суммарной радиации. Умножив эту величину

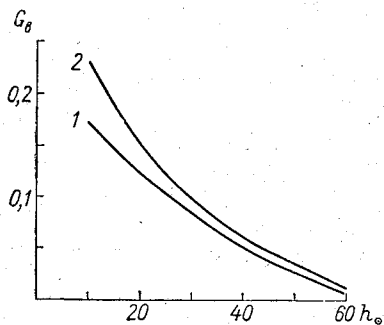


Рис. 2. Зависимость коэффициента ослабления  $C_B$  от высоты солнца над горизонтом.

1 —  $a_3 = 0,65$ , 2 —  $a_3 = 0,20$ .

на 60, мы получали часовые суммы. В результате суммирования всех часовых сумм от восхода и до захода солнца мы определяли суточные суммы суммарной радиации.

Среднесуточные коэффициенты  $\bar{C}$  рассчитывались нами для всех месяцев и для различных широт (от 30 до 70°). Как и следовало ожидать,

эти коэффициенты  $\bar{C}$  имеют довольно большой годовой ход и заметно зависят от широты места. Эти зависимости представлены

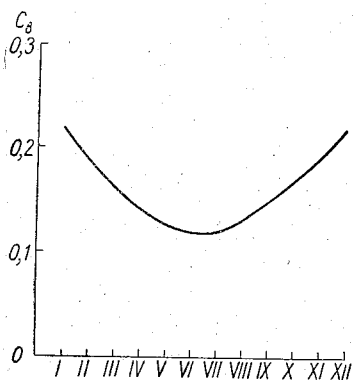


Рис. 3. Годовой ход среднесуточного коэффициента ослабления.

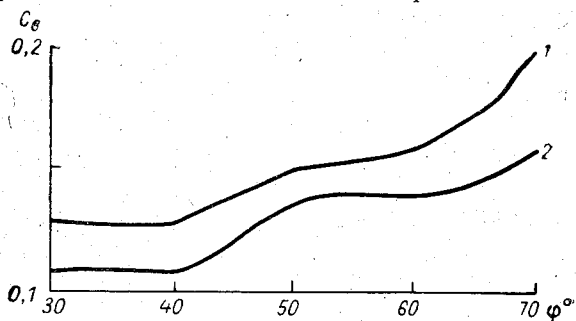


Рис. 4. Широтный ход коэффициента ослабления (июнь).

1 —  $f = 0,14$ , 2 —  $f = 0,10$ .

на рис. 3 и 4. Несмотря на заметную зависимость величины  $\bar{C}$  от времени года и от широты места, использование этого коэффициента для большого числа метеорологических задач значительно удобнее, чем использование коэффициента  $C(h_\odot)$ , в силу меньшего диапазона изменения этого коэффициента. Действительно, для каждой широты можно выбрать 2—3 сезона, в течение которых изменением  $\bar{C}$  можно пренебречь.

Кроме зависимости коэффициента ослабления от перечисленных

выше факторов, необходимо учитывать также его зависимость от величины альbedo подстилающей поверхности.

В качестве иллюстрации на рис. 2 приведен суточный ход коэффициентов ослабления при двух значениях альbedo подстилающей поверхности  $a_3=0,2$  и  $a_3=0,65$ . Из рисунка видно, что при всех прочих равных условиях коэффициент ослабления при  $a_3=0,65$  оказывается заметно меньшим, чем при  $a_3=0,20$ .

Аналогичный вывод следует сделать относительно зависимости среднесуточного коэффициента ослабления  $\overline{C}$  от величины альbedo подстилающей поверхности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Берлянд М. Е., Новосельцев Е. П. К теории зависимости суммарной радиации от облачности. Научные сообщения Ин-та геол. и геогр. АН ЛитССР, т. XIII, 1962.
2. Кузнецов Е. С. К вопросу о приближенных уравнениях переноса лучистой энергии в рассеивающей и поглощающей среде. ДАН СССР, т. XXXVII, № 7—8, 1942.
3. Кастров В. Г. Некоторые вопросы теории рассеяния света в чистой атмосфере. Журнал геофизики, № 2, 1933.
4. Махоткин Л. Г. О способах вычисления рассеянной освещенности при ясном небе. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 5, 1953.
5. Берлянд М. Е. Предсказание и регулирование теплового режима приземного слоя атмосферы. Гидрометеониздат, Л., 1956.
6. Гальперин Б. М. К методике приближенных расчетов сумм солнечной радиации. Метеорология и гидрология, № 4, 1949.

## РАССЕЯННАЯ И СУММАРНАЯ СОЛНЕЧНАЯ РАДИАЦИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Проведено исследование влияния формы и количества облаков и состояния диска солнца на интенсивность рассеянной и суммарной солнечной радиации. Полученные результаты могут быть использованы для оценки прихода радиации при разных высотах солнца и различных метеорологических условиях.

Величины интенсивности солнечной радиации при различных метеорологических условиях необходимы для решения разных задач — при расчетах суточного хода составляющих теплового баланса деятельной поверхности, исследованиях трансформации воздушных масс, для оценки естественной освещенности и др. Однако накопившиеся материалы наблюдений еще не достаточно обработаны и обобщены. Имеющиеся в литературе данные по этому вопросу относятся преимущественно к облачности 10 баллов. Так, Н. С. Темниковой [8] по наблюдениям в Пятигорске получены средние значения рассеянной радиации при значительной облачности различных форм. Н. Н. Калитиным [6] по данным регистрации в Павловске были определены средние величины прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации при облачности 10 баллов для различных облаков. Аналогичные данные, но только для суммарной радиации по наблюдениям в обсерватории Блю-Хилл имеются у Б. Гаурвица [9]. Особенности суммарной и рассеянной радиации в Арктике при облачности 10 баллов рассмотрены Б. М. Гальперин [4]. Влияние количества облаков разных форм на интенсивность рассеянной радиации впервые было исследовано М. В. Гушиной [7], но вследствие неточности применявшегося в то время в Павловске пиранометра Н. Н. Калитина полученные ею величины являются заниженными. В последнее время аналогичные данные, но не по отдельным формам облаков, а в среднем по каждому из трех ярусов получены Е. П. Барашковой [1] по измерениям в Карадаге.

Задачей данной работы являлось исследование влияния формы, количества облаков и интенсивности сияния солнца на величины суммарной и рассеянной солнечной радиации. С этой целью были использованы результаты срочных измерений суммарной и рассеянной солнечной радиации за бесснежный период (апрель—октябрь) на следующих станциях: Воейково (1953—1959 гг.), Тарту (1953—1960 гг.), Рига (1953, 1955—1958, 1960 гг.) и Минск (1953—1960 гг.). Анализ, проведенный в процессе обработки данных, показал, что при одинаковых высоте солнца, форме, количестве облаков и интенсивности солнечного сияния

не обнаруживается различие в интенсивности радиации на разных станциях. Это позволило провести их объединение.

Обработка материалов велась графическим методом: для каждой формы и количества облаков и интенсивности сияния солнца ( $\odot^2$ ,  $\odot^\circ$ , II) по данным срочных измерений строились эмпирические графики зависимости суммарной и рассеянной радиации от высоты солнца. Так как визуальное определение количества облаков приближенное, то графики строились для следующих групп: 2—3, 4—5, 6—7, 8—9, 10 и 10 баллов. В связи с тем, что прозрачность атмосферы, вертикальная мощность облаков и их водность изменяются в течение года, графики  $Q_0 = f(h_\odot)$  для безоблачного неба строились по отдельным месяцам, а кривые  $Q = f(h_\odot)$  и  $D = f(h_\odot)$  при наличии облаков — по сезонам: весна (апрель—май), лето (июнь—август) и осень (сентябрь—октябрь).

Некоторые облака редко встречаются без сопутствующих других форм или наблюдаются преимущественно в определенном количестве. Так, например, Ac и Sc без «примеси» других облаков встречаются чаще всего при значительной облачности, поэтому при облачности, меньшей 8—9 баллов, для получения значений рассеянной и суммарной радиации при «волнистых» облаках наблюдения при Ac и Sc были объединены.

При значительной конвективной облачности (8—9 и 10 баллов) преобладают Cb, при меньшей — Cu. Обычно Cb сопровождаются другими облачными формами: при облачности 6—7 и 8—9 баллов чаще всего встречаются сочетания Cb с Cu, а при небольших высотах солнца — преимущественно с Sc.

[При облачности 10 и 10 баллов отдельно рассматривались две группы: Cb преобладают (Cb; Cb, Frnb; Cb, Cu; Cb, Sc; Cb, Ac) и Cb не преобладают (Sc, Cb; Cu, Cb; Ac, Cb).

Кроме основных облачных форм, рассматривались также некоторые наиболее часто встречающиеся сочетания облаков нижнего и среднего ярусов.

В работе принимала участие Х. Уразаева.

1. Рассеянная радиация. В табл. 1 приведены средние за бес-снежный период величины интенсивности рассеянной солнечной радиации при различных условиях через  $5^\circ$  высоты солнца. Скобки, которые поставлены при отметке интенсивности солнечного сияния, означают, что для некоторых интервалов высоты солнца значения приближенные.

Сравнение средних величин рассеянной радиации за отдельные сезоны показало, что лишь при St, Ns и тумане ( $\equiv$ ) можно обнаружить изменения ее от сезона к сезону. При St и Ns наблюдается уменьшение рассеянной радиации от весны к лету, что, очевидно, обусловлено увеличением плотности облачного покрова в связи с увеличением его вертикальной мощности и водности. Осенью при St рассеянная радиация минимальная, а при Ns такая же, как и летом. Наоборот, при тумане летом рассеянная радиация больше, чем в другие сезоны. Можно предполагать, что это обусловлено меньшей вертикальной протяженностью летней ночной инверсии по сравнению с другими сезонами [3], а также более быстрым утренним прогреванием более сухой почвы. Туманы наблюдаются преимущественно до высоты солнца  $25\text{--}30^\circ$ .

В табл. 2 приведены поправочные коэффициенты, на которые нужно умножить данные табл. 1 при  $h_\odot > 10^\circ$ , чтобы получить сезонные характеристики St, Ns и тумана.

Необходимо отметить, что вследствие колебаний вертикальной мощности и микроструктуры облаков одной и той же формы, их распределения по небу и относительно солнца, а при малой облачности и в связи с

Таблица 1

Средние величины рассеянной солнечной радиации (кал/см<sup>2</sup> мин.) при различных условиях

| Облачность |                   | Сияние                         | $h^{\circ}$  |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |              |  |
|------------|-------------------|--------------------------------|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|--|
| баллы      | форма             |                                | 5            | 10                   | 15                   | 20                   | 25                   | 30                   | 35                   | 40                   | 45                   | 50                   | 55           |  |
| 2—3        | Cl и Cl, Cs       | ☉ <sup>9</sup><br>☉            | 0,04<br>0,03 | 0,07<br>0,07         | 0,10<br>0,10         | 0,11<br>0,12         | 0,12<br>0,14         | 0,12<br>0,16         | 0,13<br>0,17         | 0,15<br>0,19         | 0,16<br>0,20         | 0,18<br>0,21         | 0,19         |  |
|            | Ac и Sc           | ☉ <sup>2</sup><br>(☉)          | —            | 0,07<br>0,07         | 0,10<br>0,10         | 0,13<br>0,13         | 0,16<br>0,16         | 0,17<br>0,19         | 0,18<br>0,21         | 0,19<br>0,24         | 0,20<br>0,27         | 0,20                 |              |  |
|            | Cu                | ☉ <sup>2</sup><br>(☉)          | 0,04         | 0,06<br>0,07         | 0,08<br>0,09         | 0,10<br>0,12         | 0,13<br>0,14         | 0,14<br>0,17         | 0,16<br>0,19         | 0,17<br>0,20         | 0,18<br>0,22         | 0,19<br>0,23         | 0,20<br>0,24 |  |
|            | Sc;<br>Ac и Cu    | (II)                           | 0,03         | 0,05                 | 0,08                 | 0,11                 | 0,13                 | 0,16                 |                      |                      |                      |                      |              |  |
| 4—5        | Cl и Cl, Cs       | ☉ <sup>2</sup><br>☉            | 0,05<br>0,04 | 0,07<br>0,08         | 0,10<br>0,10         | 0,11<br>0,12         | 0,13<br>0,14         | 0,14<br>0,16         | 0,16<br>0,18         | 0,17<br>0,19         | 0,18<br>0,20         | 0,19<br>0,21         | 0,20<br>0,22 |  |
|            | Ac и Sc           | (☉ <sup>2</sup> )<br>(☉)       | 0,03         | 0,09<br>0,07         | 0,11<br>0,10         | 0,15<br>0,14         | 0,18<br>0,18         | 0,21<br>0,21         | 0,24<br>0,24         | 0,28<br>0,28         | 0,29<br>0,31         | 0,30<br>0,34         | 0,31<br>0,37 |  |
|            | Cu                | ☉ <sup>2</sup><br>(☉)          |              | 0,07                 | 0,10<br>0,10         | 0,13<br>0,13         | 0,16<br>0,16         | 0,19<br>0,19         | 0,22<br>0,21         | 0,24<br>0,23         | 0,27<br>0,25         | 0,28<br>0,27         | 0,29<br>0,29 |  |
|            | Cu; Sc и<br>Ac    | (II)                           | 0,03         | 0,07                 | 0,11                 | 0,14                 | 0,17                 | 0,20                 | 0,22                 | 0,25                 | 0,28                 | 0,30                 | 0,31         |  |
| 6—7        | Cl и Cl, Cs       | (☉ <sup>2</sup> )<br>☉         | 0,04         | 0,06<br>0,08         | 0,08<br>0,11         | 0,11<br>0,13         | 0,13<br>0,16         | 0,16<br>0,18         | 0,17<br>0,21         | 0,18<br>0,23         | 0,19<br>0,25         | 0,20<br>0,26         | 0,21         |  |
|            | Ac и Sc           | (☉ <sup>2</sup> )<br>☉<br>(II) | —            | 0,08<br>0,10<br>0,09 | 0,12<br>0,14<br>0,13 | 0,17<br>0,18<br>0,17 | 0,21<br>0,22<br>0,21 | 0,25<br>0,28<br>0,24 | 0,28<br>0,31<br>0,27 | 0,30<br>0,34<br>0,29 | 0,32<br>0,36<br>0,31 | 0,33<br>0,39<br>0,32 | 0,41<br>0,33 |  |
|            | Cu                | ☉ <sup>2</sup><br>☉<br>(II)    |              |                      | 0,14                 | 0,17                 | 0,20                 | 0,23                 | 0,24                 | 0,27                 | 0,30                 | 0,32                 | 0,34         |  |
|            | Cb с Cu<br>или Sc | (☉)<br>(II)                    |              | 0,09<br>0,07         | 0,13<br>0,11         | 0,18<br>0,14         | 0,22<br>0,17         | 0,25<br>0,20         | 0,29<br>0,22         | 0,33<br>0,24         | 0,37<br>0,25         | 0,39<br>0,28         | 0,42<br>0,29 |  |
| 8—9        | Cl и Cl, Cs       | (☉ <sup>2</sup> )<br>☉         | 0,05         | 0,08<br>0,09         | 0,11<br>0,13         | 0,15<br>0,17         | 0,17<br>0,19         | 0,19<br>0,22         | 0,21<br>0,25         | 0,23<br>0,28         | 0,24<br>0,29         | 0,25<br>0,31         | *            |  |

| Облачность |                             | Сияние                   | $h^{\odot}$  |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
|------------|-----------------------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| баллы      | форма                       |                          | 5            | 10           | 15           | 20           | 25           | 30           | 35           | 40           | 45           | 50           | 55           |
| 10         | Ас и Sc                     | $(\odot^2)$<br>$(\odot)$ | 0,04         | 0,10<br>0,10 | 0,15<br>0,15 | 0,19<br>0,20 | 0,23<br>0,26 | 0,27<br>0,31 | 0,33<br>0,37 | 0,38<br>0,42 | 0,42<br>0,48 | 0,47<br>0,53 | 0,58         |
|            | Ас; Ас, Cu и<br>Ас, Sc      | П                        | 0,03         | 0,08         | 0,12         | 0,17         | 0,22         | 0,26         | 0,31         | 0,35         | 0,40         | 0,45         | 0,50         |
|            | Sc; Sc, Cu и<br>Sc, Ас      | (П)                      |              | 0,05         | 0,09         | 0,14         | 0,19         | 0,24         | 0,29         | 0,33         | 0,38         | 0,42         |              |
|            | Cu и Cu, Cb                 | $(\odot^2)$<br>$(\odot)$ | 0,05         | 0,08         | 0,12<br>0,14 | 0,16<br>0,18 | 0,20<br>0,24 | 0,24<br>0,30 | 0,28<br>0,35 | 0,31<br>0,39 | 0,34<br>0,42 | 0,38<br>0,44 | 0,41<br>0,45 |
|            | Cu                          | (П)                      |              |              |              |              |              | 0,22         | 0,26         | 0,30         | 0,34         | 0,38         | 0,40         |
|            | Cb с Cu<br>или Sc           | П                        | 0,03         | 0,05         | 0,09         | 0,13         | 0,17         | 0,21         | 0,25         | 0,28         | 0,32         | 0,34         | 0,36         |
|            | Cl и Cl, Cs                 | $(\odot)$<br>$(\odot)$   | 0,06<br>0,05 | 0,11<br>0,10 | 0,15<br>0,14 | 0,19<br>0,18 | 0,23<br>0,23 | 0,27<br>0,28 | 0,31<br>0,32 | 0,34<br>0,36 | 0,37<br>0,40 | 0,39<br>0,43 | 0,40<br>0,46 |
|            | Cs и Cs, Cl                 | $(\odot)$                | 0,05         | 0,11         | 0,17         | 0,23         | 0,30         | 0,36         | 0,42         | 0,48         | 0,54         | 0,60         | 0,67         |
|            | Ас, Cu и Sc Cu =<br>Ас и Sc | П                        | 0,02         | 0,06         | 0,10         | 0,15         | 0,21         | 0,26         | 0,32         | 0,37         | 0,42         | 0,47         | 0,52         |
|            | Ас = Sc                     | П                        |              | 0,04         | 0,09         | 0,14         | 0,19         | 0,24         | 0,29         | 0,34         | 0,39         | 0,44         | 0,48         |
| 10         | Sc, Cu и Sc, Ас             | П                        |              | 0,06         | 0,09         | 0,12         | 0,17         | 0,20         | 0,24         | 0,28         | 0,32         | 0,35         | 0,39         |
|            | Cb не преоблада-<br>ют      | П                        |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
|            | Cb преобладают              | (П)                      | 0,02         | 0,04         | 0,08         | 0,11         | 0,15         | 0,18         | 0,22         | 0,26         | 0,30         | 0,33         | 0,37         |
|            | Ас; Ас, Sc и<br>Ас, Cu      | (П)                      | 0,02         | 0,06         | 0,10         | 0,14         | 0,19         | 0,25         | 0,30         | 0,35         | 0,41         | 0,47         | 0,53         |
|            | Sc, Cu и Sc, Ас             | П                        | 0,02         | 0,04         | 0,07         | 0,10         | 0,14         | 0,18         | 0,22         | 0,25         | 0,28         | 0,30         | 0,31         |
|            | Cb не преоблада-<br>ют      | П                        | 0,03         | 0,05         | 0,09         | 0,12         | 0,16         | 0,19         | 0,21         | 0,24         | 0,27         | 0,29         | 0,32         |
|            | Cb преобладают              | П                        |              | 0,04         | 0,07         | 0,10         | 0,12         | 0,14         | 0,16         | 0,17         | 0,19         | 0,20         | 0,22         |
|            | Ас                          | (П)                      | 0,03         | 0,05         | 0,06         | 0,08         | 0,10         | 0,14         | 0,18         | 0,24         | 0,32         | 0,41         | 0,50         |
|            | Sc, Cu и Sc, Ас             | (П)                      | 0,03         | 0,05         | 0,08         | 0,11         | 0,14         | 0,16         | 0,18         | 0,20         | 0,22         | 0,24         | 0,26         |
|            | Cb не преоблада-<br>ют      | П                        | 0,02         | 0,04         | 0,06         | 0,08         | 0,10         | 0,12         | 0,14         | 0,16         | 0,18         | 0,20         | 0,22         |
| 10         | Ас                          | П                        | 0,01         | 0,03         | 0,05         | 0,06         | 0,08         | 0,09         | 0,11         | 0,12         | 0,14         | 0,15         | 0,16         |
|            | Ас                          | П                        |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |

с изменениями прозрачности атмосферы при неизменной высоте солнца и прочих равных условиях интенсивность рассеянной радиации может изменяться в значительных пределах.

Таблица 2

Поправочные коэффициенты для  
учета сезонных различий  
интенсивности рассеянной  
солнечной радиации

| Облака | Весна  | Лето   | Осень |
|--------|--------|--------|-------|
| St     | 1,30   | (0,95) | 0,80  |
| Ns     | 1,20   | 0,90   | 0,90  |
| —      | (0,90) | (1,40) | 0,90  |

Очевидно, из-за большей устойчивости в условиях освещения облаков при закрытом диске солнца интенсивность рассеянной радиации меньше, чем при наличии прямой солнечной радиации. При умеренном сиянии солнца ( $\odot$ ) амплитуда колебаний рассеянной радиации несколько больше, чем при сильном сиянии ( $\odot^2$ ); это различие наиболее заметно при прозрачных для прямой радиации облаках — Ci и меньше всего при Cu.

Максимальные по сравнению с другими формами колебания рассеянной радиации характерны для самых мощных облаков — конвективных. При наличии сияния солнца рассеянная радиация устойчивее всего при самых тонких облаках — Ci, но уже при значительной облачности (с 8—9 баллов), когда, как известно, вертикальная протяженность облаков верхнего яруса сильно возрастает, резко увеличиваются и колебания рассеянной радиации, приближаясь к наблюдаемым при Cu и Cb.

При отсутствии сияния солнца рассеянная радиация наиболее устойчива при самых тонких из непрозрачных для прямой радиации облаках — Ac. При облачности 10 и особенно 10 баллов очень велики изменения рассеянной радиации: при Sc почти такие же, как при Cb. Как известно, вертикальная мощность и микроструктура Sc могут меняться от значений, характерных для Ac, до величин, типичных для самых низких облаков — St.

С увеличением количества облаков в общем колебания рассеянной радиации увеличиваются. Но, несмотря на заметное различие в амплитудах колебаний рассеянной радиации при разных формах, количестве облаков и высотах солнца, относительные отклонения максимальных величин от средних при облачности менее 10 баллов варьируют мало. Как правило, при этих условиях относительные отклонения максимальных значений от средних не превышают 40—50%. Это обусловлено соответствующими изменениями самих средних величин радиации. Лишь при облачности 8—9 и 10 баллов Ci отклонения достигают до 60%, а при 10 Cb — в среднем до 80%. При сомкнутом покрове облаков (10/10) Cb, Sc, а также St и Ns в связи с уменьшением средних значений рассеянной радиации отклонения приближаются к 100%.

Зависимость  $D=f(h_{\odot})$  нелинейна, особенно при малой облачности, но с увеличением количества облаков приближается к линейной.

Когда солнечные лучи проходят сквозь тонкий облачный слой ( $\odot$ ), вследствие изменения индикатрисы рассеяния рассеянная радиация растет с увеличением высоты солнца быстрее, чем при открытом диске солнца, и зависимость  $D=f(h_{\odot})$  ближе к линейной; особенно отчетливо это заметно при Ac и Sc (табл. 1).

По этой же причине интенсивность рассеянной радиации при умеренном сиянии солнца оказывается больше, чем при сильном сиянии, особенно заметно при  $Ac$  и  $Sc$ , а также при  $Ci$ . При  $Ac$  такой эффект в среднем приблизительно равноценен увеличению облачности на 2 балла.

При закрытом диске солнца ( $\Pi$ ) рассеянная радиация мало отличается от наблюдаемой при отметке  $\odot^2$ .

Сопоставление рассеянной радиации при разных облаках, но при прочих равных условиях показывает, что при наличии прямой солнечной

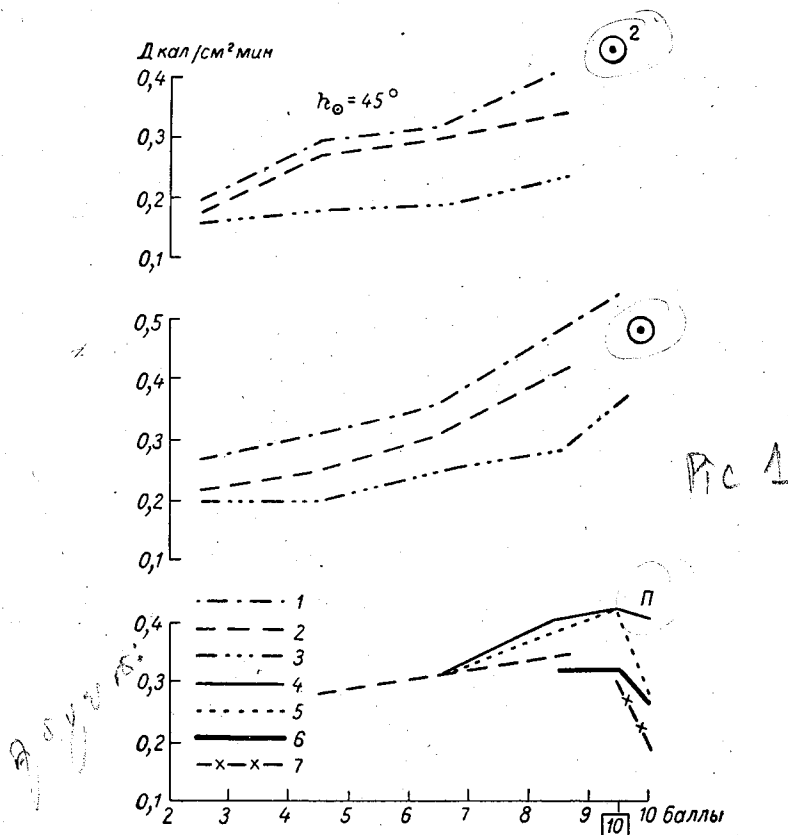


Рис. 1. Рассеянная солнечная радиация при различных условиях облачности и различном состоянии диска солнца.

1 —  $Ac$  и  $Sc$ , 2 —  $Ci$  и  $Cs$ , 3 —  $Ac$ , 4 —  $Sc$ , 5 —  $Cb$  не преобладают, 6 —  $Cb$  преобладают, 7 —  $Cb$  преобладают.

радиации ( $\odot^2$  и  $\odot$ ) максимальная рассеянная радиация наблюдается при облаках волнистой формы ( $Ac$  и  $Sc$ ), а наименьшая — при облаках верхнего яруса, причем при  $Cs$  она несколько больше, чем при  $Ci$ . Эти результаты совпадают с выводами других авторов. Конвективные облака в этом отношении занимают промежуточное положение, но при открытом диске солнца сравнительно мало отличаются от  $Ac$  и  $Sc$ . С увеличением количества облаков различие рассеянной радиации при разных облачных формах возрастает (рис. 1).

При закрытом диске солнца радиация при волнистых облаках также выше, чем при конвективных: максимальные величины при облачности 10 баллов этих форм характерны для наиболее тонких облаков ( $Ac$ ) и минимальные для самых мощных ( $Cb$ ) (рис. 1).

2 [ Из табл. 1 и особенно наглядно из рис. 1 можно видеть, что различие между рассеянной радиацией при As и Sc возникает лишь при сомкнутом облачном покрове, когда Sc по своим свойствам в ряде случаев приближаются к St. Как показывают данные наблюдений, это различие в средних величинах возникает именно за счет минимальных значений, максимальные же значения рассеянной радиации при As и Sc совпадают.

Из данных табл. 1 можно также видеть, что при облачности 10 баллов (без просветов) рассеянная радиация при слоистообразных облаках меньше, чем при других облачных формах того же яруса. Так, при St и особенно Ns рассеянная радиация гораздо меньше, чем при Sc и даже Cb, причем это различие в средних величинах обусловлено более низкими максимальными значениями. Лишь при тумане при малых высотах солнца рассеянная радиация больше, чем при Sc op. и Cb. При As op. рассеянная радиация значительно ниже, чем при As op., а при небольших высотах солнца меньше наблюдаемой при Sc и тумане.

Полученные результаты убедительно показывают, что нельзя при изучении рассеянной радиации объединять облака одного яруса, различные по своей форме и вертикальной мощности, и что по своему влиянию на интенсивность рассеянной радиации облака среднего яруса мало отличаются от изоморфных с ними облаков нижнего яруса. Эти результаты полностью подтверждают выводы, полученные нами ранее [5] на основании анализа соотношений действительных суточных сумм радиации и возможных при различных облаках.

Исследуя вопрос о влиянии количества облаков на рассеянную радиацию, можно прийти к выводу, что при любых облачных формах и интенсивности сияния солнца увеличение балла облачности до отметки 10 ведет к непрерывному возрастанию рассеянной радиации (рис. 1). Лишь при наиболее мощных облаках (Cb) увеличение облачности от 8—9 до 10 баллов не вызывает возрастания рассеянной радиации. При исчезновении просветов в облаках (отметка 10) рассеянная радиация уменьшается, особенно сильно при Sc и Cb (преобл.).

Если при Cb это обусловлено резким ухудшением освещенности облаков прямой солнечной радиацией, то при Sc, очевидно, основную роль играет уже упоминавшееся различие в вертикальной мощности и высоте Sc trans. и Sc op.

По имеющимся литературным данным [1, 10] непрерывное возрастание рассеянной радиации с увеличением количества облаков характерно лишь для облаков верхнего яруса, при облаках других ярусов максимальные величины рассеянной радиации относятся к облачности 8 баллов. Такое противоречие наших результатов с выводами других авторов обусловлено тем, что обычно проводили обработку наблюдений не по отдельным формам облаков, а в среднем по ярусам. Так как конвективные и особенно слоистообразные облака дают более низкие значения рассеянной радиации, чем волнистые, то такое осреднение приводило к снижению средних величин радиации при значительной облачности. Кроме того, наблюдения при облачности 10 и 10 рассматривались вместе.

Как показывают данные табл. 1, самые высокие и самые низкие значения рассеянной солнечной радиации наблюдаются при облачности 10 баллов: максимальные при ☉ 10 As и Sc, а минимальные при Ns.

Остановливаясь на некоторых частных вопросах, вытекающих из данных табл. 1, можно, например, указать, что при отметке 10 П рассеянная радиация при сочетаниях Sc, Cu и As, Cu в среднем меньше, чем при одних Sc или As, что обусловлено большей плотностью двухслойной

облачности. Наоборот, при отметке облачности 10 баллов (без просветов) при таких сочетаниях рассеянная радиация больше, чем при Sc; это, по-видимому, объясняется тем, что Си могут наблюдаться под слоем Sc лишь при большей высоте оснований и, следовательно, меньшей вертикальной мощности последних.

Можно также отметить, что при облачности, меньшей 6—7 баллов, отдельные наблюдения при наличии Сб (обычно Си, Сб) дают значения рассеянной радиации, мало отличающиеся от наблюдаемой при Си; но уже с 6—7 баллов рассеянная радиация при солнце, закрытом Сб, меньше, чем при менее плотных облаках Си (см. табл. 1). Наоборот, при наличии сияния солнца рассеянная радиация при Сб больше, чем при Си, что, вероятно, связано с кристаллической структурой вершин Сб. При Сб поэтому получаются наиболее резкие изменения рассеянной радиации при переходе от отметки ☉ к отметке П.

Вследствие разной методики обработки трудно провести сопоставление величин рассеянной радиации, полученных нами, с результатами других авторов. В табл. 3 приведены средние значения рассеянной радиации при облачности 10 баллов для некоторых облаков по данным пиранометра Янишевского в Павловске (Н. Н. Калитин) и в Карадаге (Е. П. Барашкова).

В работах Е. П. Барашковой [1, 2] не указано, к какому виду относятся данные по As и Sc (opacus или translucidus). Из работы Н. Н. Калитина [6] можно сделать вывод, что при As была прямая радиация, а при Sc ее не было, поэтому в табл. 3 для As мы приводим значение рассеянной радиации, полученное с учетом отметок 10 и 10 П и 10 ☉, а для Sc — с учетом отметок 10 и 10 П.

Таблица 3  
Рассеянной солнечной радиации (кал/см<sup>2</sup> мин.) при облачности  
Н. Н. Калитина (К), Е. П. Барашковой (Б), Б. М. Гальперин  
и Л. П. Серяковой (ГС)

|   | 20°  |      |      | 30°  |      |      | 40°  |      |      | 50°  |      |      |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|   | К    | Б    | ГС   | К    | Б    | ГС   | К    | Б    | ГС   | К    | Б    | ГС   |
| 1 | 0,16 | —    | 0,19 | 0,22 | —    | 0,27 | 0,26 | —    | 0,34 | 0,29 | —    | 0,39 |
| 3 | 0,19 | 0,19 | 0,18 | 0,27 | 0,27 | 0,28 | 0,34 | 0,34 | 0,36 | 0,40 | 0,38 | 0,43 |
| 8 | 0,22 | 0,22 | 0,17 | 0,31 | 0,32 | 0,29 | 0,39 | 0,40 | 0,40 | 0,44 | 0,56 | 0,51 |
| 5 | 0,17 | —    | 0,08 | 0,24 | —    | 0,14 | 0,30 | —    | 0,24 | 0,35 | —    | —    |
| 4 | 0,13 | 0,15 | 0,11 | 0,20 | 0,21 | 0,20 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,33 | 0,36 | 0,34 |
| 4 | 0,08 | 0,14 | 0,08 | 0,13 | 0,20 | 0,12 | 0,16 | 0,33 | 0,16 | 0,19 | 0,52 | 0,20 |

Можно видеть, что в большинстве случаев полученные нами величины близки к результатам других авторов. Некоторые расхождения могут быть вызваны различной методикой их определения. Так, например, более высокие величины рассеянной радиации для Si и в меньшей мере для Cs по нашим данным обусловлены, очевидно, тем, что они относятся только к отметке ☉; кроме того, наблюдения при Si и Cs объединены. Повышенные значения для St, приведенные в работе Е. П. Барашковой, вряд ли связаны только с климатическими особенностями приморского пункта — Карадага; обращает на себя внимание незакономерность их изменения с высотой солнца. Различие между значениями рассеянной радиации, полученными нами и Н. Н. Калитиным для As, обусловлено тем, что они относятся к различным видам: у нас — к виду opacus, а у Н. Н. Калитина — к translucidus.

Средние величины суммарной солнечной радиации (кал/см<sup>2</sup> мин.) при различных условиях

| Облака |             | $h_{\odot}$       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|--------|-------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| Баллы  | форма       | Сияние            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|        |             |                   | 5    | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   | 35   | 40   | 45   | 50   | 55   |  |
| 0/0    | —           | $\odot^2$         | 0,07 | 0,18 | 0,31 | 0,43 | 0,55 | 0,66 | 0,79 | 0,90 | 1,01 | 1,11 | 1,20 |  |
| 2—3    | Cl и Cl, Cs | $\odot^2$         | 0,07 | 0,17 | 0,30 | 0,42 | 0,55 | 0,68 | 0,80 | 0,90 | 1,00 | 1,10 | 1,18 |  |
|        |             | $\odot$           | 0,05 | 0,14 | 0,27 | 0,40 | 0,52 | 0,65 | 0,77 | 0,88 | 0,98 | 1,06 |      |  |
|        | Ac и Sc     | $\odot^2$         | 0,06 | 0,17 | 0,29 | 0,40 | 0,53 | 0,65 | 0,76 | 0,88 | 1,00 | 1,11 | 1,23 |  |
|        |             | $\odot$           | 0,06 | 0,16 | 0,28 | 0,39 | 0,51 | 0,63 | 0,74 | 0,86 | 0,97 |      |      |  |
|        | Cu          | $\odot^2$         |      | 0,16 | 0,29 | 0,42 | 0,55 | 0,67 | 0,80 | 0,93 | 1,03 | 1,14 | 1,24 |  |
|        |             | $(\odot)$         |      | 0,16 | 0,29 | 0,42 | 0,54 | 0,66 | 0,79 | 0,92 | 1,02 | 1,11 | 1,20 |  |
| 4—5    | Cl и Cl, Cs | $\odot^2$         |      | 0,17 | 0,29 | 0,42 | 0,55 | 0,67 | 0,78 | 0,89 | 1,00 | 1,10 | 1,20 |  |
|        |             | $\odot$           | 0,06 | 0,16 | 0,28 | 0,40 | 0,52 | 0,64 | 0,76 | 0,87 | 0,98 | 1,08 | 1,18 |  |
|        | Ac и Sc     | $\odot^2$         | 0,07 | 0,18 | 0,32 | 0,44 | 0,56 | 0,69 | 0,82 | 0,95 | 1,08 | 1,18 | 1,24 |  |
|        |             | $(\odot)$         | 0,07 | 0,18 | 0,30 | 0,42 | 0,54 | 0,66 | 0,78 | 0,90 | 1,02 | 1,13 |      |  |
|        | Cu          | $\odot^2$         |      | 0,19 | 0,31 | 0,44 | 0,56 | 0,69 | 0,82 | 0,96 | 1,09 | 1,21 | 1,30 |  |
|        |             | $\odot$           |      | 0,18 | 0,30 | 0,43 | 0,55 | 0,69 | 0,82 | 0,94 | 1,06 | 1,16 | 1,26 |  |
|        | Cu; Ac и Sc | $(\odot^{\circ})$ |      |      | 0,13 | 0,17 | 0,21 | 0,24 | 0,28 | 0,31 | 0,35 | 0,39 | 0,43 |  |
| 6—7    | Cl и Cl, Cs | $(\odot^2)$       |      | 0,17 | 0,29 | 0,43 | 0,55 | 0,68 | 0,80 | 0,91 | 1,02 | 1,12 | 1,21 |  |
|        |             | $\odot$           | 0,06 | 0,15 | 0,26 | 0,37 | 0,48 | 0,60 | 0,71 | 0,83 | 0,94 | 1,05 | 1,17 |  |
|        | Ac и Sc     | $(\odot^2)$       | 0,07 | 0,20 | 0,32 | 0,45 | 0,58 | 0,70 | 0,82 | 0,95 | 1,08 | 1,20 | 1,32 |  |
|        |             | $\odot$           |      | 0,20 | 0,32 | 0,43 | 0,55 | 0,67 | 0,79 | 0,90 | 1,02 | 1,14 | 1,26 |  |
|        | Cu и Cu, Cb | $(\odot^{\circ})$ |      | 0,12 | 0,17 | 0,23 | 0,28 | 0,33 | 0,38 | 0,43 | 0,48 |      |      |  |
|        |             | $\odot$           |      | 0,19 | 0,31 | 0,44 | 0,58 | 0,73 | 0,87 | 1,01 | 1,14 | 1,25 | 1,34 |  |
|        |             | $(\odot)$         |      | 0,17 | 0,30 | 0,43 | 0,56 | 0,70 | 0,83 | 0,96 | 1,10 | 1,21 | 1,30 |  |
|        |             | $(\odot^{\circ})$ |      | 0,12 | 0,16 | 0,20 | 0,24 | 0,28 | 0,32 | 0,36 | 0,40 | 0,44 | 0,48 |  |

| Облака |                                   | Сияние                                              | $h^{\circ}$  |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
|--------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| баллы  | форма                             |                                                     | 5            | 10                   | 15                   | 20                   | 25                   | 30                   | 35                   | 40                   | 45                   | 50                   | 55                   |
| 8—9    | Cl и Cl, Cs                       | ( $\odot^2$ )<br>( $\odot$ )<br>( $\odot^{\circ}$ ) | 0,07         | 0,18<br>0,16         | 0,30<br>0,26<br>0,13 | 0,42<br>0,39<br>0,18 | 0,54<br>0,51<br>0,25 | 0,66<br>0,63<br>0,31 | 0,78<br>0,74<br>0,38 | 0,90<br>0,85<br>0,45 | 1,02<br>0,94<br>0,52 | 1,14<br>1,04         | 1,26<br>1,13         |
|        | Ac и Sc                           | ( $\odot^2$ )<br>( $\odot$ )<br>( $\odot^{\circ}$ ) | 0,07         | 0,20<br>0,17<br>0,10 | 0,35<br>0,27<br>0,16 | 0,50<br>0,39<br>0,21 | 0,65<br>0,41<br>0,27 | 0,80<br>0,64<br>0,33 | 0,94<br>0,76<br>0,39 | 1,10<br>0,89<br>0,45 | 1,25<br>1,02<br>0,50 | 1,36<br>1,14<br>0,56 | 1,44<br>1,27<br>0,62 |
|        | Cu и Cu, Cb<br>Cu<br>Cb с Cu и Sc | ( $\odot^2$ )<br>( $\odot$ )<br>$\odot^{\circ}$     |              |                      |                      | 0,20                 | 0,66<br>0,24         | 0,78<br>0,29         | 0,90<br>0,33         | 1,05<br>1,03<br>0,38 | 1,20<br>1,17<br>0,42 | 1,32<br>1,29<br>0,47 | 1,42<br>1,42<br>0,51 |
| 10     | Cl и Cl, Cs                       | $\odot$                                             | 0,06         | 0,15                 | 0,25                 | 0,35                 | 0,46                 | 0,56                 | 0,66                 | 0,77                 | 0,86                 | 0,94                 | 0,98                 |
| 10     | Cs и Cs, Cs                       | ( $\odot$ )<br>( $\odot^{\circ}$ )                  | 0,06<br>0,04 | 0,14<br>0,09         | 0,24<br>0,16         | 0,34<br>0,22         | 0,45<br>0,28         | 0,55<br>0,34         | 0,66<br>0,41         | 0,74<br>0,47         | 0,79                 | 0,84                 | 0,88                 |
| 10     | Ac и Sc                           | ( $\odot$ )                                         | 0,06         | 0,16                 | 0,27                 | 0,38                 | 0,48                 | 0,59                 | 0,69                 | 0,80                 | 0,93                 | 1,04                 |                      |
| 10     | Cb с Cu и Sc                      | $\odot^{\circ}$                                     |              | 0,10                 | 0,15                 | 0,21                 | 0,27                 | 0,32                 | 0,38                 | 0,43                 | 0,48                 | 0,53                 | 0,58                 |
| 10     | Ac, Ac, Cu                        | ( $\odot^{\circ}$ )                                 |              |                      |                      | 0,19                 | 0,28                 | 0,37                 | 0,45                 | 0,53                 | 0,60                 | 0,67                 |                      |
| 10     | Sc и Sc, Cu                       | ( $\odot^{\circ}$ )                                 |              |                      |                      | 0,19                 | 0,24                 | 0,29                 | 0,35                 | 0,42                 | 0,49                 | 0,55                 |                      |

2. Суммарная солнечная радиация. В табл. 4 приведены средние за бесснежный период значения суммарной солнечной радиации при безоблачном небе  $Q_0$  при различной облачности и разной интенсивности сияния солнца. Как видно из рис. 2, заметные временные изменения  $Q_0$ , обусловленные соответствующими изменениями прозрачности атмосферы, происходят лишь при переходе от сезона к сезону, в течение же трех летних месяцев средние месячные величины  $Q_0$  достаточно постоянны. В июле  $Q_0$  составляет 97% средней за бесснежный период величины, а в апреле и октябре — соответственно 106 и 103%. Эти изменения прозрачности атмосферы являются также причиной того, что при небольшой облачности (2—3 и 4—5 баллов) средние летние значения суммарной радиации при отметках  $\odot^2$  и  $\odot$  меньше весенне-летних.

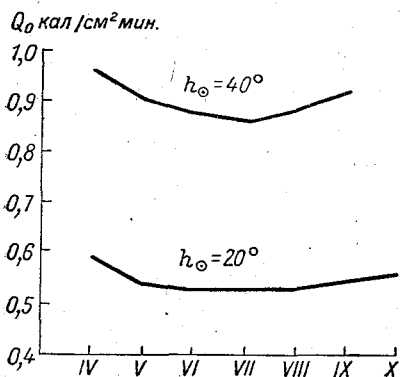


Рис. 2. Изменение средних величин суммарной солнечной радиации при безоблачном небе  $Q_0$  от месяца к месяцу.

Так как летом число наблюдений при такой облачности больше, чем в другие сезоны, то отличие летних величин от средних за весь период даже при больших высотах солнца, как правило, не превышает 0,02 кал/см² мин. Весенне-осенние значения суммарной радиации выше средних: при  $h_{\odot} = 30^{\circ}$  не более чем на 0,02—0,03, а при  $h_{\odot} = 50^{\circ}$  на 0,06—0,07 кал/см² мин.

Сопоставление эмпирических графиков  $D = f(h_{\odot})$  и  $Q = f(h_{\odot})$  показало, что не только при открытом диске солнца, но и при небольшой облачности даже при умеренном его сиянии колебания суммарной радиации при неизменной высоте солнца и прочих равных условиях обусловлены в основном изменениями рассеянной солнечной радиации.

Влияние изменений прямой радиации заметно проявляется уже при облачности 6—7 баллов ( $\odot$ ) при Си и Ас. При 8—9 баллах оно велико и при Си. Наиболее изменчива суммарная солнечная радиация при облачности 10 баллов верхнего яруса. При отметке  $\odot^{\circ}$  колебания радиации значительно меньше, чем при отметках  $\odot^2$  и  $\odot$ .

Так как средние значения суммарной радиации при умеренном и сильном сиянии солнца гораздо выше, чем рассеянной радиации, то относительные величины колебаний меньше. Так, при облачности до 8 баллов отклонения максимальных значений от средних не превышают 15%, при 8—9 баллах — 30% и при 10 баллах Си и Сс — 40%.

Как при безоблачном небе, так и при наличии облаков зависимость  $Q = f(h_{\odot})$  в интервале  $8^{\circ} < h_{\odot} < 50^{\circ}$  является линейной. При  $h_{\odot} > 50^{\circ}$  происходит более замедленное возрастание суммарной радиации с увеличением высоты солнца.

Вследствие ослабления прямой солнечной радиации приход суммарной радиации при умеренном солнечном сиянии меньше, чем при сильном, но за счет возрастания рассеянной радиации снижение средних величин  $Q$  сравнительно невелико, особенно для Си, при которых менее всего заметно увеличение рассеянной радиации. По-видимому, это обусловлено тем, что плотные облака и отметка  $\odot$  ставится тогда, когда лишь край облака коснется диска солнца. Действительно, прямая солнечная радиация при отметке ( $\odot$ ) при Си больше, чем при других облаках.

При переходе от умеренного к слабому сиянию солнца происходит резкое снижение средних величин суммарной радиации: дальнейшее уменьшение прихода солнечной радиации, наступающее при полном экранировании диска солнца, уже невелико (рис. 3).

Сопоставляя значения суммарной радиации при разных облаках, можно прийти к выводу, что в соответствии с результатами, полученными для рассеянной радиации, при умеренном и сильном сиянии солнца

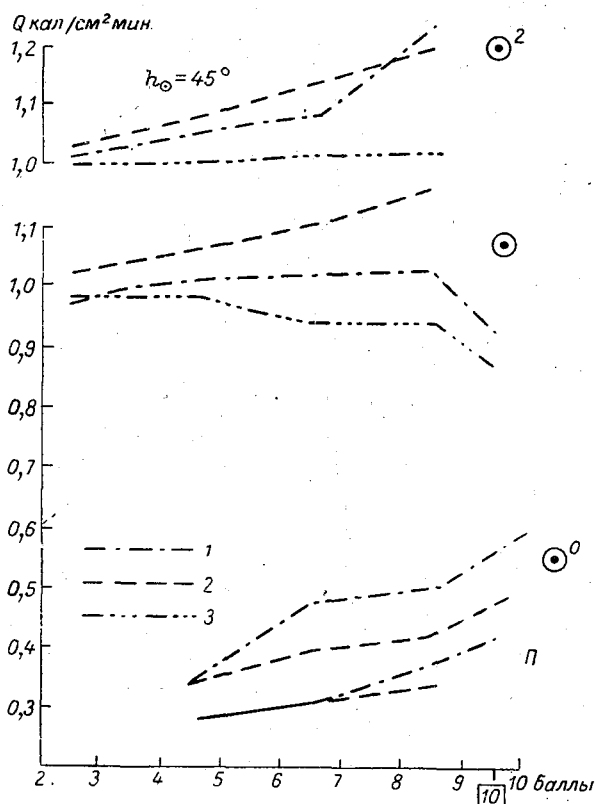


Рис. 3. Суммарная солнечная радиация при различных условиях облачности и различном состоянии диска солнца.

1 —  $\text{Ac}$  и  $\text{Sc}$ , 2 —  $\text{Cu}$ , 3 —  $\text{Ci}$  и  $\text{Cs}$ .

минимальные величины характерны для  $\text{Ci}$ . Вследствие большего ослабления прямой радиации суммарная радиация при отметке  $\odot$   $\text{Ac}$  ( $\text{Sc}$ ) меньше, чем при  $\text{Cu}$  (рис. 3).

Трудно объяснить, чем обусловлено то, что и при открытом солнечном диске суммарная радиация при  $\text{Cu}$  больше, чем при  $\text{Ac}$ , хотя рассеянная, наоборот, меньше. Лишь при малых высотах солнца получается обратное соотношение, но различие невелико. Можно предположить, что в дни с подынверсионной облачностью ( $\text{Ac}$ ,  $\text{Sc}$ ) несколько понижена прозрачность атмосферы. При слабом сиянии солнца, когда основную роль играет рассеянная радиация, суммарная радиация при волнистых облаках больше, чем при конвективных.

Рассматривая вопрос о влиянии количества облаков на суммарную солнечную радиацию, можно видеть, что в соответствии с ростом рассеянной радиации суммарная солнечная радиация при сильном сиянии солнца растет с возрастанием балла облачности. Но при облаках верхнего яруса это возрастание происходит заметно слабее, чем рассеянной

радиации. Причиной этого может быть уменьшение прозрачности слоя атмосферы над фронтальной поверхностью при ее снижении.

При умеренном сиянии солнца непрерывный рост суммарной радиации с увеличением количества облаков (при прочих равных условиях) наблюдается только при  $Cu$ . При  $Ac$  ( $Sc$ ) небольшое возрастание суммарной радиации с увеличением облачности происходит при  $h_{\odot} \leq 40^\circ$  до 6—7 баллов, а затем наблюдается ее уменьшение. При  $h_{\odot} > 40^\circ$  понижение радиации начинается с 8—9 баллов, что, очевидно, обусловлено меньшим ослаблением прямой солнечной радиации в облачном слое при больших высотах солнца.

При облаках верхнего яруса при всех высотах солнца уже при облачности 6—7 баллов радиация меньше, чем при 4—5 баллах, но наиболее заметное ее снижение происходит при переходе от 8—9 к 10 баллам. При слабом сиянии солнца преобладает рассеянная радиация и увеличение количества облаков приводит к возрастанию суммарной радиации.

Данные табл. 4 и рис. 3 показывают, что при открытом диске солнца и значительной облачности  $Cu$  или  $Ac$  ( $Sc$ ) суммарная радиация может почти на 20% превосходить радиацию при безоблачном небе.

При кучевых облаках даже при умеренном сиянии солнца суммарная радиация больше, чем при безоблачном небе. При  $Ac$  ( $Sc$ ) лишь при облачности 6—7 баллов  $Q = Q_0$ , а при  $Ci$  и  $Cs$  при любом количестве облаков при отметке  $\odot Q < Q_0$ , однако и при облачности 10 баллов при таких условиях приход радиации при  $Ac$  ( $Sc$ )  $\odot$  составляет в среднем 91%, а при  $Ci$  и  $Cs$  — 84% радиации при безоблачном небе.

Поскольку наблюдения при разной интенсивности солнца рассматривались в отдельности, возможность сравнения данных табл. 4 с результатами других авторов очень ограничена. Простое осреднение значений, полученных при разных отметках о состоянии диска солнца, не отразит средних реальных условий, так как повторяемость этих отметок различна. Можно лишь указать, что величины суммарной радиации при безоблачном небе, полученные нами, очень близки к средним значениям  $Q_0$ , найденным Е. П. Барашковой по данным наблюдений на многих станциях СССР [2]; значения  $Q_0$ , приводимые в работе Н. Н. Калинина [6], превышают их, особенно при больших высотах солнца. Это же относится и к значениям суммарной радиации при  $Ci$  при  $h_{\odot} > 30^\circ$ ; при меньших высотах солнца получается обратное соотношение. Очевидно, последним обусловлена отмечавшаяся нами ранее [5] слишком большая зависимость  $\frac{Q_{10}}{Q_0}$  от высоты солнца для облаков верхнего яруса, по Калинину.

Представляло интерес на основании результатов данной работы выяснить, насколько вообще велика зависимость  $\frac{Q_{10}}{Q_0}$  от высоты солнца при разных условиях. Этот вопрос имеет самостоятельный интерес, поскольку  $\frac{Q_{10}}{Q_0}$  используется и при расчетах сумм солнечной радиации.

Из данных табл. 5 можно видеть, что при одинаковой отметке  $\odot$  величины  $\frac{Q_{10}}{Q_0}$  при облаках верхнего яруса не обнаруживают какой-либо определенной зависимости от высоты солнца. Это не противоречит выводам Б. Гаурвица [9] о том, что при  $Ci$  и  $Cs$   $\frac{Q_{10}}{Q_0}$  возрастает с увеличением высоты солнца; наблюдения при отметках  $\odot$  и  $\odot^\circ$  им не разделялись, при малых же высотах солнца повторяемость последних увеличивается.

Значения  $\frac{Q_{10}}{Q_0}$  % при различных облаках и различном состоянии диска солнца

| Облака |                | Сияние | $h^\circ_\odot$ |    |    |    |    |    |    |
|--------|----------------|--------|-----------------|----|----|----|----|----|----|
| балл   | форма          |        | 5               | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| 10     | Ci и Ci, Cs    | ☉      | 86              | 83 | 80 | 81 | 87 | 85 | 85 |
| 10     | Cs и Cs, Ci    | ☉      | 86              | 78 | 77 | 79 | 83 | 82 | 76 |
| 10     | Ac и Sc        | ☉      | 86              | 89 | 87 | 88 | 89 | 89 | 93 |
|        | Cs и Ci        | ☉      | —               | 50 | 51 | 51 | 52 | 52 | —  |
|        | Ac и Ac, Cu    | ☉      | —               | —  | —  | 49 | 56 | 59 | 60 |
|        | Sc и Sc, Cu    | ☉      | —               | —  | —  | 43 | 44 | 47 | 49 |
|        | Ac = Sc        | ☉      | 43              | 33 | 32 | 35 | 39 | 41 | 42 |
|        | Sc             | ☉      | 43              | 22 | 23 | 23 | 27 | 28 | 27 |
|        | St             | ☉      | 29              | 22 | 19 | 19 | 18 | 18 | 18 |
|        | Ns             | ☉      | 14              | 17 | 16 | 14 | 14 | 13 | 14 |
|        | Cb преобладают | ☉      | —               | 22 | 23 | 23 | 21 | 20 | 19 |
|        | ≡              | (☉)    | 43              | 28 | 26 | 26 | 24 |    |    |

Сравнительно мала зависимость  $\frac{Q_{10}}{Q_0}$  от высоты солнца и при отсутствии прямой солнечной радиации (П). При наиболее плотных облаках происходит даже уменьшение  $\frac{Q_{10}}{Q_0}$  с возрастанием высоты солнца. Этот же эффект получается и по данным Калитина для St(Ns+St), а также Б. Гаурвица для Ns и тумана.

Небольшой рост  $\frac{Q_{10}}{Q_0}$  с возрастанием высоты солнца получается при волнистых облаках (Ac и Sc) как при слабом сиянии солнца, так и при его отсутствии. Возможно, что это обусловлено улучшением освещения краев отдельных облачных элементов при возрастании высоты солнца, что увеличивает рассеянную радиацию. Такой же результат можно обнаружить при анализе данных Н. Н. Калитина и Б. Гаурвица.

Полученные в данной работе величины могут быть использованы для оценки интенсивности суммарной и рассеянной радиации в бесснежный период при различных метеорологических условиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Барашкова Е. П. Рассеянная радиация в Карадаге. Труды ГГО, вып. 80, 1959.
2. Барашкова Е. П., Гаевский В. Л., Пивоварова З. И. и др. Радиационный режим территории СССР. Гидрометеиздат, Л., 1961.
3. Воронцов П. А. Величины вертикального температурного градиента в пограничном слое атмосферы над некоторыми подстилающими поверхностями. Труды ГГО, вып. 63, 1956.
4. Гальперин Б. М. О суммарной и рассеянной радиации в Арктике. Труды ААНИИ, вып. 229, 1961.
5. Гальперин Б. М. Суточный приход суммарной солнечной радиации при различных облаках. Труды ГГО, вып. 125, 1962.
6. Калитин Н. Н. Суммарная радиация в Павловске. Труды ГГО, вып. 19, 1950.
7. Калитин Н. Н. Актинометрия. Гидрометеиздат, М., 1938.
8. Темникова Н. С. Рассеянная радиация небесного свода в связи с формами облаков. Метеорология и гидрология, № 5, 1941.
9. Naugwitz В. Insolation in relation to cloud tipe. Journal of Meteorology, v. 5, No 3, 1948.
10. Dirmhärn I. Untersuchungen über die Himmel-Strahlung in die Ostalpen. Archiv für Meteorologie, Geoph. und Bioklim. Ser B, B-2, H-4, 1951.

## ОБ ИЗМЕРЕНИИ РАДИАЦИОННОГО БАЛАНСА В МОРСКИХ УСЛОВИЯХ

Излагаются результаты исследования балансомеров с полиэтиленовыми покрытиями различных видов при различных метеорологических условиях. Рассмотрен ряд ошибок, имеющих место при измерении радиационного баланса в море.

Даются рекомендации для проведения наиболее точных измерений радиационного баланса в морских условиях.

При измерении радиационного баланса моря с больших судов возникает целый ряд значительных трудностей.

Во-первых, необходимо устранить влияние корпуса судна на показания балансомера. Для этого балансомер должен быть укреплен на конце стрелы, которая выносится с носовой части судна. При таком расположении стрелы с актинометрическими приборами влияние затенений кораблем, а также дополнительных подсветок на показания приборов будет наименьшим. Кроме того, при вынесении стрелы с носа корабля актинометрические приборы располагаются над водной поверхностью, не искаженной вследствие движения судна.

Как показывает численная оценка, ошибка в измерении радиационного баланса за счет влияния судна не превышает 5% в том случае, когда длина стрелы, на которой укрепляются актинометрические приборы, не меньше высоты носовой части судна [7].

Во-вторых, кроме обычного обдувания балансомера ветром, в результате килевой качки имеет место вертикальное обдувание балансомера, вызванное движением самого балансомера вверх и вниз относительно воздуха. В результате этого происходит неодинаковый обдув верхней и нижней поверхностей балансомера, который приводит к дополнительным ошибкам.

Кроме того, при работе в море приемные поверхности балансомера иногда забрызгиваются морской водой, на них отлагается осевшая соль, а, как известно, балансомер, смоченный хотя бы каплями воды, не дает правильных показаний.

Вследствие вертикального обдувания балансомера, а также забрызгивания его водой измерения радиационного баланса при помощи незащищенного балансомера в морских условиях становятся мало надежными. Поэтому в последнее время в практике морских актинометрических наблюдений балансомеры начали покрывать полиэтиленовой пленкой, которая устраняет влияние ветра и попадание на приемные поверхности балансомера капель морской воды.

В связи с этим возникла необходимость всестороннего исследования балансомеров с полиэтиленовыми покрытиями.

В данной статье излагаются результаты некоторых исследований, проведенных нами весной—летом 1962 г. в Карадагской актинометрической обсерватории.

На рис. 1 представлена кривая пропускания полиэтиленовой пленки толщиной 60 мк, полученная по измерениям Л. Б. Красильщикова в интервале от 1 до 15 мк. Как видно из рисунка, полиэтилен сильно поглощает радиацию в районе длин волн 3,5, 7,0 и 14 мк.

Однако следует заметить, что ширина указанных полос поглощения очень невелика. Во всех остальных спектральных интервалах полиэтиленовая пленка толщиной 60 мк пропускает около 90% радиации.

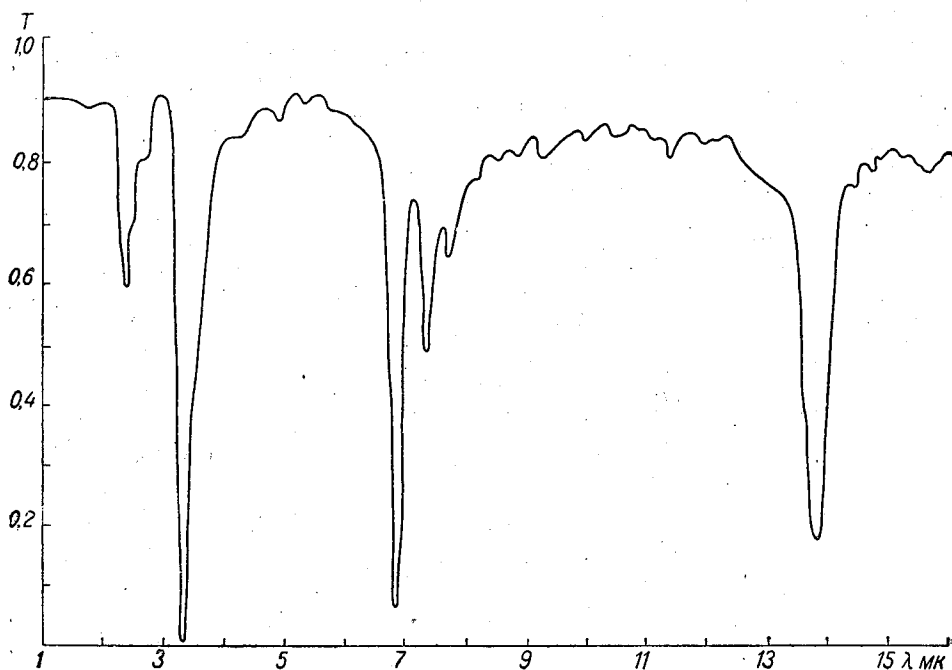


Рис. 1. Спектральная прозрачность полиэтиленовой пленки.

Данные измерений Л. Б. Красильщикова сравнивались с измерениями пропускания американского полиэтилена толщиной 0,1 мм [9]. В результате сравнения обнаружено очень хорошее соответствие кривых пропускания этих двух полиэтиленовых пленок. В 1961—1962 гг. нами было произведено сравнение показаний обычного балансомера I с показаниями балансомеров, покрытых различными видами полиэтиленовых покрытий. Балансомер II был покрыт плоской полиэтиленовой пленкой с зазором между приемной поверхностью балансомера и пленкой в 2 мм. Пленка натягивалась с помощью колец с обеих сторон балансомера в виде пялец. Кольца с полиэтиленовой пленкой крепились на балансомере специальными пластинчатыми зажимами. Балансомер III был покрыт пленкой на полусферическом проволоочном каркасе, балансомер IV — гофрированной пленкой, предварительно приготовленной из полиэтиленовой пленки с помощью специального формовочного пресса. Выпуклости и впадины были расположены концентрическими окружностями от центра к наружному кольцу; глубина впадины составляла около 4 мм.

Все четыре балансомера были укреплены на одной и той же стойке на высоте 1,5 м от земли. Под приборами была ровная, оголенная почва. Вся серия наблюдений по четырем балансомерам занимала около 5 мин. Направление и скорость ветра измерялись с помощью ветромера Третьякова. Обработка результатов наблюдений проводилась в соответствии с методикой, изложенной в [8]. Получено около 600 серий наблюдений при различных высотах солнца и различных метеорологических условиях. Наблюдения проводились как в дневное, так и в ночное время. Это позволило выяснить зависимость показаний балансомеров с различными видами полиэтиленовых покрытий от высоты солнца над горизонтом при ясной и пасмурной погоде.

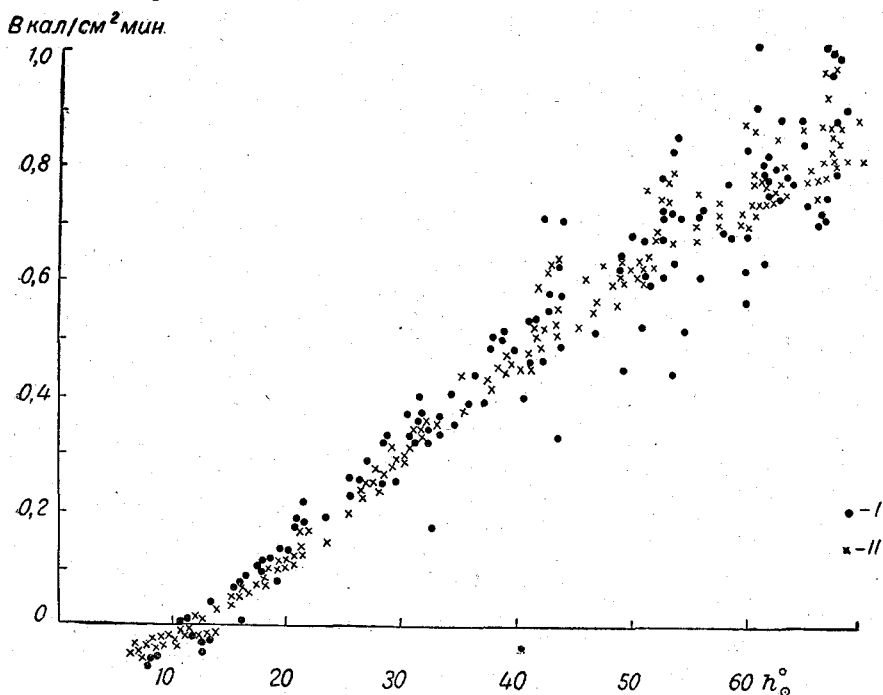


Рис. 2. Величины радиационного баланса, полученные с помощью обычного балансомера I и балансомера II, покрытого плоским полиэтиленовым фильтром.

На рис. 2 представлены результаты измерений радиационного баланса при различных высотах солнца в случае ясного и малооблачного неба, полученные с помощью обычного незащищенного балансомера I и балансомера, покрытого плоским полиэтиленовым фильтром II.

На рис. 3 представлены величины баланса, измеренные с помощью балансомеров I и II при различных  $h_{\odot}$  для отдельных дней (выбраны наиболее типичные случаи). Как видно из рисунка, в некоторых случаях величины баланса, измеренные балансомерами I и II, практически совпадают. Однако в ряде случаев при высотах солнца, меньших 30—40°, величины баланса, измеренные балансомером II, несколько меньше ( $\approx 10\%$ ) величин баланса, полученных по балансомеру I, что может быть объяснено увеличением отражения радиации от полиэтиленовой пленки при больших углах падения радиации. При  $h_{\odot} > 40^\circ$  наблюдается обратная картина: величины баланса, измеренные балансомером II, несколько больше величин баланса, измеренных открытым балансомером.

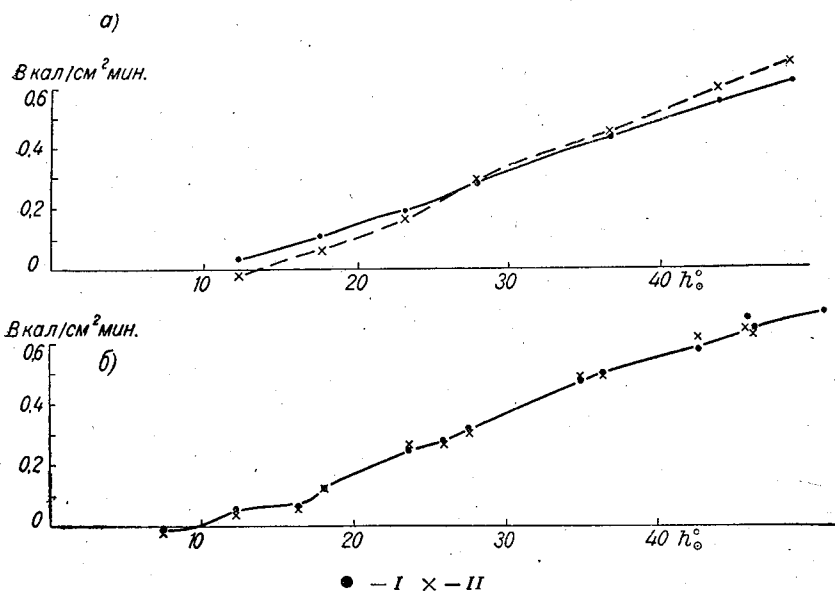


Рис. 3. Величины радиационного баланса, измеренные с помощью балансомеров I и II для 14 сентября (а) и 19 сентября (б) 1961 г.

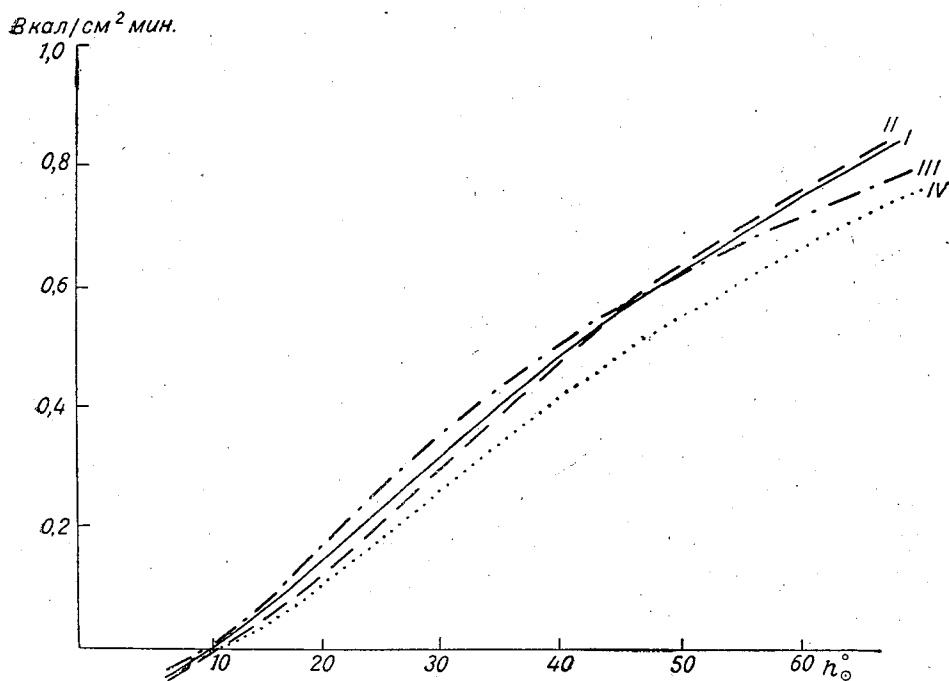


Рис. 4. Результаты измерений баланса по четырем балансомерам (I—IV).

На рис. 4 приведены для сравнения в виде кривых результаты измерений баланса по всем четырем балансомерам. Величины баланса, полученные балансомером с плоским фильтром *II*, при высотах солнца, больших  $40^\circ$ , практически совпадают с величинами баланса, измеренными незащищенным балансомером. При  $h_\odot < 40^\circ$  величины баланса, полученные балансомером *II*, несколько меньше величин баланса, полученных по балансомеру *I*.

Балансомер с полусферическим покрытием *III* при  $h_\odot < 40^\circ$  дает величины баланса, завышенные по сравнению с открытым балансомером *I*, а при  $h_\odot > 40^\circ$  — заниженные. Причину этого легко объяснить при рассмотрении геометрии отражения падающей радиации от сферического полиэтиленового колпака.

Кривая *IV* на рис. 4 показывает, что величины баланса, измеренные балансомером, покрытым гофрированной пленкой, при всех высотах солнца заметно занижены по сравнению с величинами баланса, измеренными открытым балансомером. Это происходит благодаря увеличению рассеивающей площади вследствие гофрирования пленки.

В табл. 1 представлены данные наблюдений радиационного баланса по балансомерам *I—IV* при пасмурном небе. Из таблицы видно, что величины радиационного баланса, полученные по балансомерам *I—III*, мало различаются между собой, что объясняется характером углового распределения рассеянной радиации при пасмурном небе. Несколько меньшие значения дает балансомер *IV*, что объясняется, как уже указывалось выше, увеличением рассеивающей площади вследствие гофрирования пленки.

Таблица 1

Величины радиационного баланса при пасмурном небе, полученные с помощью балансомеров *I—IV*

| Дата   | Время |      | $h_\odot$ | Форма облачности | <i>I</i> | <i>II</i> | <i>III</i> | <i>IV</i> |
|--------|-------|------|-----------|------------------|----------|-----------|------------|-----------|
|        | час.  | мин. |           |                  |          |           |            |           |
| 20 VI  | 7     | 32   | 32,3      | Sc               | 0,26     | 0,25      | 0,23       | 0,27      |
| 21 VI  | 7     | 31   | 32,1      | As, Sc           | 0,06     | 0,08      | 0,07       | 0,09      |
| 21 VI  | 9     | 31   | 53,0      | As, Sc           | 0,23     | 0,25      | 0,27       | 0,25      |
| 21 VI  | 10    | 31   | 61,9      | As, Sc           | 0,19     | 0,19      | 0,17       | 0,18      |
| 22 VI  | 6     | 30   | 21,4      | Ac               | 0,09     | 0,08      | 0,08       | 0,09      |
| 22 VI  | 7     | 30   | 31,8      | Ac               | 0,14     | 0,14      | 0,14       | 0,14      |
| 23 VI  | 11    | 30   | 67,5      | Cu               | 0,19     | 0,18      | 0,19       | 0,24      |
| 24 VI  | 6     | 30   | 21,4      | As, Cl           | 0,02     | 0,02      | 0,02       | 0,02      |
| 24 VI  | 7     | 30   | 31,8      | As, Cc           | 0,07     | 0,07      | 0,07       | 0,08      |
| 24 VI  | 9     | 30   | 52,6      | As, Cc           | 0,22     | 0,19      | 0,17       | 0,18      |
| 24 VI  | 11    | 30   | 67,5      | Ac               | 0,44     | 0,42      | 0,38       | 0,43      |
| 28 VI  | 10    | 30   | 61,4      | Ac, Cl           | 0,14     | 0,14      | 0,13       | 0,16      |
| 29 VI  | 10    | 29   | 61,4      | Cb, Cu, Ac       | 0,11     | 0,11      | 0,11       | 0,13      |
| 1 VII  | 7     | 28   | 31,1      | Ac, Sc           | 0,18     | 0,18      | 0,17       | 0,19      |
| 1 VII  | 8     | 28   | 42,1      | Sc, Ac           | 0,13     | 0,13      | 0,10       | 0,11      |
| 6 VII  | 10    | 28   | 60,8      | Sc, Cb           | 0,27     | 0,24      | 0,24       | 0,26      |
| 19 VII | 6     | 26   | 19,4      | Sc, As, Cb       | 0,01     | 0,02      | 0,01       | 0,02      |
| 19 VII | 8     | 26   | 40,3      | Sc               | 0,10     | 0,10      | 0,08       | 0,10      |
| 20 VII | 7     | 26   | 29,6      | Sc, Ac           | 0,15     | 0,15      | 0,13       | 0,16      |

На рис. 5 представлен в качестве примера ночной ход радиационного баланса по незащищенному балансомеру *I* и балансомеру *II*, покрытому плоским фильтром. По оси абсцисс отложено среднее солнеч-

ное время  $\tau_m$ , по оси ординат — величины баланса в кал/см<sup>2</sup> мин. Как видно из рисунка, величины баланса, измеренные балансомерами I и II, оказываются довольно близкими, но в целом ряде случаев отрицательные величины баланса, измеренные открытым балансомером, несколько больше величин баланса, измеренных балансомером с полиэтиленовым фильтром.

В результате сравнения показаний открытого балансомера с балансомерами, покрытыми полиэтиленовыми фильтрами, было выяснено, что наиболее подходящим является балансомер с плоским полиэтиленовым покрытием, поскольку он наиболее прост в изготовлении и обладает большей механической прочностью по сравнению с полусферическим.

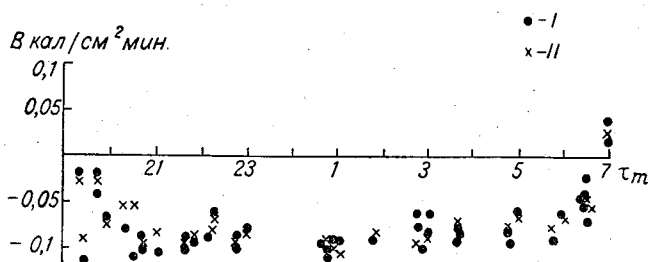


Рис. 5. Ночной ход радиационного баланса по балансомерам I и II.

При измерении радиационного баланса балансомером с полиэтиленовым фильтром необходимо выяснить, не нарушается ли из-за наличия пленки и воздушной прослойки между пленкой и приемной поверхностью тепловой режим прибора. Выяснение этого вопроса представляет особенно большое значение, поскольку на корабле балансомер выставляется на длинной стреле, а в связи с этим у наблюдателя нет возможности закрывать балансомер крышкой после каждого наблюдения. В результате этого балансомер подвергается длительному нагреванию солнечными лучами.

Для выяснения влияния этого возможного «парникового эффекта» нами были проведены следующие исследования. В течение часа балансомер II, повернутый первой стороной кверху, выдерживался на солнце, после чего по нему измерялся баланс  $B_1$ . После этого балансомер поворачивался второй стороной кверху и по нему сразу же снова измерялся баланс  $B_2$ . Такие измерения производились нами в течение полутора месяцев при различных высотах солнца. В результате этих исследований оказалось, что в пределах точности измерений величины  $B_1$  и  $B_2$  совпадали, что свидетельствует о том, что ни сама полиэтиленовая пленка, ни слой воздуха практически не оказывают влияния на результаты измерений баланса.

При использовании балансомера с плоским полиэтиленовым фильтром, естественно, возникает вопрос об угловой поправке такого балансомера, поскольку часть падающей радиации будет зеркально отражаться от пленки.

Для определения угловой поправки при наличии солнца балансомер II укреплялся на поворотном устройстве. Нижняя приемная поверхность балансомера закрывалась экраном, который поворачивался вместе с балансомером. Так как температура нижнего экрана не менялась в течение измерений, то показания балансомера определялись практически только косинусом угла падения солнечной радиации. Эти

измерения производились нами при безоблачном небе и при полном штиле. Результаты этих исследований представлены на рис. 6.

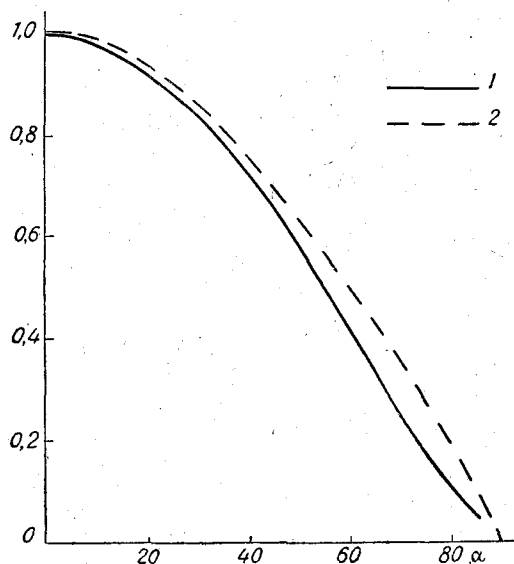


Рис. 6. Зависимость чувствительности балансомера с плоским полиэтиленовым фильтром от угла падения радиации  $f(\alpha)$ .  
1 —  $f(\alpha)$ , 2 —  $\cos \alpha$ .

На основании данных, представленных на рис. 6, получены величины поправочных множителей  $F_h$  к балансомеру при различных высотах солнца над горизонтом (табл. 2).

| Таблица 2                     |      |      |      |      |      |     |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|-----|
| $h_{\odot}^{\circ}$ . . . . . | 10   | 30   | 50   | 70   | 80   | 90  |
| $F_h$ . . . . .               | 1,72 | 1,28 | 1,06 | 1,05 | 1,01 | 1,0 |

Как видно из табл. 2, неучет зависимости чувствительности балансомера от угла падения радиации будет приводить при  $h_{\odot} < 50^{\circ}$  к значительным ошибкам измерений. Необходимо также отметить, что эту зависимость чувствительности балансомера от угла падения нельзя приписывать только влиянию полиэтиленовой пленки, так как и незащищенный балансомер обладает заметной зависимостью чувствительности от угла падения радиации, что объясняется тем, что приемные поверхности балансомера неортоотропно отражают падающую радиацию [6].

Мы рассчитали также поправочные множители к показаниям нашего балансомера с полиэтиленовым фильтром в случае измерений радиационного баланса при облачном небе днем и при измерениях баланса ночью.

Расчеты производились с учетом реального углового распределения рассеянной радиации и эффективного излучения по небосводу [4, 2]. Оказалось, что при измерении баланса как днем, так и ночью в случае сплошной облачности к показаниям балансомера следует вводить следующий поправочный множитель:  $f_1 = 1,10$ . При измерении радиационного баланса в случае безоблачного неба ночью следует вводить к показаниям балансомера поправочный множитель  $f_2 = 1,08$ . Однако сле-

дует заметить, что столь заметный поправочный множитель обусловлен не только наличием полиэтиленовой пленки. Аналогичные расчеты, произведенные нами для балансомера, не защищенного полиэтиленовым фильтром, дали следующие значения поправочных множителей:  $f_1=1,05$  и  $f_2=1,04$ .

Представляет интерес вопрос о том, как изменяется чувствительность балансомера при покрытии его полиэтиленовой пленкой. Специальные исследования, проведенные авторами этой статьи на судах «Ю. М. Шокальский» и «А. И. Воейков», а также в Карадагской актинометрической обсерватории, показали, что в среднем переводные множители балансомеров увеличиваются при покрытии их приемной поверхности полиэтиленом на 5%.

В связи с тем что полиэтиленовая пленка «стареет», необходимо остановиться на том, как в естественных условиях это «старение» полиэтилена скажется на изменении переводного множителя балансомера.

В настоящее время мы располагаем данными об изменении переводных множителей балансомеров с положительными покрытиями за три месяца.

Таблица 3  
Данные об изменении переводных множителей балансомеров

| № балансомера | Переводные множители<br>1 VI 1961 г. | Переводные множители<br>2 IX 1961 г. | Изменение переводных множителей, % |
|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| I             | 0,0190                               | 0,0190                               | 0                                  |
| II            | 0,0212                               | 0,0229                               | 8                                  |
| III           | 0,0196                               | 0,0224                               | 14                                 |
| IV            | 0,0172                               | 0,0192                               | 11                                 |

В табл. 3 приведены переводные множители незащищенного балансомера (I) и трех балансомеров с полиэтиленовыми фильтрами (II, III, IV), полученные в результате поверки балансомеров 1/VI и 2/IX 1961 г. Как видно из таблицы, после трехмесячной летней эксплуатации (необходимо отметить, что в Карадаге балансомеры подвергались ежедневному интенсивному облучению солнечной радиацией) переводные множители балансомеров с полиэтиленовыми покрытиями увеличились в среднем на 11%, в то время как переводный множитель незащищенного балансомера остался без изменения. Меньше всего (на 8%) изменился переводный множитель балансомера с плоским покрытием.

Из вышеизложенного следует сделать вывод о том, что балансомеры с полиэтиленовыми фильтрами необходимо проверять не реже, чем один раз в месяц. Необходимо также отметить, что полиэтиленовые покрытия нуждаются в ежедневном осмотре.

При обнаружении следов морской соли на поверхности пленки ее следует протереть мягкой тряпочкой, смоченной дистиллированной водой.

При измерении радиационного баланса в морских условиях может иметь место периодическое запотевание полиэтиленовой пленки. При обнаружении влаги на внутренней поверхности пленки следует вскрыть полиэтиленовое покрытие и просушить балансомер и пленку.

При обсуждении вопроса об измерении радиационного баланса моря с различных судов необходимо остановиться на следующем обстоятельстве. Измеряя радиационный баланс в условиях суши, мы затеняем балансомер от прямых солнечных лучей и к показаниям балансомера добавляем прямую радиацию, полученную по измерениям актинометром.

В морских условиях затенять балансомер от прямой солнечной ра-

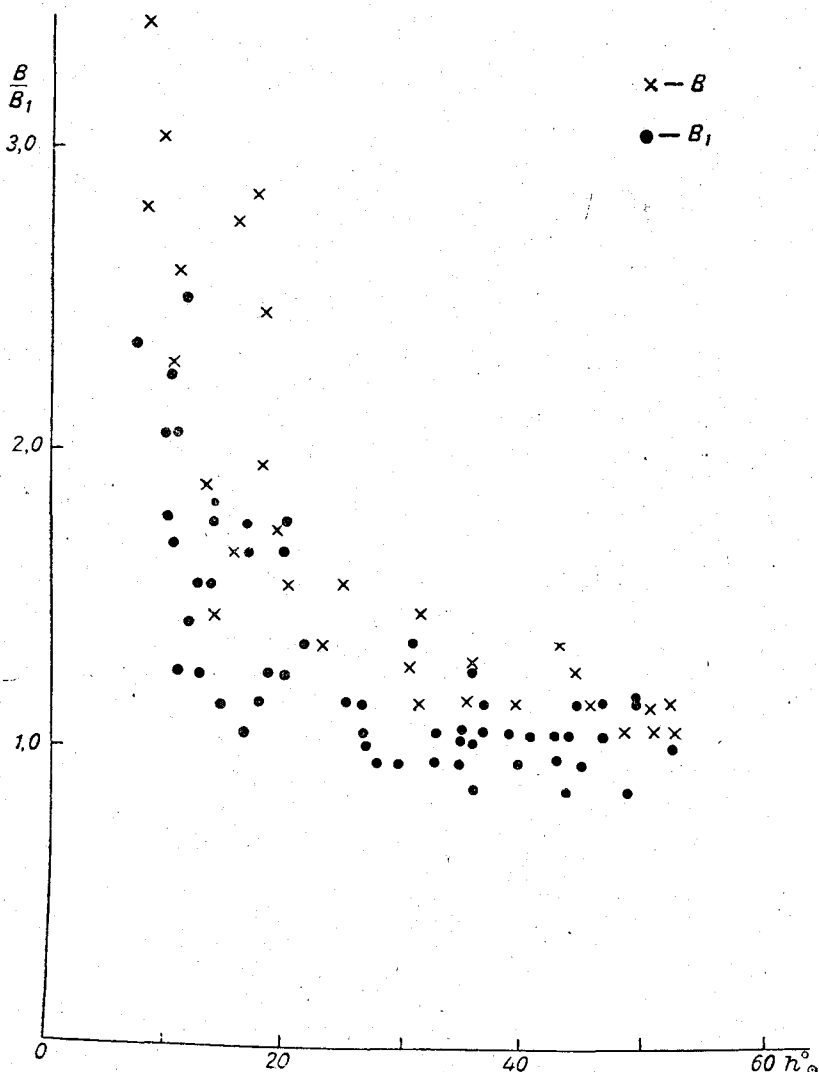


Рис. 7. Отношение величин радиационного баланса, измеренных с помощью балансомера, затененного от прямой солнечной радиации, актинометра ( $B$ ) и с помощью незатененного балансомера ( $B_1$ ).

диации оказывается невозможным, так как он помещается на длинной стреле. Поскольку наблюдения по незатененному балансомеру будут безусловно менее точными, нами были проведены специальные исследования для выяснения того, какую ошибку мы получим при наблюдениях по незатененному балансомеру.

Баланс измерялся нами двумя балансомерами одновременно, причем один из них затенялся от прямых солнечных лучей, а второй нет.

Измерения производились при различных высотах солнца над горизонтом. В результате сравнения показаний этих балансомеров выяснилось, что при больших высотах солнца ( $30-60^\circ$ ) ошибка измерений при отсутствии затенения балансомера составляет от 0 до 5%. При высотах солнца, меньших  $30^\circ$ , эта ошибка быстро растет с уменьшением высоты солнца над горизонтом и составляет при  $h_\odot = 10^\circ$  уже 30% (рис. 7). На этом же рисунке представлены результаты аналогичных измерений для балансомера, покрытого полиэтиленовым фильтром. При  $h_\odot = 30-50^\circ$  ошибка измерений при отсутствии затенения балансомера составляет 10—20%, при  $h_\odot = 20^\circ$  ошибка около 50%, а при  $h_\odot = 10^\circ$  — 60—70%.

Таким образом, мы видим, что при малых высотах солнца измерения радиационного баланса моря с корабля становятся малонадежными. Причиной таких больших ошибок в измерении баланса при малых высотах солнца является описанная нами выше зависимость чувствительности балансомера от угла падения радиации, а также отражения радиации от полиэтиленовой пленки. В связи с этим при измерении радиационного баланса в морских условиях рекомендуется вводить угловую поправку к переводному множителю балансомера.

Далее дополнительно рассмотрен ряд ошибок, имеющих место при измерении радиационного баланса в морских условиях.

1. Ошибка в измерении длинноволновой радиации и радиационного баланса за счет затенения кораблем части водной поверхности. На рис. 8 схематически изобразим корабль со стрелой ( $l$  — длина стрелы;  $a$  — длина носовой части судна,  $2d$  — ширина судна,  $h$  — высота корабля над водой;  $L = l + a$ ).

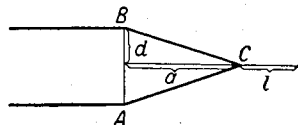


Рис. 8.

Определим угол, под которым корабль виден из центра балансомера,  $\omega L^2 = L \cdot 2d = S$ , где  $S$  — площадь сечения корабля вертикальной плоскостью по линии  $AB$ .

Для простоты будем считать треугольник  $ABC$  равнобедренным, тогда

$$a = \sqrt{3} d, \quad \omega = \frac{2dh}{L^2} = \frac{2dh}{(l + \sqrt{3} d)^2}.$$

Тогда собственное длинноволновое излучение корабля в единице телесного угла запишется следующим образом:

$$F_{\text{дл}}(\omega) = \frac{\delta_{\text{кор}} \sigma T_{\text{кор}}^4 \omega}{2\pi} = \frac{\delta_{\text{кор}} \sigma T_{\text{кор}}^4 dh}{\pi (l + a)^2},$$

где  $\delta_{\text{кор}}$  — относительная излучательная способность корабля. По данным [11]  $\delta_{\text{кор}} = 0,9$ .

При отсутствии корабля балансомер получил бы следующую величину длинноволновой радиации, излучаемой водной поверхностью:

$$\delta_{\text{в}} \sigma T_{\text{в}}^4.$$

Отраженную кораблем длинноволновую радиацию водной поверхности можно записать таким образом:

$$\delta_{\text{в}} \sigma T_{\text{в}}^4 (1 - \delta_{\text{кор}}).$$

Величины  $F_{\text{дл}}$  были вычислены нами для следующих параметров корабля:  $d = 9$  м,  $a = 20$  м,  $l = 8$  м,  $\delta_{\text{кор}} = 0,90$  м,  $F_{\text{дл}} = 0,0292 \delta_{\text{кор}} \sigma T^4$ .

В табл. 4 представлены величины  $F_{\text{дл}}$  для различных температур корабля.

Величины излучательной способности воды в полусферу были рассчитаны нами для диапазона температур воды 0—30°, о чем будет более подробно сказано ниже. В заданных пределах изменения температуры излучательная способность воды меняется мало и составляет в среднем для гладкой водной поверхности 89%, а для волнения 91%.

В табл. 5 представлены величины длинноволновой радиации, излучаемой водной поверхностью при различных температурах воды.

Таблица 4

| $T_{\text{кор}}$ | $F_{\text{дл}}$ кал/см <sup>2</sup> мин. | $T_{\text{кор}}$ | $F_{\text{дл}}$ кал/см <sup>2</sup> мин. |
|------------------|------------------------------------------|------------------|------------------------------------------|
| 5                | 0,011                                    | 25               | 0,017                                    |
| 10               | 0,014                                    | 30               | 0,018                                    |
| 15               | 0,015                                    | 35               | 0,019                                    |
| 20               | 0,016                                    | 40               | 0,021                                    |

Таблица 5

| $T_{\text{в}}$ | $\sigma T_{\text{в}}^4$ | $\delta_{\text{в}} \sigma T_{\text{в}}^4 \frac{\omega}{2\pi}$ |
|----------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 0              | 0,40                    | 0,012                                                         |
| 5              | 0,44                    | 0,013                                                         |
| 10             | 0,47                    | 0,014                                                         |
| 15             | 0,50                    | 0,015                                                         |
| 20             | 0,54                    | 0,016                                                         |
| 25             | 0,58                    | 0,017                                                         |
| 30             | 0,62                    | 0,018                                                         |
| 35             | 0,66                    | 0,020                                                         |

Таблица 6

| $T_{\text{в}}$ | $\delta_{\text{в}} \sigma T_{\text{в}}^4 (1 - \delta_{\text{кор}})$ | $\delta_{\text{в}} \sigma T_{\text{в}}^4 (1 - \delta_{\text{кор}}) \frac{\omega}{2\pi}$ |
|----------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 0              | 0,040                                                               | 0,001                                                                                   |
| 5              | 0,044                                                               | 0,001                                                                                   |
| 10             | 0,047                                                               | 0,001                                                                                   |
| 15             | 0,050                                                               | 0,001                                                                                   |
| 20             | 0,054                                                               | 0,002                                                                                   |
| 25             | 0,058                                                               | 0,002                                                                                   |
| 30             | 0,062                                                               | 0,002                                                                                   |
| 35             | 0,066                                                               | 0,002                                                                                   |

Величины отраженной кораблем длинноволновой радиации, рассчитанные для различных температур воды, представлены в табл. 6.

В табл. 7 представлены ошибки (%) за счет затенения кораблем длинноволновой радиации, полученные следующим образом:

$$\begin{aligned} & \delta_{\text{в}} \sigma T_{\text{в}}^4 - \delta \sigma T_{\text{в}}^4 \left(1 - \frac{\omega}{2\pi}\right) - F(\omega) + \delta_{\text{в}} \sigma T_{\text{в}}^4 (1 - \delta_{\text{кор}}) \frac{\omega}{2\pi} = \\ & = \delta_{\text{в}} \sigma T_{\text{в}}^4 \frac{\omega}{2\pi} - F_{\text{дл}}(\omega) + \delta_{\text{в}} \sigma T_{\text{в}}^4 (1 - \delta_{\text{кор}}) \frac{\omega}{2\pi}. \end{aligned}$$

Ошибки получены для различных возможных температур воды и корабля.

Таблица 7

| $T_{\text{в}}$ | $T_{\text{кор}}$ |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                | 5                | 10  | 15  | 20  | 25  | 30  | 35  | 40  |
| 0              | 0,5              | 0,2 | 0,5 |     |     |     |     |     |
| 5              |                  | 0,0 | 0,2 | 0,4 |     |     |     |     |
| 10             |                  |     | 0,0 | 0,2 | 0,4 |     |     |     |
| 15             |                  |     |     | 0,0 | 0,2 | 0,4 |     |     |
| 20             |                  |     |     |     | 0,2 | 0,0 | 0,2 |     |
| 25             |                  |     |     |     |     | 0,2 | 0,0 | 0,3 |
| 30             |                  |     |     |     |     |     | 0,2 | 0,2 |

Таблица 8

| $T_{\text{в}}$ | $T_{\text{кор}}$ |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                | 5                | 10  | 15  | 20  | 25  | 30  | 35  | 40  |
| 0              | 0,5              | 0,2 | 0,5 |     |     |     |     |     |
| 5              |                  | 0,0 | 0,2 | 0,5 |     |     |     |     |
| 10             |                  |     | 0,0 | 0,2 | 0,5 |     |     |     |
| 15             |                  |     |     | 0,0 | 0,2 | 0,5 |     |     |
| 20             |                  |     |     |     | 0,2 | 0,0 | 0,2 |     |
| 25             |                  |     |     |     |     | 0,2 | 0,0 | 0,5 |
| 30             |                  |     |     |     |     |     | 0,2 | 0,2 |

Как видно из таблицы, ошибки в измерении длинноволновой радиации за счет затенения части длинноволновой радиации кораблем не превышают в реальных условиях 0,5%.

В табл. 8 представлены величины ошибок в измерении радиационного баланса за счет затенения кораблем длинноволновой радиации (%). Ошибки рассчитаны для различных температур воды и корабля.

Как видно из таблицы, величина ошибки в измерениях радиационного баланса за счет затенения кораблем длинноволновой радиации не превышает 0,5%.

2. Ошибка в измерении радиационного баланса за счет отклонения балансомера от горизонтальности. Как известно, отклонение балансомера от горизонтальности может приводить к существенным ошибкам. В том случае, когда балансомер укрепляется на кардановом подвесе, эти ошибки, естественно, не могут быть значительными, однако проверка нескольких карданов, проведенная нами, показала, что кардановые подвесы при наличии качки обеспечивают горизонтальность с точностью от 1 до 4°. В связи с этим нами были исследованы ошибки в измерении баланса при отклонении балансомера от горизонтальности.

В результате этих исследований выяснилось, что в тех случаях, когда качание балансомера происходит вокруг оси, направление которой совпадает с азимутом солнца, отклонение балансомера от горизонтальности приводит к очень небольшим ошибкам в измеренных величинах баланса, не превышающим 3%. В тех случаях, когда качание балансомера происходит вокруг оси, перпендикулярной азимуту солнца, даже небольшие наклоны балансомера могут приводить к заметным ошибкам в определении баланса.

Так при отклонении приемной поверхности балансомера от горизонтальности  $\alpha$  на 1° величина  $\frac{\Delta B}{B}$  составляет 20%, а при  $\alpha = 3^\circ$  величина  $\frac{\Delta B}{B}$  составляет 40%.

В связи с этим при измерении баланса в морских условиях необходимо постоянно следить за строгой горизонтальностью балансомера.

При наличии значительной качки корабль следует по возможности разворачивать так, чтобы качка была минимальной.

3. Ошибка в измерении радиационного баланса за счет попадания воды на приемные поверхности балансомера. В связи с тем что при измерении радиационного баланса в морских условиях возможно попадание воды на приемные поверхности балансомера (забрызгивание морской водой, выпадение осадков, выпадение росы), а также может иметь место запотевание полиэтиленового фильтра нами были проведены исследования того, как изменяются показания балансомера, покрытого полиэтиленовым фильтром, при забрызгивании его морской водой.

Измерения производились в различное время суток при различной облачности. Забрызгивание балансомера производилось искусственным образом. Вначале забрызгивалась верхняя поверхность балансомера, покрытого полиэтиленовой пленкой, измерялся баланс, а затем забрызгивалась и нижняя поверхность балансомера (табл. 9) или, наоборот, сначала забрызгивалась нижняя поверхность, а затем верхняя (табл. 10), после чего снова измерялся баланс. После этого полиэтиленовые фильтры балансомера вытирались, и затем снова измерялся баланс.

Из рассмотрения табл. 9 и табл. 10 видно, что при попадании капель воды на полиэтилен показания балансомера резко меняются. Так, при забрызгивании верхней поверхности балансомера баланс резко уменьшается. При высотах солнца 20—50° баланс уменьшается в среднем на 40—50%. При высотах солнца, меньших 20°, наблюдались более значительные изменения в величинах баланса, превышающие в ряде случаев 100%. При попадании капель воды на нижнюю поверхность балансомера, покрытого полиэтиленовым фильтром, происходит,

Таблица 9

| Дата | Время |      | $h_{\odot}$ | Облач-ность | $B$  | $B_{\text{смоч}}$<br>(сверху) | $B_{\text{смоч}}$<br>(с двух сторон) | $B_{\text{выт}}$ |
|------|-------|------|-------------|-------------|------|-------------------------------|--------------------------------------|------------------|
|      | час.  | мин. |             |             |      |                               |                                      |                  |
| 5 IX | 15    | 15   | 33,0        | 0/0         | 25,2 | 16,6                          | 29,5                                 | 25,0             |
|      | 15    | 45   | 28,3        | 0/0         | 17,7 | 6,0                           | 19,3                                 | 17,8             |
|      | 16    | 37   | 19,6        | 0/0         | 3,7  | -5,4                          | 3,8                                  | 3,5              |
|      | 17    | 33   | 9,5         | 0/0         | -6,6 | -9,3                          | -3,4                                 | -6,9             |
|      | 18    | 06   | 3,7         | 0/0         | -9,3 | -8,1                          | -5,4                                 | -9,2             |
| 6 IX | 7     | 13   | 17,7        | 0/0         | 8,3  | 1,6                           | 9,4                                  | 8,0              |
|      | 8     | 04   | 26,3        | 0/0         | 20,6 | 8,1                           | 22,5                                 | 22,1             |
|      | 9     | 55   | 42,9        | 0/0         | 44,6 | 32,4                          | 51,0                                 | 45,3             |
|      | 11    | 36   | 51,1        | 0/0         | 48,2 | 45,1                          | 61,0                                 | 50,4             |
| 7 IX | 12    | 20   | 51,0        | 0/0         | 51,9 | 48,1                          | 62,8                                 | 52,1             |
|      | 15    | 54   | 26,5        | 10/0        | 15,4 | 9,3                           | 19,6                                 | 13,9             |
| 8 IX | 11    | 47   | 50,7        | 0/0         | 54,3 | 49,6                          | 64,1                                 | 55,1             |
| 4 X  | 15    | 26   | 22,9        | 9/2         | 13,9 | 9,3                           | 14,8                                 | 14,2             |
|      | 15    | 48   | 19,3        | 9/2         | 1,8  | -0,4                          | 3,7                                  | 1,8              |
|      | 19    | 43   | <0          | 10/4        | -2,5 | -3,7                          | -1,7                                 | -2,5             |
| 5 X  | 21    | 52   | <0          | 10/4        | -2,5 | -3,8                          | -1,7                                 | -2,6             |
|      | 9     | 40   | 31,9        | 2/0         | 18,7 | 13,5                          | 18,8                                 | 19,1             |
|      | 19    | 42   | <0          | 0/0         | -1,1 | -2,6                          | -1,0                                 | -1,1             |

Таблица 10

| Дата | Время |      | $h_{\odot}$ | Облач-ность | $B$<br>(в дел.) | $B_{\text{смоч}}$<br>(снизу) | $B_{\text{смоч}}$<br>(с двух сторон) | $B_{\text{выт}}$ |
|------|-------|------|-------------|-------------|-----------------|------------------------------|--------------------------------------|------------------|
|      | час.  | мин. |             |             |                 |                              |                                      |                  |
| 4 X  | 13    | 46   | 3,55        | 9/2         | 11,8            | 18,4                         | 13,8                                 | 11,9             |
|      | 15    | 29   | 22,5        | 10/4        | 13,4            | 18,1                         | 13,4                                 | 11,8             |
|      | 15    | 36   | 21,4        | 10/4        | 6,0             | 10,3                         | 6,9                                  | 5,8              |
|      | 15    | 48   | 19,3        | 10/4        | 1,8             | 5,5                          | 4,2                                  | 2,0              |
|      | 19    | 49   | <0          | 10/4        | -2,4            | -0,7                         | -1,7                                 | -2,4             |
|      | 21    | 54   | <0          | 10/2        | -2,6            | -0,7                         | -1,6                                 | -2,6             |
| 5 X  | 19    | 42   | <0          | 0/0         | -1,1            | 0,3                          | -0,6                                 | -1,0             |

наоборот, значительное увеличение баланса (в среднем на 50%). При забрызгивании обеих поверхностей балансомера каплями морской воды величина баланса увеличивается в среднем на 20—30%, но в отдельных случаях (обычно при небольших  $h_{\odot}$ ) изменение величины баланса достигает 90—100%.

Подобные измерения баланса при забрызгивании балансомера морской водой производились днем при затенении балансомера от прямых солнечных лучей, а также и в ночное время (см.  $h_{\odot} < 0$  в табл. 10). При затененном от солнца балансомере величина баланса изменялась примерно в тех же пределах, что и при наличии солнца. В ночное время получается, что забрызгивание одной из сторон балансомера приводит

к изменению величины баланса в среднем на 80%, а забрызгивание двух сторон приводит к увеличению баланса в среднем на 30%. Все вышеизложенное свидетельствует о том, что при сильном волнении, когда происходит постоянное забрызгивание приемных поверхностей балансомера морской водой, измерения баланса следует прекратить. В том случае, когда имело место отдельное случайное забрызгивание приемных поверхностей балансомера, покрытых полиэтиленовым фильтром, а также выпадение осадков или росы, приемные поверхности балансомера следует хорошо протереть сначала мягкой тряпочкой, смоченной дистиллированной водой, а затем сухой тряпочкой, после чего наблюдения по балансомеру могут быть продолжены.

При запотевании полиэтиленового фильтра необходимо вскрыть балансомер и протереть полиэтилен, и только после этого можно снова проводить измерения баланса.

4. Ошибка в измерении длинноволнового баланса за счет градуировки балансомера по прямой солнечной радиации. Как известно, до настоящего времени для измерения баланса ночью используются балансомеры, поверенные по прямой солнечной радиации. Однако в силу селективности поглощения радиации краской, нанесенной на приемной поверхности балансомера, в различных спектральных интервалах чувствительность балансомера будет неодинакова по отношению к коротковолновой и длинноволновой радиации [1]. В связи с этим возникает необходимость введения поправки к показаниям балансомера, измеряющего длинноволновый баланс. При этом необходимо отметить, что указанная поправка должна быть различной для различных типов покрытий балансомеров. Ниже мы приводим результаты теоретического расчета указанной выше ошибки в измерении длинноволнового баланса [12].

Пусть мы измеряем балансомером, помещенным в трубу, прямую солнечную радиацию, которая равна  $S = \int_0^{\infty} S(\lambda) d\lambda$ , где  $S(\lambda)$  — величина радиации, приходящаяся на спектральный интервал  $d\lambda$ .

Поглощательную способность балансомера обозначим  $\delta(\lambda)$ . Тогда покрытием верхней приемной поверхности балансомера будет поглощено следующее количество радиации  $q_1 = \int_0^{\infty} S(\lambda) \delta(\lambda) d\lambda$ . Отсчет по гальванометру, который будет соединен с балансомером, пропорционален величине поглощения тепла, т. е.  $n_1 = kq_1$ , где  $n_1$  — отсчет по гальванометру,  $k$  — некоторый множитель.

Переводный множитель системы балансомер—гальванометр будет равен величине прямой радиации, определенной контрольным прибором (например, актинометром), поделенной на  $n_1$ :

$$a_1 = \frac{S_1}{n_1} = \frac{\int_0^{\infty} S(\lambda) d\lambda}{k \int_0^{\infty} S(\lambda) \delta_1(\lambda) d\lambda}.$$

Данные о спектральной поглощательной способности покрытий балансомера были получены экспериментально в работе Б. П. Козырева и О. Е. Вершинина [1]. Согласно этой работе, поглощательная способность покрытий несколько уменьшается с увеличением длины волны.

Пусть теперь мы измеряем балансомером длинноволновый баланс

$$B_{\text{дл}} = \int_0^{\infty} E(\lambda) d\lambda,$$

где  $E(\lambda)$  характеризует распределение радиации в спектре эффективного излучения.

Приемными поверхностями балансомера будет поглощено следующее количество тепла:

$$q_2 = \int_0^{\infty} E(\lambda) \delta(\lambda) d\lambda.$$

Гальванометр даст отсчет, пропорциональный этой величине. Если мы используем переводный множитель, определенный по коротковолновой радиации, то величина длинноволнового баланса  $B_{\text{дл}}^*$  будет равна

$$n_2 a = k \int_0^{\infty} E(\lambda) \delta(\lambda) d\lambda \frac{\int_0^{\infty} S(\lambda) d\lambda}{k \int_0^{\infty} S(\lambda) \delta(\lambda) d\lambda},$$

в то время как его истинное значение  $B_{\text{дл}} = \int_0^{\infty} E(\lambda) d\lambda$ .

Таким образом, ошибка  $\Delta$ , которую мы получаем вследствие градуировки балансомера по прямой солнечной радиации, будет равна

$$\Delta = 1 - \frac{\int_0^{\infty} E(\lambda) \delta(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} S(\lambda) \delta(\lambda) d\lambda}.$$

Данные о спектральном распределении эффективного излучения были взяты из работы [10].

Учитывая то обстоятельство, что для всего коротковолнового участка спектра значение  $\delta$  с достаточной степенью точности постоянно и равно 0,98 [1], можно записать

$$\Delta = 1 - 1,02 \frac{\int_0^{\infty} E(\lambda) \delta(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} E(\lambda) d\lambda}. \quad (1)$$

Проведенные по формуле [1] вычисления дали следующие значения ошибок, получаемых нами при измерении длинноволнового баланса. Для балансомеров, покрытых сажей, растворенной в целлулоидном лаке, ошибка  $\Delta$  составляет 10%; для балансомеров, покрытых сажей, растворенной в янтарном лаке,  $\Delta = 12\%$ .

Таким образом, можно сказать, что поглощательная способность балансомеров будет составлять не 100%, как часто принимается в различных работах, а максимум 88—90%.

Необходимо отметить, что результаты данных расчетов относятся к балансомерам с хорошими новыми покрытиями. Для балансомеров, применяемых на сети станций, указанные ошибки могут быть значительно большими. Поэтому при измерении длинноволнового баланса балансомеры следует градуировать не по прямой солнечной радиации, а по длинноволновой радиации.

Из вышеизложенного мы считаем возможным сделать следующие выводы.

1. При измерении радиационного баланса в морских условиях необходимо покрывать балансомеры полиэтиленовой пленкой, в противном случае вследствие вертикального обдувания проведение измерений становится невозможным.

2. Наиболее целесообразным является использование плоского полиэтиленового фильтра ввиду простоты его изготовления и хорошего сохранения в естественных условиях по сравнению с другими видами фильтров.

3. При измерении радиационного баланса необходимо вводить к показаниям балансомера угловую поправку, которая должна быть определена для каждого балансомера. Следует заметить, что особенно важно вводить эту поправку при высотах солнца, меньших  $30^\circ$ .

4. Необходимо следить за строгой горизонтальностью балансомера.

5. При забрызгивании балансомера морской водой или при попадании на приемные поверхности балансомера капель дождя или росы измерения радиационного баланса следует прекратить, приемные поверхности балансомера, покрытые полиэтиленовой пленкой, необходимо насухо протереть, а в случае запотевания пленки изнутри просушить балансомер, после чего следует продолжать измерения.

6. Для измерения длинноволнового баланса следует использовать балансомеры, проградуированные не по прямой солнечной радиации, а по длинноволновой радиации, в противном случае следует вводить к показаниям балансомера соответствующую поправку.

7. Авторы данной работы предлагают использовать балансомеры с полиэтиленовыми фильтрами и для измерения радиационного баланса в условиях суши, поскольку измерения незащищенным балансомером при наличии ветра дают ненадежные показания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Козырев Б. П., Вершинин О. Е. Определение спектральных коэффициентов диффузного отражения инфракрасной радиации от зачерненных поверхностей. Оптика и спектроскопия, вып. 4, т. VI, 1959.
2. Кондратьев К. Я. Лучистый теплообмен в атмосфере. Гидрометеиздат, Л., 1956.
3. Кондратьев К. Я., Еловских М. П. Распределение интенсивности эффективного излучения и противоишлучения по небосводу. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 5, 1955.
4. Кондратьев К. Я., Манолова М. П. Радиационный баланс склонов. Вестн. ЛГУ, № 10, 1958.
5. Кондратьев К. Я., Тер-Маркарянц Н. Е. Об отражении радиации морем. Уч. зап. ЛГУ, сер. физ. наук, вып. 9, № 40, 1956.
6. Росс Ю. К. Зависимость переводного множителя пиргеометра (эффективного пиранометра) Янишевского от высоты солнца. Метеорология и гидрология, № 6, 1954.
7. Тер-Маркарянц Н. Е. Об ошибках измерений альbedo водных поверхностей. Труды ГГО, вып. 109, 1961.
8. Янишевский Ю. Д. Актинометрические приборы и методы наблюдений. Гидрометеиздат, Л., 1957.
9. William I. Wolfe, Stanley S. Ballard, Kathrin A. McCarthy. Optical materials for infrared instrumentation. The university of Michigan willon run laboratories. January, 1959.
10. Адель А. Оценка прозрачности атмосферного окна 16—24  $\mu$ . Journ. Opt. Soc. Amer., v. 37, No 10, 1947.
11. Гребер Г., Эрк С., Григуль У. Основы учения о теплообмене. ИЛ, М, 1958.
12. Новосельцев Е. П., Тер-Маркарянц Н. Е. К вопросу об измерении длинноволнового баланса, Метеорология и гидрология, № 4, 1963.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПО ТЕРРИТОРИИ СССР

Приводятся карты годового и месячных распределений эффективного излучения по территории Советского Союза, построенные на основании данных измерений. Проводится анализ и сравнение с аналогичными картами, составленными по расчетным данным.

В книге [3] приведена впервые построенная по измеренным данным схематическая карта годового распределения эффективного излучения по территории СССР. Схематичность ее обусловлена малым числом актинометрических станций (42 станции), на которых проводились балансовые наблюдения, погрешностями метода разностей и некоторыми другими ошибками.

В последние годы число актинометрических станций увеличилось до 181 (1961 г.). В связи с этим появилась возможность построения более точных карт годового распределения эффективного излучения и аналогичных месячных карт (описание и анализ дается в настоящей работе).

На точности определения длинноволновой радиации, помимо погрешности, вносимой методом разности, сказываются еще и ошибки измерения радиационного баланса термоэлектрическим балансометром. Исследованием их занимались С. И. Сивков и К. Д. Лебедева [10], Н. Н. Андреева и М. С. Маршунова [1, 2] и др. С. И. Сивковым и К. Д. Лебедевой показано, что чувствительность балансомера к длинноволновой радиации примерно на 20% меньше чувствительности его к коротковолновой. В отличие от предыдущих работ, нами введена соответствующая поправка на переводный множитель.

Использование данных измерений усложнялось различием рядов наблюдений за радиационным балансом на разных станциях. Для удлинения периодов наблюдений был использован график связи месячных сумм эффективного излучения и поглощенной радиации. С его помощью находились месячные суммы эффективного излучения в тех случаях, когда не измерялся радиационный баланс [1, 7].

Таким образом, при построении годовой и месячных карт распределения эффективного излучения были использованы данные за максимально возможный период времени до 1961 г. включительно.

На всех приводимых в работе картах нанесены изолинии эффективного излучения, построенные как по измеренным данным (1), так и по рассчитанным (2) [4, 5, 6, 8]. При построении последних мы пользовались данными Н. А. Ефимовой, на основании которых ею составлены карты распределения эффективного излучения по земному шару [9].

При построении и анализе карт рассматривались средние многолетние величины эффективного излучения, учитывалось распределение по территории СССР температуры воздуха, количества осадков, числа дней с осадками, сумм солнечной радиации. Кроме этого, использовались карты средней облачности, приведенные в работе Т. Г. Берлянд [4].

На рис. 1 представлена карта распределения годовых сумм эффективного излучения. Изолинии на ней проводились через  $10 \text{ ккал/см}^2 \text{ год}$ . Можно заметить довольно хорошее совпадение измеренных и рассчитанных данных.

Заштрихованные на рисунках горные области с отметками больше  $1000 \text{ м}$  над уровнем моря из-за недостатка данных нами не рассматривались.

Анализ этой карты (рис. 1) показывает, что вся территория Советского Союза характеризуется монотонным убыванием эффективного излучения с увеличением широты. Наименьшие годовые суммы имеют место на севере и составляют величину порядка  $20 \text{ ккал/см}^2 \text{ год}$ . Поле эффективного излучения на севере Советского Союза размыто и имеет малые градиенты.

Максимальные величины годовых сумм  $E_{\text{эф}}$  наблюдаются в Средней Азии (в песках Каракумы и в районе возвышенности Карабиль) и достигают значений порядка  $70 \text{ ккал/см}^2 \text{ год}$ .

Следует отметить, что в северных и центральных районах ЕТС изолинии имеют широтный ход. На возвышенностях (Средне-Русская, Приволжская) и в горах (Уральский хребет) изолинии изгибаются к югу. Это частично объясняется понижением температуры с высотой и увеличением облачности. К югу ЕТС величина  $E_{\text{эф}}$  постепенно растет и в районе Крымского полуострова и Прикаспийской низменности превышает  $50 \text{ ккал/см}^2 \text{ год}$ . В районе Кавказа наблюдается уменьшение  $E_{\text{эф}}$  при увеличении абсолютной высоты над уровнем моря. Это происходит в результате понижения температур с высотой и увеличения облачности и осадков в горах. В Куринской низменности наблюдается возрастание  $E_{\text{эф}}$  по сравнению с прилегающими к ней горными районами. Это обуславливается наличием высоких температур и малой облачности в течение всего года и незначительным количеством осадков ( $\approx 200 \text{ мм}$ ). В Колхидской низменности увеличение  $E_{\text{эф}}$  выражено значительно слабее, что может быть объяснено значительной облачностью.

На Азиатской территории Советского Союза изолинии годовых сумм  $E_{\text{эф}}$  имеют в общем широтную направленность. Она нарушается лишь вблизи горных хребтов и в муссонных районах. Максимальные величины  $E_{\text{эф}}$  на Азиатской территории Советского Союза, кроме Средней Азии, наблюдаются в бассейне Амура и в районе оз. Хасан и составляют величину, превышающую  $40 \text{ ккал/см}^2 \text{ год}$ .

На месячных картах распределения  $E_{\text{эф}}$ , изображенных на рис. 2—13, изолинии проводились через  $1 \text{ ккал/см}^2 \text{ мес}$ . Анализ их показывает, что в зимний период (декабрь, январь, февраль) величина месячных сумм эффективного излучения меняется от  $1 \text{ ккал/см}^2 \text{ мес}$  на севере до  $4 \text{ ккал/см}^2 \text{ мес}$  на юге. В Средней Азии в районе песков Каракумы она доходит до значений, превышающих  $3 \text{ ккал/см}^2 \text{ мес}$  в декабре и январе и  $4 \text{ ккал/см}^2 \text{ мес}$  в феврале. Такие же месячные суммы имеют место и на Дальнем Востоке.

В северной и центральной частях территории СССР поле эффективного излучения сильно размыто. Месячные суммы  $\Sigma_m E_{\text{эф}}$  колеблются около величины  $1 \text{ ккал/см}^2 \text{ мес}$ .

На Кавказе хорошо очерчивается Куринская долина, где  $\Sigma_m E_{\text{эф}}$  превышают значение  $3 \text{ ккал/см}^2 \text{ мес}$ .

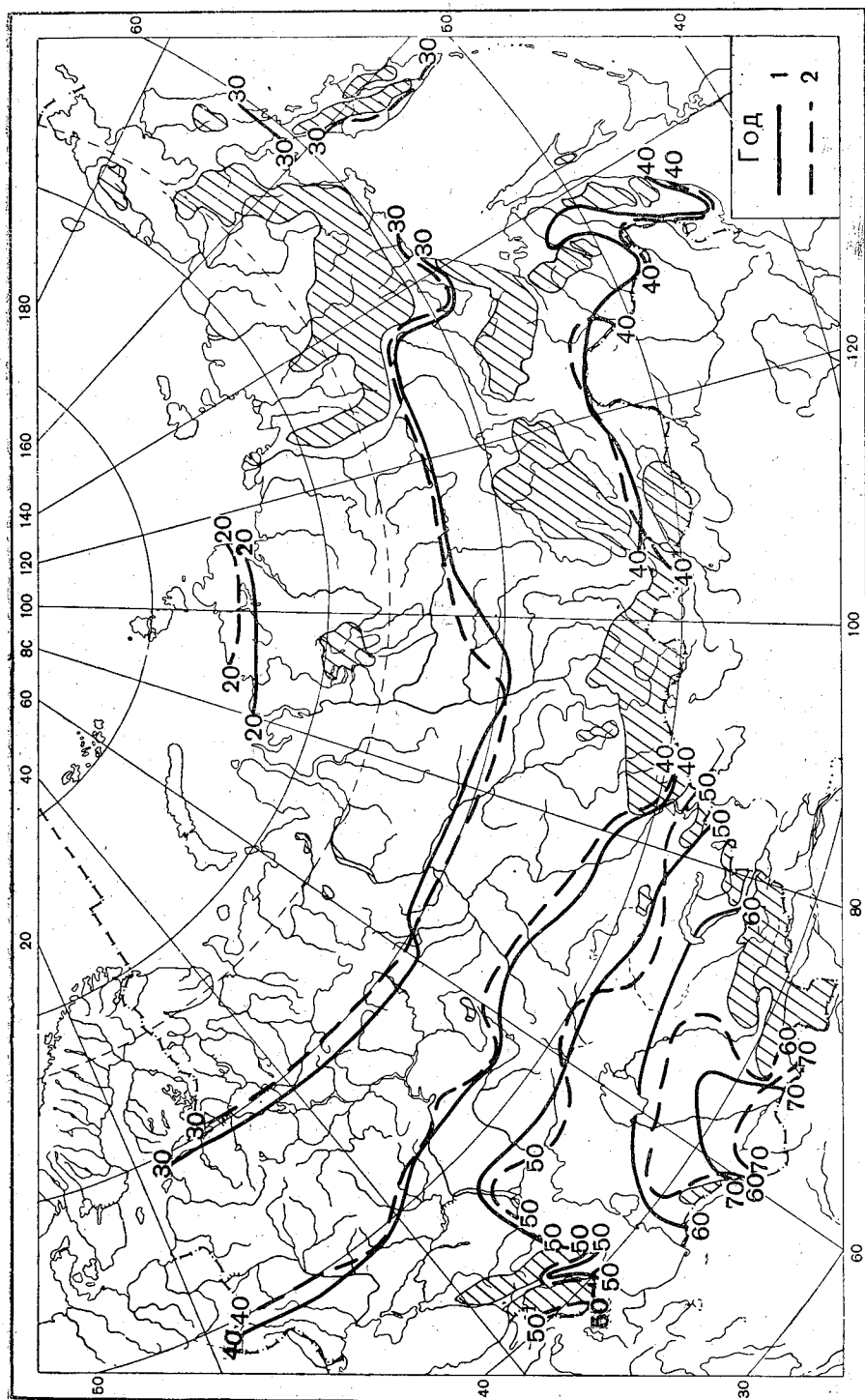


Рис. 1.

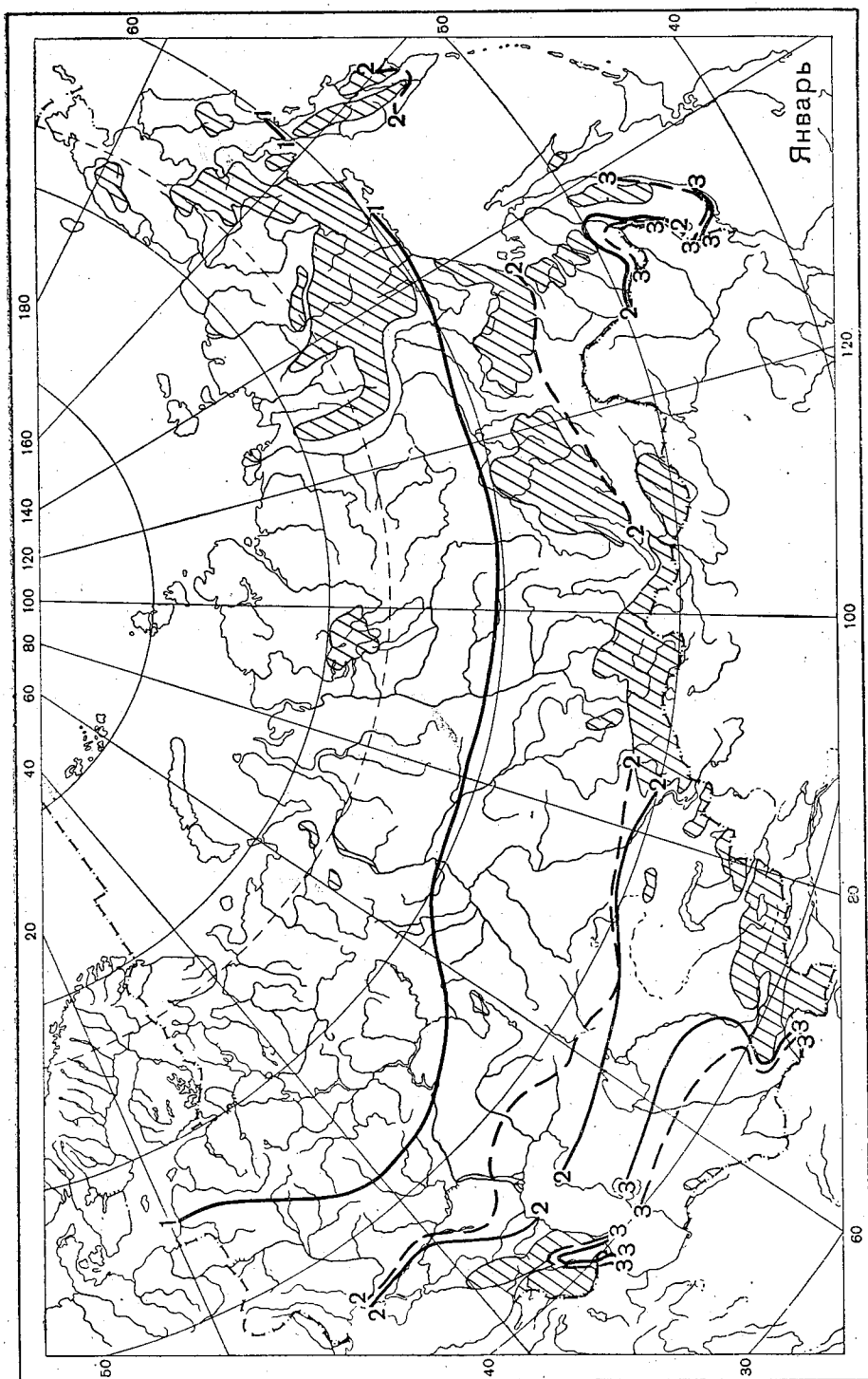


Рис. 2.

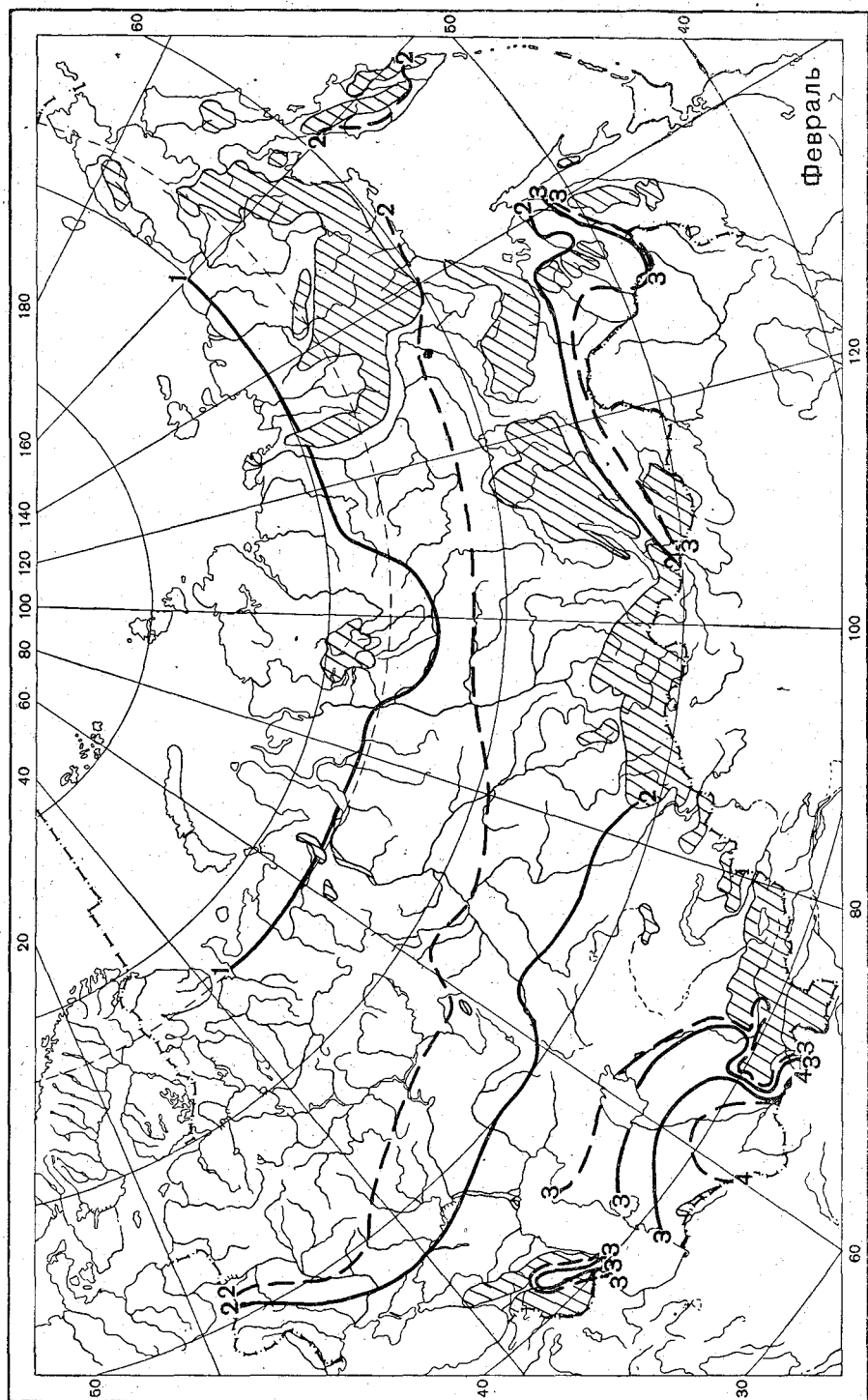


Рис. 3.

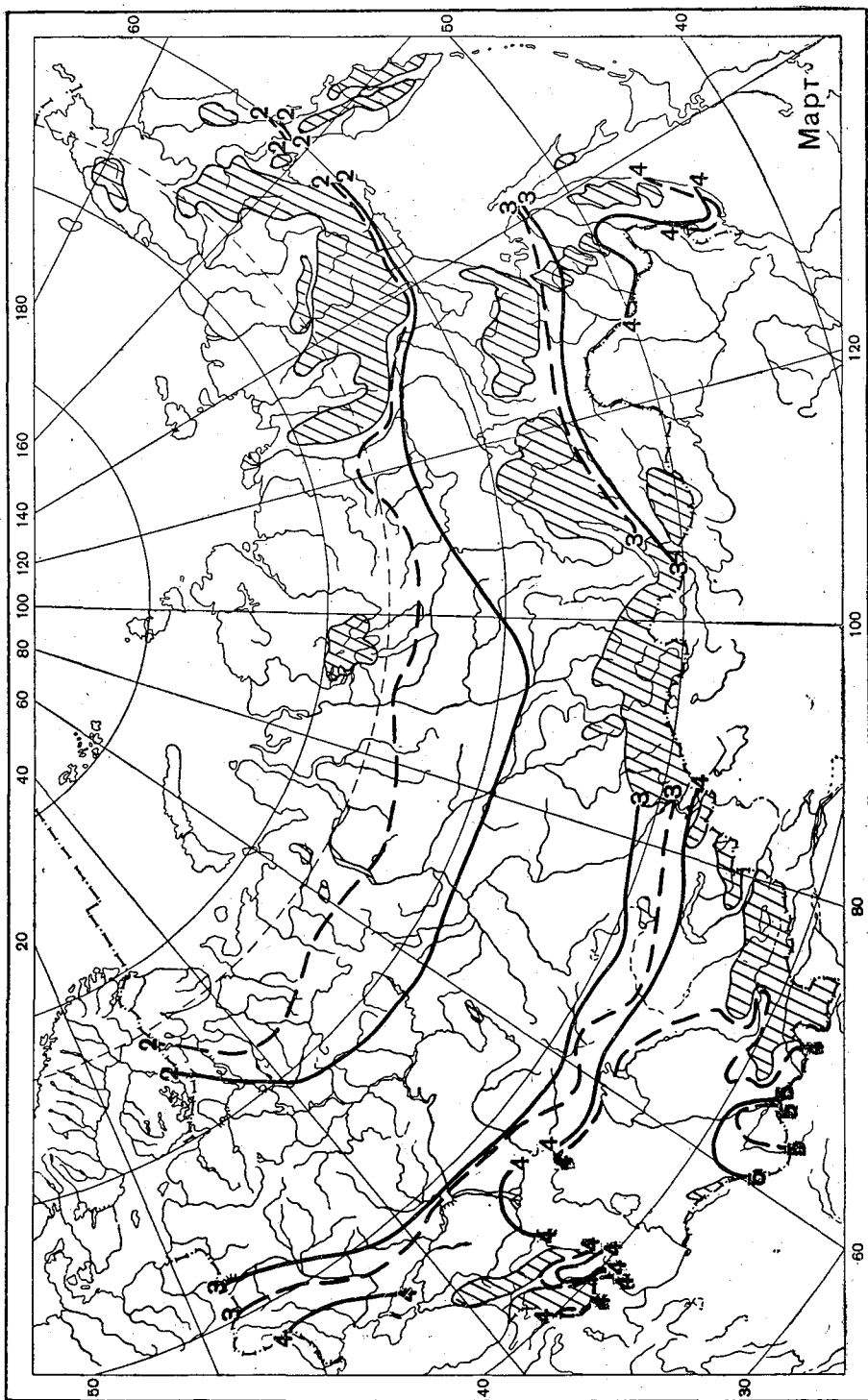


Рис. 4.

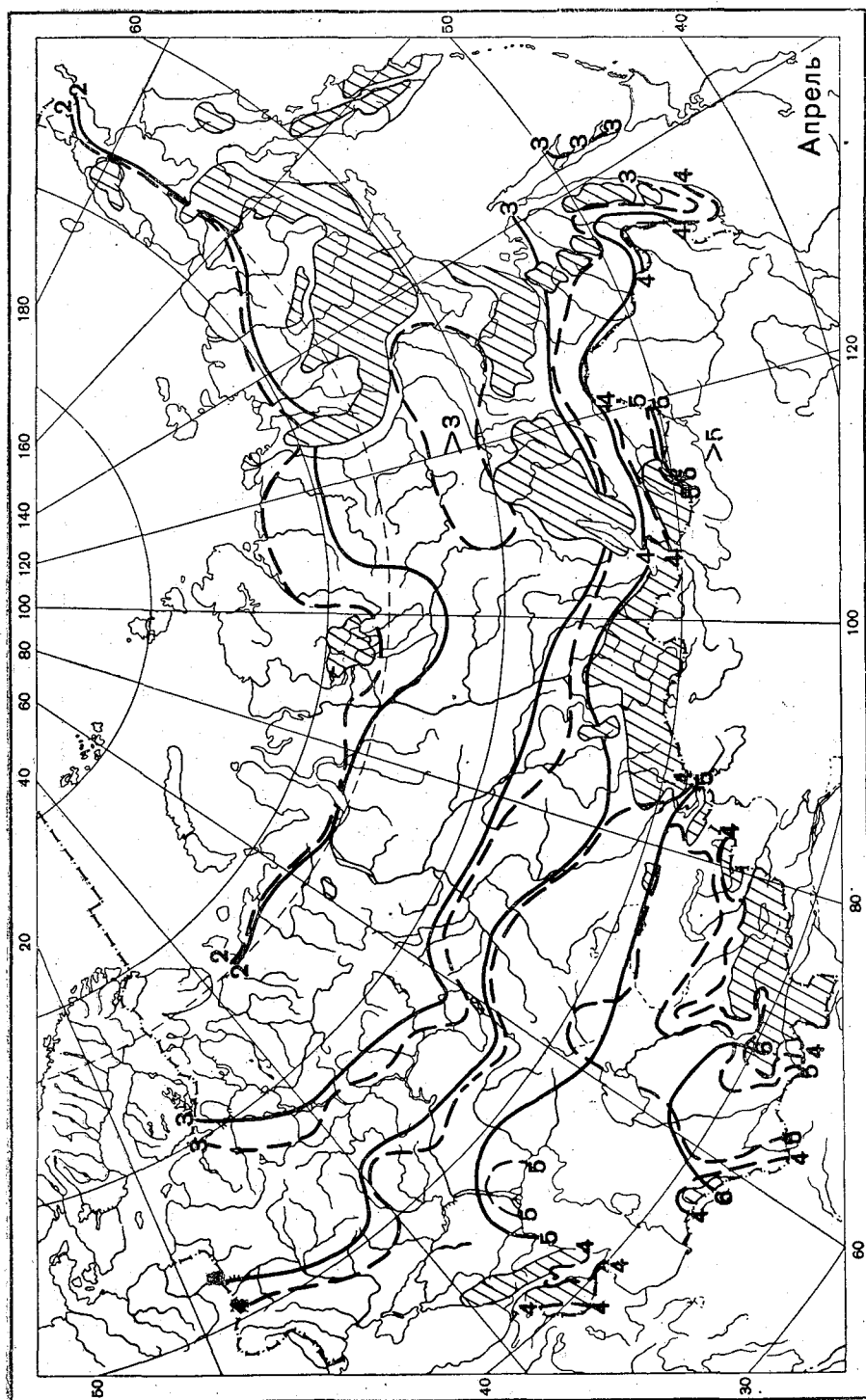


Рис. 5.

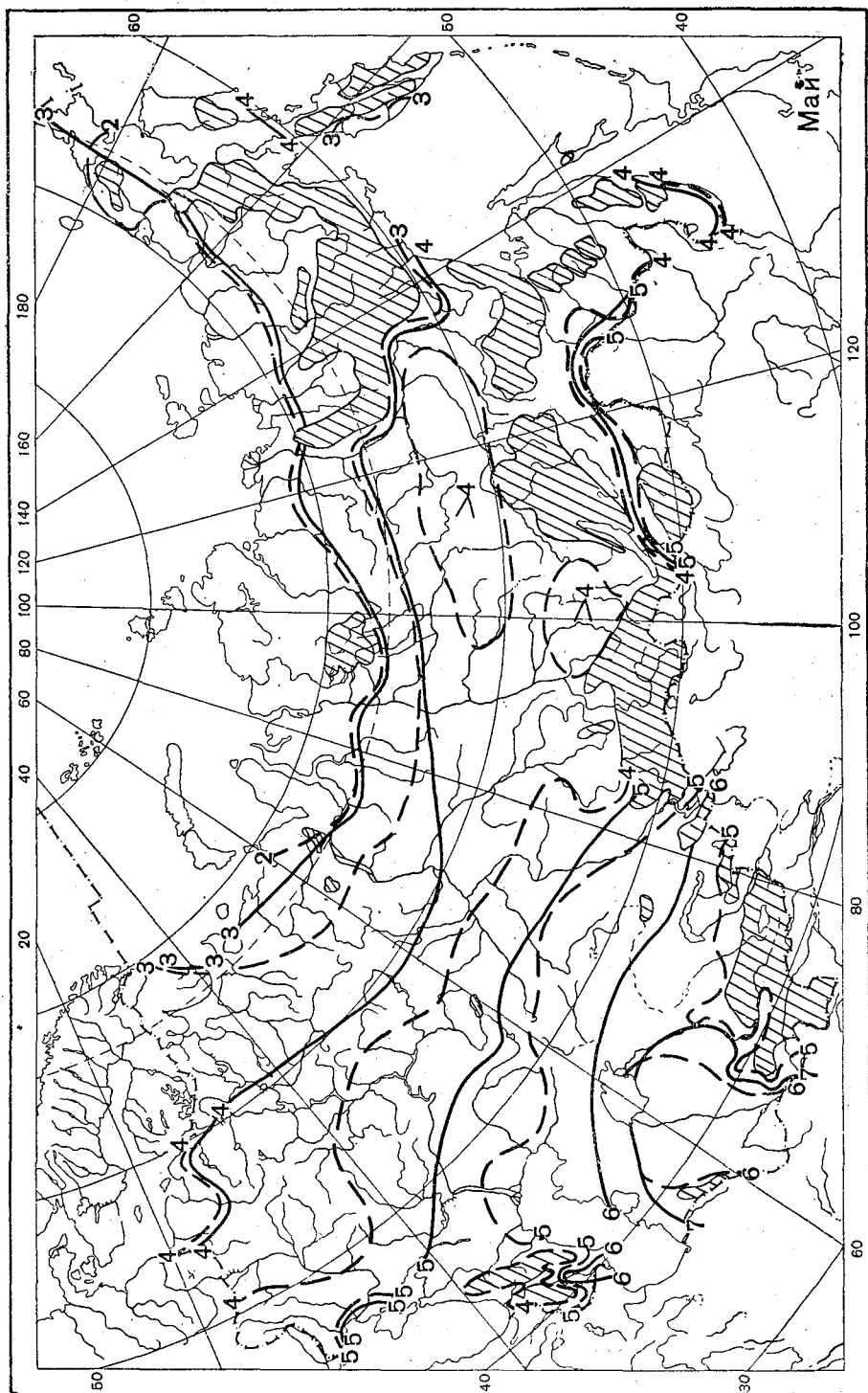


Рис. 6.

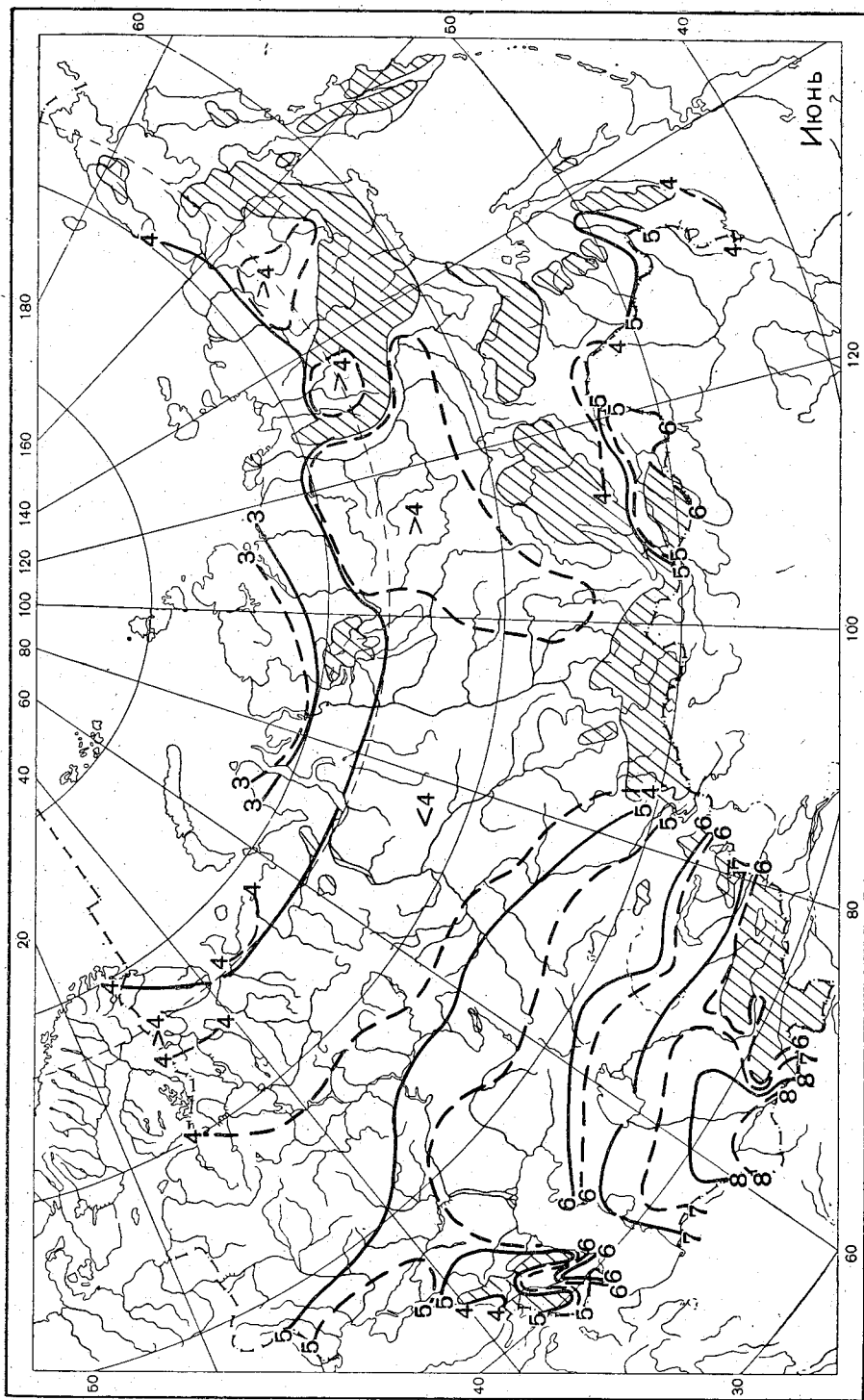


Рис. 7.

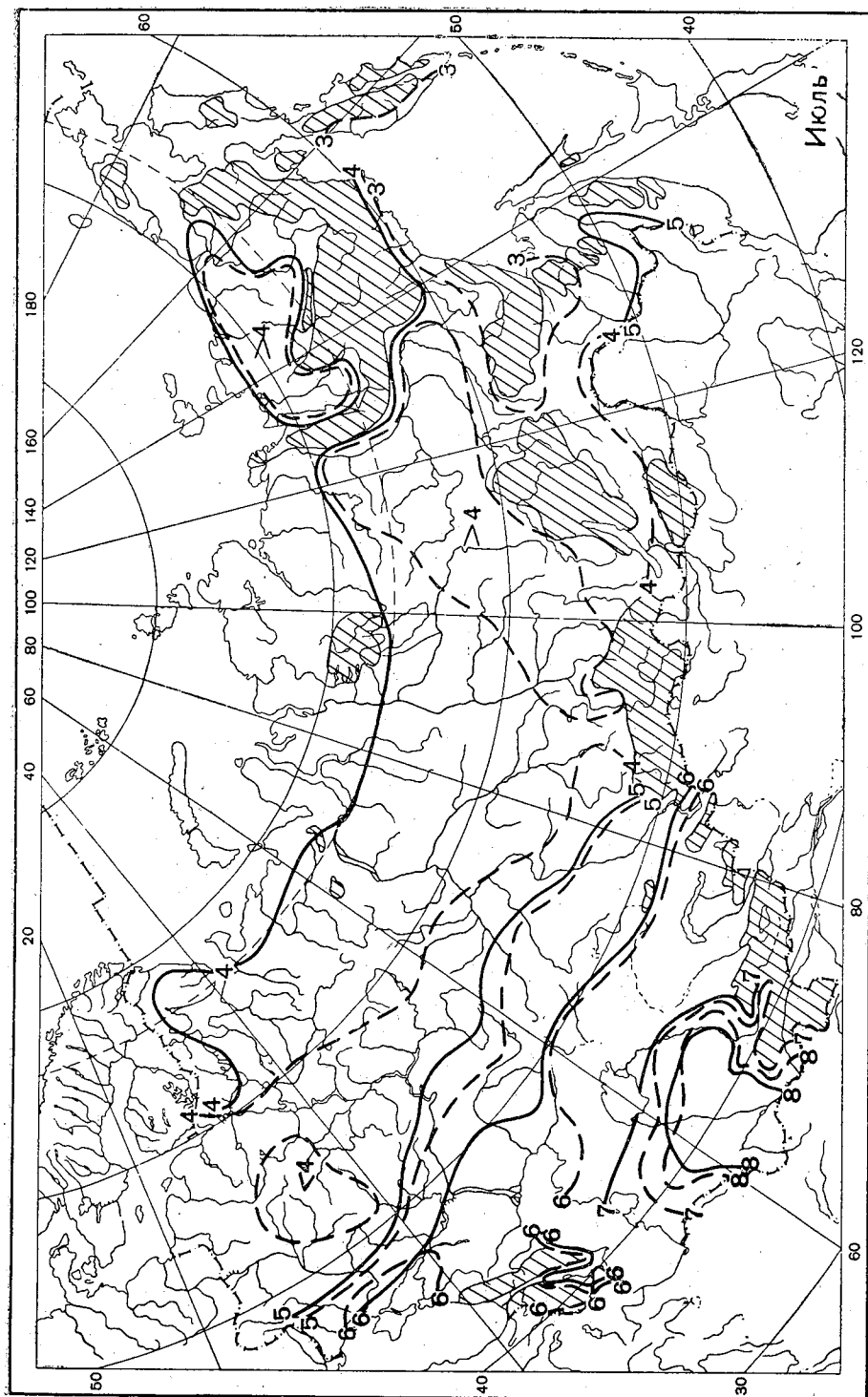


Рис. 8.

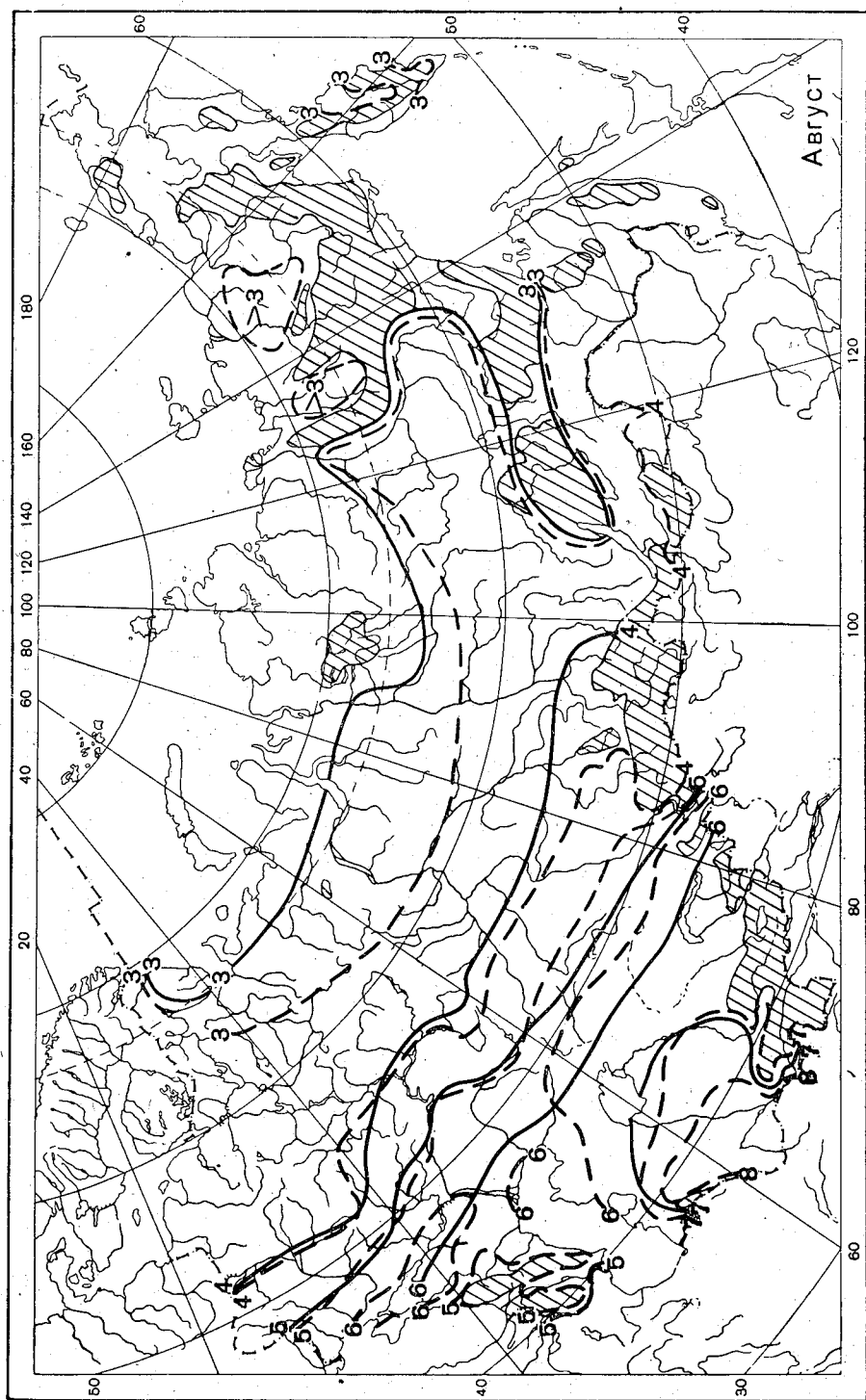


Рис. 9.

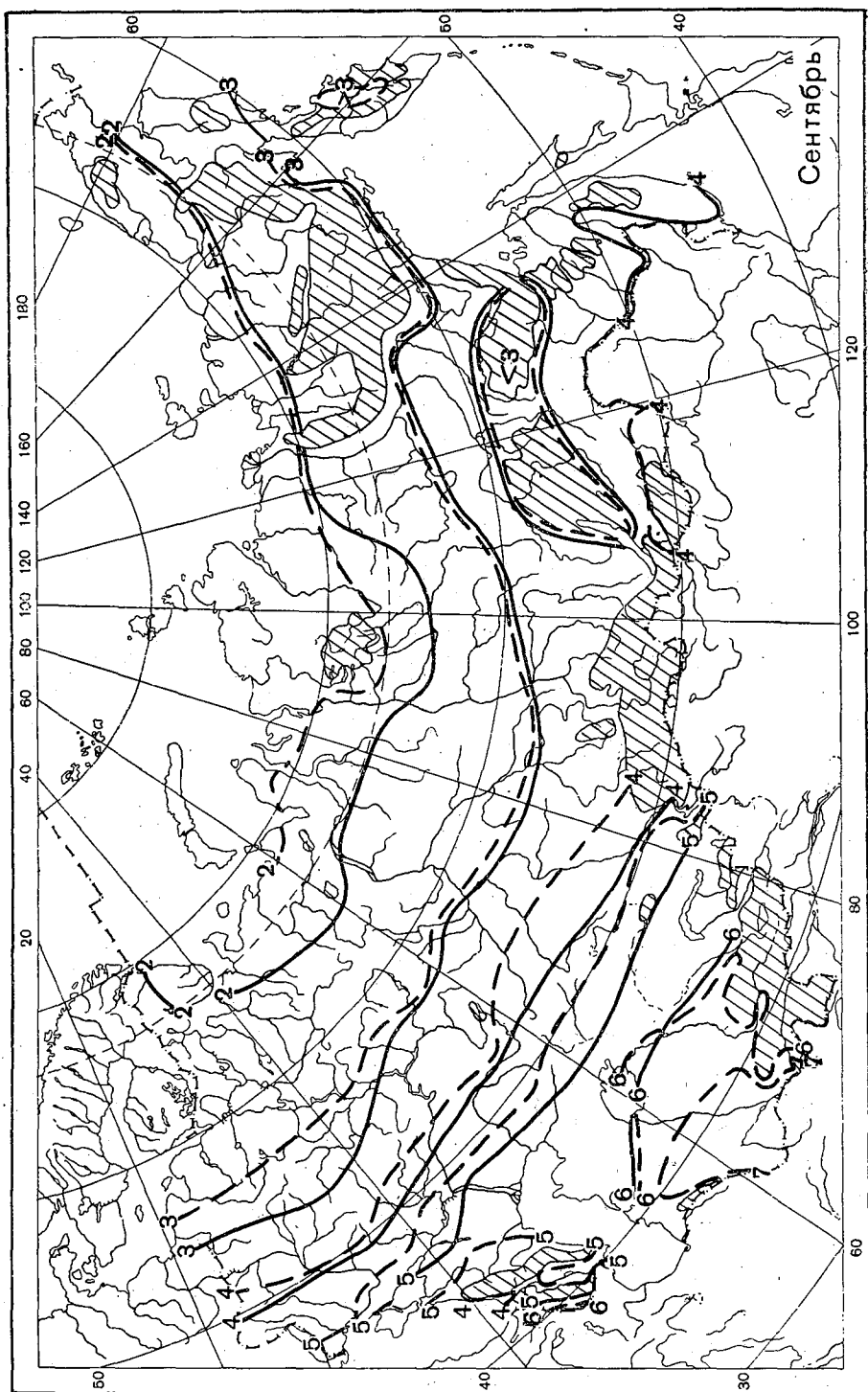


Рис. 10.

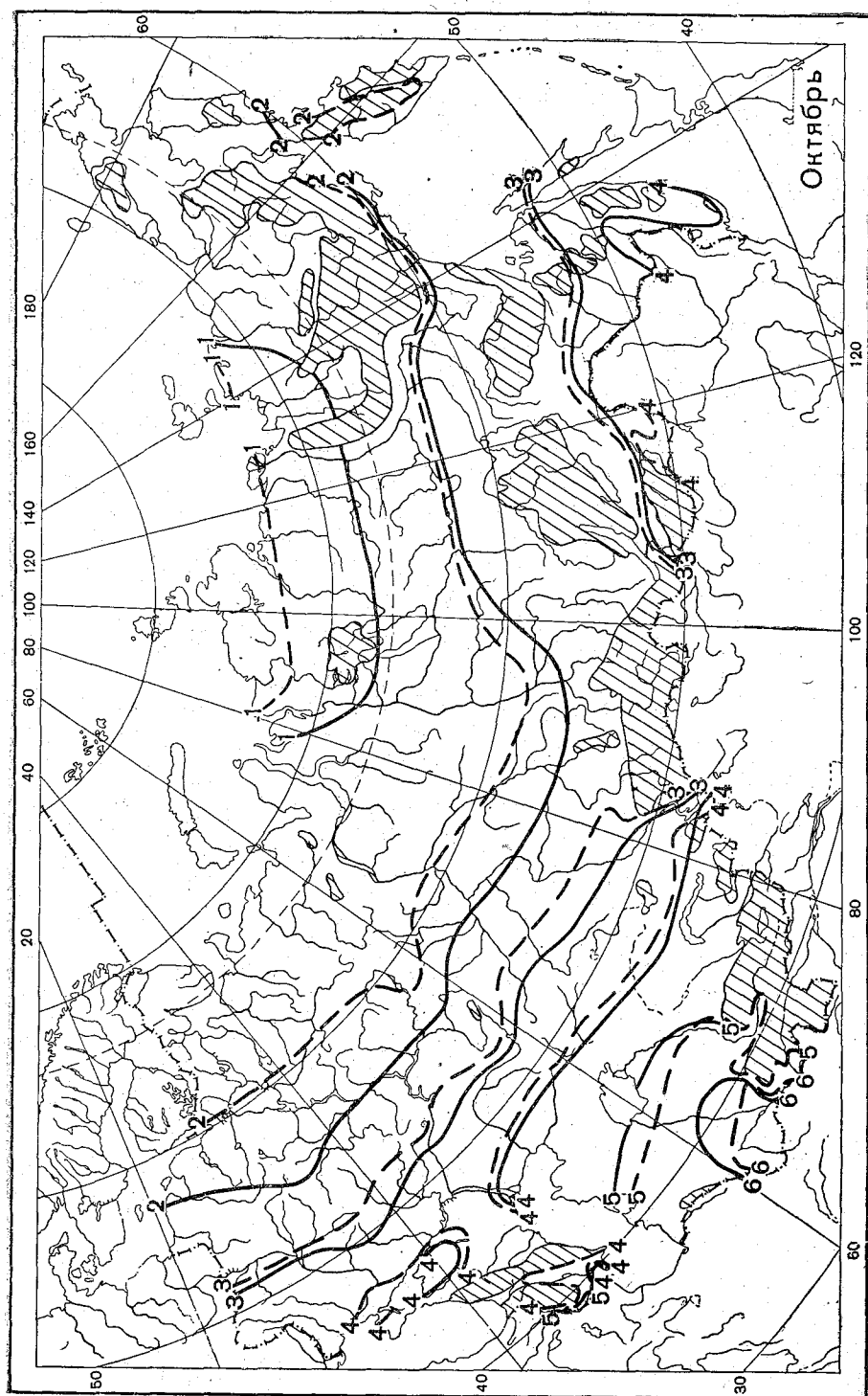


Рис. 11.

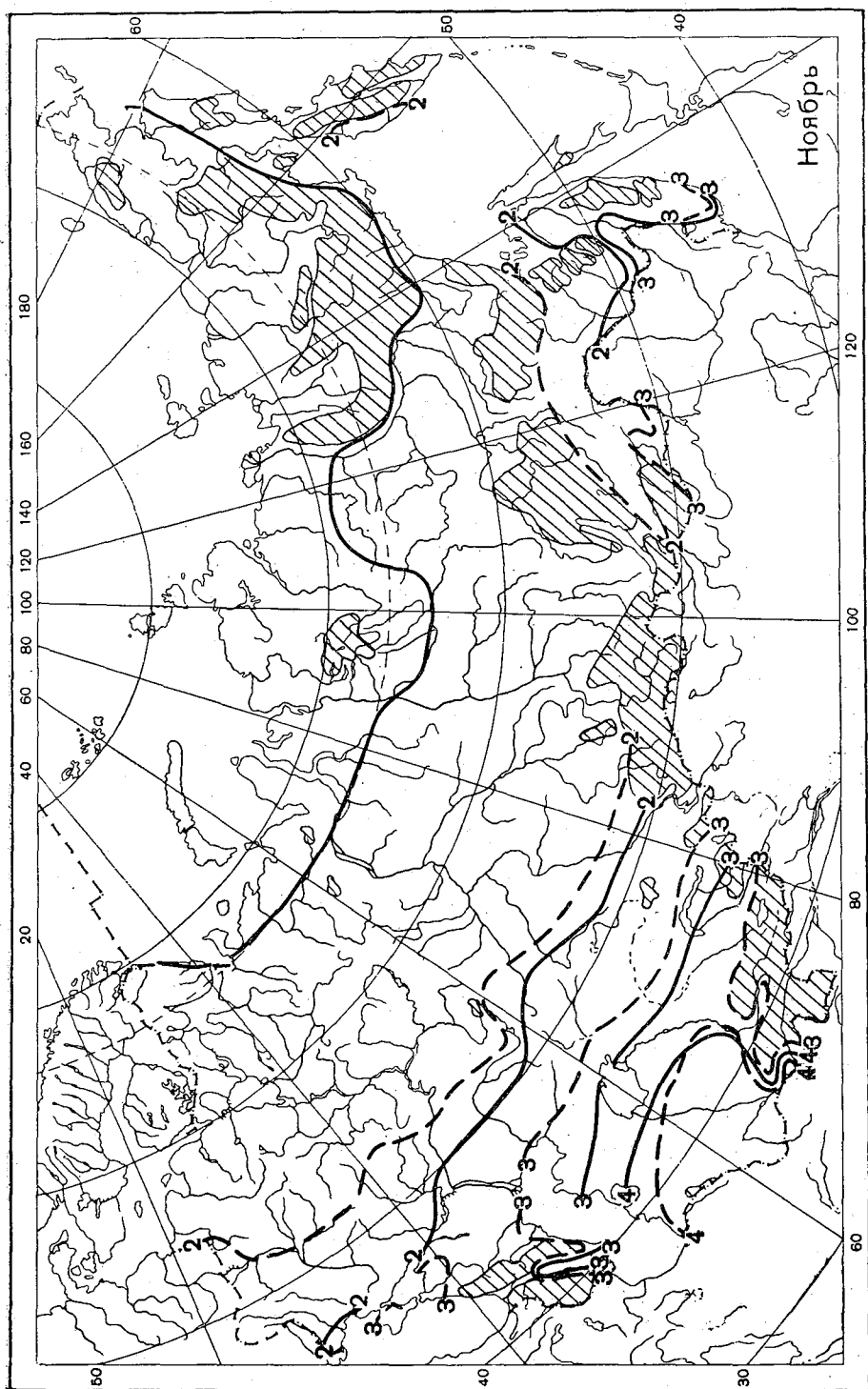


Рис. 12.

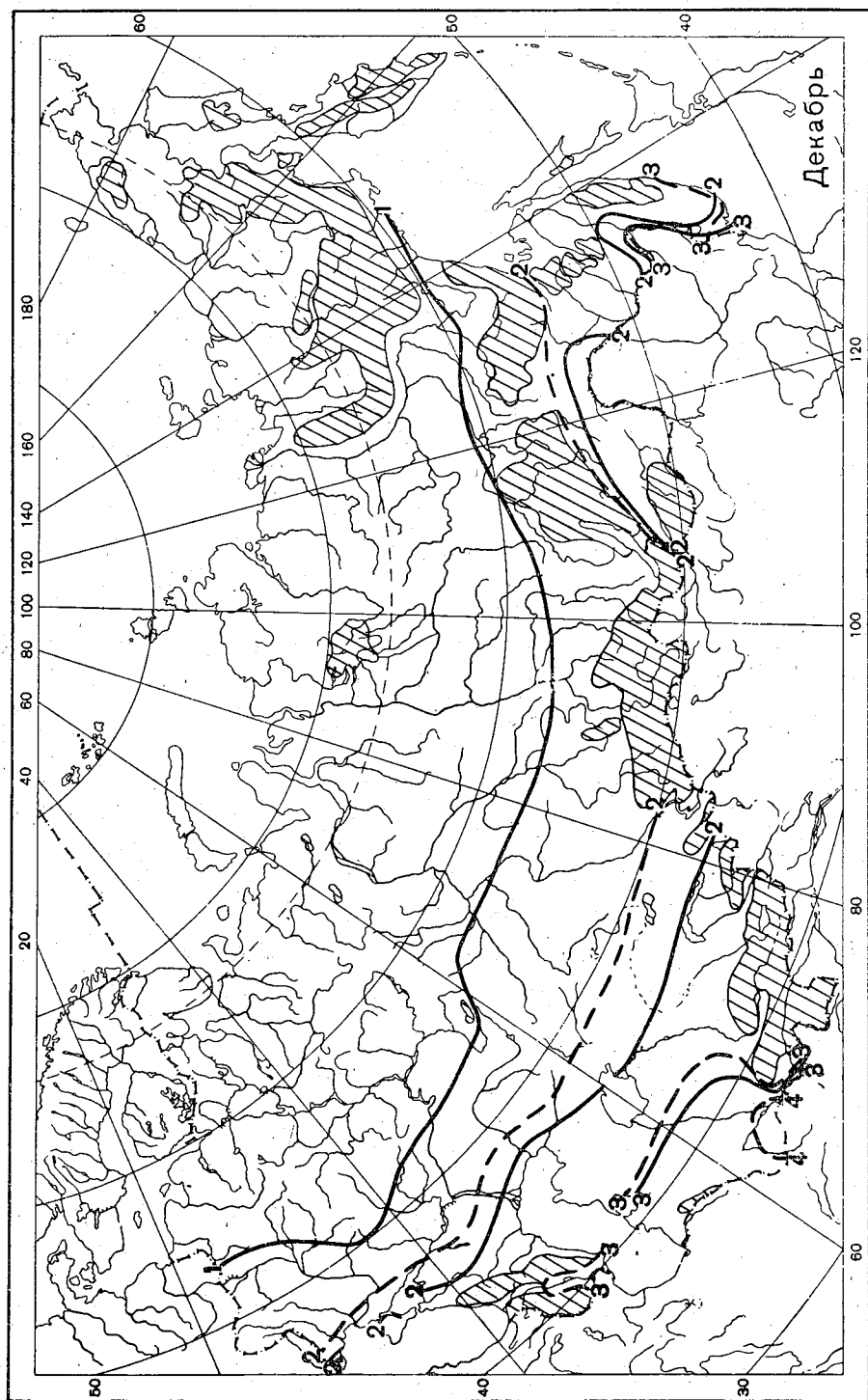


Рис. 13.

Весной с увеличением притока тепла на всей территории СССР наблюдается рост эффективного излучения. Оно меняется от значений, меньших 2 ккал/см<sup>2</sup> мес. на севере, до величин, больших 5 ккал/см<sup>2</sup> мес. на юге Средней Азии. В апреле и мае  $\Sigma_m E_{\text{эф}}$  меняется от 2 ккал/см<sup>2</sup> мес. на севере до 6—7 ккал/см<sup>2</sup> мес. на юге. Минимум в районе Сибирского плато и гор Путарано объясняется низкими температурами и значительной облачностью.

На ЕТС и в Прибалтике' изолинии изгибаются к югу, что также можно объяснить увеличением облачности.

В теплый период (июнь, июль, август) месячные суммы эффективного излучения достигают годового максимума. На юге Средней Азии они доходят до значений, больших 8 ккал/см<sup>2</sup> мес. В этом районе наблюдаются самые высокие в Советском Союзе температуры и незначительная облачность.

В сентябре, октябре, ноябре величина эффективного излучения постепенно уменьшается до 1 ккал/см<sup>2</sup> мес. на севере и до 4 ккал/см<sup>2</sup> мес. на юге.

В заключение следует отметить, что сопоставление измеренных величин эффективного излучения и соответствующих рассчитанных значений дает возможность убедиться в довольно хорошем их совпадении.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андреева Н. Н. Результаты исследований чувствительности балансомеров и пиргеометров. Труды ААНИИ, т. 223, 1960.
2. Андреева Н. Н., Маршукова М. С. Применение термоэлектрических балансомеров и пиргеометров для определения эффективного излучения. Метеорология и гидрология, № 4, 1955.
3. Барашкова Е. П., Гаевский В. Л., Дьяченко Л. Н., Лугина К. М., Пивоварова З. И. Радиационный режим территории СССР. Гидрометеоздат, Л., 1961.
4. Берлянд Т. Г. Распределение солнечной радиации на континентах. Гидрометеоздат, Л., 1961.
5. Берлянд М. Е., Берлянд Т. Г. Определение эффективного излучения земли с учетом влияния облачности. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 1, 1952.
6. Будыко М. И., Берлянд Т. Г., Зубенок Л. И. Методика климатологических расчетов составляющих теплового баланса. Труды ГГО, вып. 48 (110), 1954.
7. Дьяченко Л. Н. Годовой и широтный ход эффективного излучения земной поверхности. Научн. сообщ. ин-та геол. и геогр. АН ЛитССР, т. XIII, 1962.
8. Ефимова Н. А. К методике расчета месячных величин эффективного излучения. Метеорология и гидрология, № 10, 1961.
9. Ефимова Н. А. и Строкина Л. Распределение эффективного излучения на поверхности земного шара. Труды ГГО, вып. 139, 1963.
10. Лебедева К. Д., Сивков С. И. О точности измерения радиационного баланса термоэлектрическими балансомерами. Труды ГГО, вып. 129, 1962.

## ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ОБЛАКОВ И ТУМАНОВ МЕТОДОМ МАЛЫХ УГЛОВ

Обсуждается выбор параметров оптической системы прибора и его электрического фотометра. Описан построенный в ГГО макет прибора.

### Введение

После подробного изучения лабораторной установки для определения микроструктуры методом малых углов [1]—[4] и анализа погрешностей, возникающих в реальных оптических системах фотометра с приемной линзой и подвижной диафрагмой в фокусе этой линзы [5, 6], в ГГО в 1959 г. был изготовлен макет полевого прибора. Здесь мы рассмотрим вопросы, связанные с расчетом оптической и электрической систем прибора, конструкцию макета, его основные параметры и формулы для обработки экспериментальных индикатрис.

### Принципиальная схема прибора

Принципиальная схема оптической части прибора практически не отличается от описанной ранее лабораторной установки [3, 4]. В дальнейшем будем иметь в виду оптическую систему и обозначения, представленные на рис. 1.

### К расчету параметров оптической системы прибора

1. Рассмотрим основные ограничения и исходные данные. Предполагаем, что всюду выполняются следующие условия:

а) оптическая плотность исследуемой мутной среды (тумана)  $\tau \ll 1$  для исключения вторичного рассеяния; будем считать  $\tau \sim 0,1 \div 0,3$ ;

б) расстояние между отдельными частицами не менее  $5\lambda$  для исключения интерференционных явлений;

в) мутная среда (туман) обладает статистической однородностью расположения частиц в освещенном объеме;

г) все частицы (капли) имеют сферическую форму (или мало отличаются от нее);

д) геометрия и параметры оптической системы фотометра выбираются так, чтобы систематическими погрешностями, описанными в [6], можно было пренебречь;

е) угловые размеры диафрагмы приемника света  $D_3$  не превышают  $1^\circ$  (обычно  $0,1$ — $0,2^\circ$ );

ж) свет от источника можно считать монохроматическим для всех радиусов  $a$ .

Подробнее остановимся на условиях «е» и «ж».

2. Предельное угловое разрешение  $\alpha_{\text{пред}}$  фотометра определяется соотношением (рис. 1).

$$\alpha_{\text{пред}} = \frac{1}{2} \frac{D_3}{f_{L_3}} \quad (1)$$

и в свою очередь определяет верхний предел оптической системы по размерам частиц

$$a_{\text{max}} \simeq \frac{\lambda}{\beta_{\text{min}}}, \quad \beta_{\text{min}} \gg \alpha_{\text{пред}} \quad (2)$$

и количество света, падающее на чувствительный элемент фотометра

$$\Phi^*(\beta) = \frac{\pi D_3^2}{4} I(\beta) = \pi f_{L_3}^2 \alpha_{\text{пред}}^2 I(\beta), \quad (3)$$

где  $\Phi^*$  — световой поток в диафрагму  $D_3$ ,  $I(\beta)$  — интенсивность рассеянного света в направлении  $\beta$ .

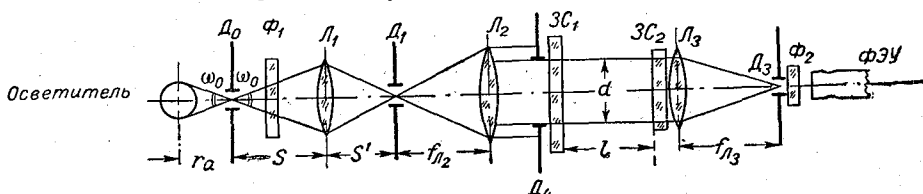


Рис. 1. Оптическая система фотометра дифракционного структуромера.

$D_0$  — диафрагма источника света,  $\Phi_1$  — светофильтр,  $L_1$  — линза конденсора,  $D_1$  — входная диафрагма коллиматора,  $L_2$  — линза коллиматора,  $ЗС_1$  и  $ЗС_2$  — защитные стекла,  $L_3$  — линза приемника света,  $D_3$  — подвижная диафрагма,  $D_4$  — ирисовая диафрагма,  $\Phi_2$  — светофильтр, ФЭУ — фотоумножитель.

При выборе оптимального  $\alpha$  возникают трудности, связанные, во-первых, с нелинейностью шкалы углов  $\beta$ : отношение  $\frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha}$  уменьшается ( $\Delta\alpha = \text{const}$ ) при  $\beta \rightarrow 0$  и  $\alpha \rightarrow \alpha_{\text{max}}$  и, во-вторых, с общим уменьшением  $\beta_{\text{min}}$  при  $\alpha \rightarrow \alpha_{\text{max}}$ . Это видно, например, из рис. 2, на котором представлено положение первого дифракционного максимума в зависимости от  $\alpha$  ( $\lambda = 0,5$  мк).

Для увеличения чувствительности фотометра к рассеянному свету желательно увеличить диаметр  $D_3$ , однако это уменьшает  $\alpha_{\text{пред}}$  и, следовательно, ухудшает условия регистрации света от крупных частиц. Поэтому обычно исходят из заданного  $a_{\text{max}}$ , определяют  $\beta_{\text{min}}$  по формуле (2) и выбирают  $D_3$  и  $\alpha$  по формуле (1) так, чтобы получить не менее 20—30 независимых точек распределения  $I(\beta)$  в интервале  $0 - \beta_{\text{min}}$ . Так, для  $a_{\text{max}} = 20 \div 30$  мк и  $\beta_{\text{min}} \approx 1,5 \div 2^\circ$   $\alpha$  составляет 3—6'.

В приземных и искусственных туманах подавляющее большинство частиц имеет размеры  $a = 2 \div 15$  мк и спектры  $f(a)$  не простираются далее 30 мк. Таким образом, можно воспользоваться значениями  $\alpha_{\text{пред}} = 5 \div 10'$ , причем необходимо, чтобы  $\omega_0 < \alpha$  ( $\omega_0$  — остаточная расходимость пучка, выходящего из осветителя; см. [6]).

3. Допустимую немонохроматичность света можно определить из соотношения

$$\rho = \frac{2\pi}{\lambda} a, \quad (4)$$

задаваясь значениями  $a_{\text{max}}$  и  $\pm \Delta\alpha$  (обычно  $\Delta\alpha = \pm 0,5$  или  $\pm 1$  мк). На рис. 3 приводится зависимость  $\rho$  от  $a$  для  $\lambda = 0,2$  (0,1); 0,5; 0,55 и 0,6 мк. При допустимой погрешности  $\Delta\alpha = \pm 0,5$  мк и  $a_{\text{max}} \simeq 30$  мк  $\Delta\lambda = \pm 10 \div$

$\div 20$  мкм. Заметим, что интерференционные фильтры имеют полосу пропускания (на уровне 0,5) 10—15 мкм, т. е. могут быть использованы в малоугольном фотометре.

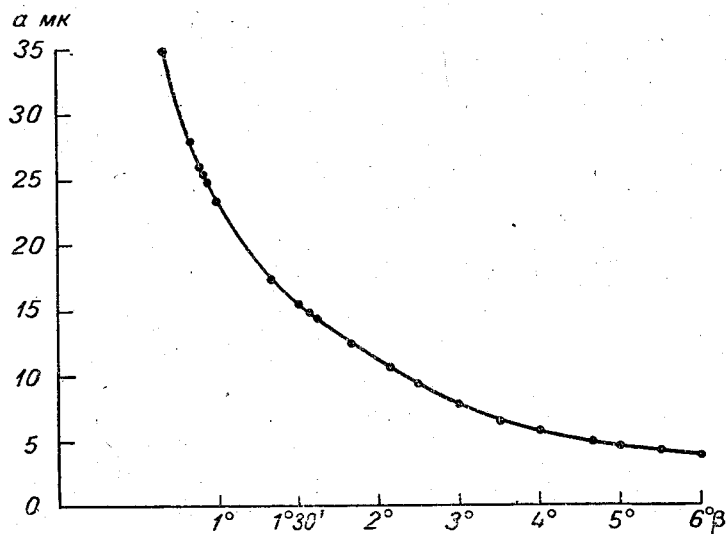


Рис. 2. Зависимость угла рассеяния  $\beta_{\text{диф}}$  от радиуса капель  $a$  ( $\lambda = 0,5$  мкм).

4. Основные исходные данные для расчета оптической системы (рис. 1): интервал размеров исследуемых частиц  $a_{\text{max}}$ ,  $a_{\text{min}}$ ; желаемая

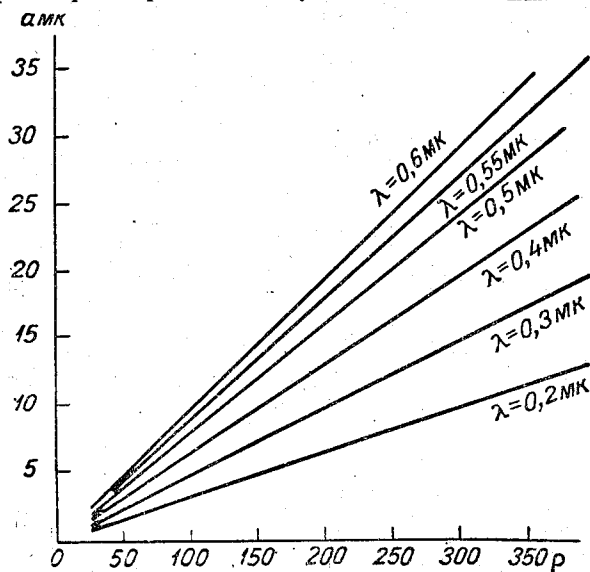


Рис. 3. Зависимость  $\rho$  от  $a$  для различных длин волн  $\lambda$ .

точность определения ординаты спектра размеров  $f(a)$ ; концентрация частиц в единице объема  $n_{\text{max}}$ ,  $n_{\text{min}}$ ; общие габаритные размеры устройства (ограничения по длине, весу и т. п.).

а) Будем считать в дальнейшем, что  $a_{\text{max}} = 30 \div 40$  мкм, причем большинство капель имеют радиус от 1—2 до 15—20 мкм (искусственные и приземные туманы).

б) Общая точность метода малых углов определяется точностью исходных теоретических формул, фотометрирования рассеянного света и графической обработки экспериментальных индикатрис  $I(\beta)$  [4, 10]. Точность формул у нижней границы метода (вблизи  $\rho=20\div30$ ) оценена в [10] и составляет около 5—10%, причем для больших  $\rho$  она значительно выше. Точность графической обработки 5—12% (см. [4, 10]).

Таким образом, если требуется измерить спектр размеров  $f(a)$  с точностью, например, до 10—15%, то необходимо обеспечить фотометрирование  $I(\beta)$  в интервале углов  $\beta=0\div12^\circ$  с точностью  $\pm 5\%$  или даже выше.

Поскольку общая точность фотометрирования определяется многочисленными факторами: величиной и перепадом интенсивностей (до  $10^5\text{—}10^6$  в интервале  $\beta=0\div12^\circ$ ), стабильностью питания, усилителей и источника света, скоростью записи сигнала регистрирующими устройствами и т. п., то при разработке макета полевого прибора можно ограничиться точностью измерения  $I(\beta)$  в пределах 5—10%, которая в дальнейшем будет упоминаться, как «теоретическая точность фотометра».

в) Минимальная концентрация капель  $n_{\min}$  определяет чувствительность фотометра к рассеянному свету и лежит в основе расчета усилительных систем фотометра. Максимальная концентрация  $n_{\max}$  ограничивает применимость прибора из-за вторичного рассеяния. Как показывают многочисленные исследования (см., например, [7]),  $n_{\min}=50\div100$  1/см<sup>3</sup> (слабый туман),  $n_{\max}=500\div600$  1/см<sup>3</sup> (плотный туман).

г) Общие габаритные размеры — длина и вес для полевого прибора — выбираются минимальные, однако для первого макета жестко не ограничивались.

#### 5. Рассчитаем параметры оптической части прибора.

а. Из теории вероятностей и различных литературных данных по микроструктуре облаков и туманов (например, [8]) следует, что для полного статистического заполнения спектра  $f(a)$  необходимо подсчитывать не менее  $N_{\min}=1500\div3000$  частиц. В этом случае можно гарантировать, что измеренный спектр  $f_i(a)$  не является спектром случайной выборки (пробы), а относится ко всей исследуемой полидисперсной системе (туману).

Число  $N_{\min}=1500\div3000$  можно обеспечить двумя путями: 1) через некоторый фиксированный объем осуществляют протяжку тумана со скоростью, необходимой для «просмотра»  $N_{\min}=1500\div3000$  частиц за время измерения  $I(\beta)$  в данном направлении  $\beta$ , или 2) задаваясь значениями  $n_{\min}$ , определить объем  $V_{\min}$ , содержащий это же количество частиц. Последний случай особенно интересен, так как дает возможность исследовать  $I(\beta)$  без механических нарушений микроструктуры

$$V_{\min} = \frac{N_{\min}}{n_{\min}} = \frac{3000}{50 \text{ 1/см}^3} = 60 \text{ см}^3. \quad (5)$$

Объем  $V_{\min}$  связан с диаметром светового пучка  $d$ , длиной пути светового пучка в тумане  $l_{\max}$ , углом  $\beta_{\max}$  и диаметром приемного объекта  $D_{\text{л}}$ :

$$V_{\min} = \frac{\pi d^2}{4} l \simeq 0,8 d^2 l_{\max}, \quad (6)$$

$$\beta_{\max} \leq \frac{D_{\text{л}} - d}{2 l_{\max}}. \quad (7)$$

Отсюда диаметр светового пучка

$$d = \sqrt{\frac{V_{\min}}{0,8 l_{\max}}} \quad (8)$$

и диаметр приемной линзы

$$D_{Л_3} = 2\beta_{\max} l_{\max} + \sqrt{\frac{V_{\min}}{0,8 l_{\max}}} \quad (9)$$

Примем  $a_{\min} = 2$  мк,  $\lambda = 0,4$  мк. Тогда [9]:

$$\rho_{\min} = \frac{2\pi}{\lambda} a_{\min} = \frac{2 \cdot 3,14}{0,4} \cdot 2 \approx 30, \quad (10)$$

$$\beta_{\max} \approx \frac{6}{\rho_{\min}} = 0,2; \quad \beta_{\max} \approx 12^\circ. \quad (11)$$

Подставляя значения  $\beta_{\max}$  и  $V_{\min}$  в (9), имеем

$$D_{Л_3} = 0,4 l_{\max} + \sqrt{\frac{75}{l_{\max}}} \quad (9a)$$

Задаваясь рядом значений  $l_{\max}$ , возможных при измерениях, подсчитаем диаметр  $D_{Л_3}$  по (9a), если  $a_{\min} = 2$  мк,  $\lambda = 0,4$  мк,  $\beta_{\max} = 12^\circ$  и  $V_{\min} = 60$  см<sup>3</sup>.

Таблица 1

|                         |     |     |     |     |     |      |      |      |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| $l_{\max}$ см . . . . . | 1   | 2   | 5   | 10  | 20  | 30   | 50   | 100  |
| $D_{Л_3}$ см . . . . .  | 9,1 | 6,2 | 5,9 | 6,7 | 9,9 | 13,6 | 21,2 | 40,9 |
| $d$ см . . . . .        | 75  | 5   | 3,9 | 2,7 | 1,9 | 1,6  | 1,2  | 0,87 |

Данные табл. 1 показывают характер изменений  $D_{Л_3}$  в зависимости от  $d$  и  $l$  при постоянных  $\beta_{\max}$  и  $V_{\min}$ . Для точного определения  $l_{\max}$  и  $D_{Л_3}$  необходимо учесть также  $n_{\max}$  и  $\tau$

$$\tau = 2\pi a^2 n l. \quad (12)$$

В табл. 2 содержатся значения  $\tau$  для монодисперсного тумана с  $a$ , равным 2, 5, 10, 15, 20, 25 мк;  $n$  равным 10, 50, 500 1/см<sup>3</sup> при  $l = 10, 20, 30$  см.

Из этой таблицы видно, что в туманах с каплями радиусом  $a = 2 \div 30$  мк и концентрациями  $n_{\max}$  до 500 1/см<sup>3</sup> можно работать со световыми базами  $l_{\max} \leq 30$  см, сохраняя  $\tau \ll 1$  ( $\tau \sim 0,1 - 0,5$ ).

Взяв для определенности  $l_{\max} = 30$  см и полагая  $d_{\max} = 3$  см ( $d_{\min} = 1,6$  см, что соответствует  $V_{\min} = 60$  см<sup>3</sup>, см. табл. 1), получим для  $D_{Л_3}$  по формуле (7) или (9)

$$D_{Л_3} = d + 12 \text{ см} = \begin{cases} 13,6 \text{ см} \\ 15,0 \text{ см} \end{cases} \quad (13)$$

Поскольку у обычных объективов  $D_{Л_3} \approx \left(\frac{1}{10} + \frac{1}{12}\right) f_{Л_3}$  (см. [3, 6]), то естественно ожидать значений  $f_{Л_3}$  порядка 100—150 см, а  $D_{Л_3}$  при  $\alpha = 5 \div 10'$  (см. выше) около 1—5 мм.

б. Уточним значения  $f_{Л_3}$  исходя из  $a_{\max}$ ,  $\beta_{\min}$ ,  $\lambda$  и  $\alpha_{\text{пред}}$ . Предположим, что  $D_3 = 1$  мм, а  $\alpha = \frac{\beta_{\min}}{20}$  (при необходимости иметь не менее

Таблица 2

| $n$ 1/см <sup>3</sup> | $l$ см | $a$ мк | $\tau$              | $a$ мк | $\tau$              | $a$ мк | $\tau$              |
|-----------------------|--------|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|
| 10                    | 10     | 2      | $2,6 \cdot 10^{-6}$ | 5      | $1,6 \cdot 10^{-4}$ | 10     | $6,3 \cdot 10^{-4}$ |
|                       | 20     |        | $5,0 \cdot 10^{-6}$ |        | $3,2 \cdot 10^{-4}$ |        | $1,3 \cdot 10^{-3}$ |
|                       | 30     |        | $7,5 \cdot 10^{-6}$ |        | $4,8 \cdot 10^{-4}$ |        | $1,9 \cdot 10^{-3}$ |
| 50                    | 10     | 2      | $1,3 \cdot 10^{-5}$ | 5      | $7,8 \cdot 10^{-3}$ | 10     | 0,003               |
|                       | 20     |        | $2,5 \cdot 10^{-5}$ |        | $1,6 \cdot 10^{-3}$ |        | 0,006               |
|                       | 30     |        | $3,8 \cdot 10^{-5}$ |        | $2,4 \cdot 10^{-3}$ |        | 0,009               |
| 500                   | 10     | 2      | $1,3 \cdot 10^{-4}$ | 5      | $7,8 \cdot 10^{-3}$ | 10     | 0,003               |
|                       | 20     |        | $2,5 \cdot 10^{-4}$ |        | 0,016               |        | 0,006               |
|                       | 30     |        | $3,8 \cdot 10^{-4}$ |        | 0,024               |        | 0,009               |
| 10                    | 10     | 15     | 0,001               | 20     | 0,0025              | 25     | 0,004               |
|                       | 20     |        | 0,002               |        | 0,005               |        | 0,008               |
|                       | 30     |        | 0,003               |        | 0,0075              |        | 0,012               |
| 50                    | 10     | 15     | 0,007               | 20     | 0,013               | 25     | 0,02                |
|                       | 20     |        | 0,014               |        | 0,029               |        | 0,04                |
|                       | 30     |        | 0,021               |        | 0,39                |        | 0,06                |
| 500                   | 10     | 15     | 0,07                | 20     | 0,13                | 25     | 0,2                 |
|                       | 20     |        | 0,14                |        | 0,29                |        | 0,4                 |
|                       | 30     |        | 0,21                |        | 0,39                |        | 0,6                 |
| 10                    | 10     | 30     | 0,006               |        |                     |        |                     |
|                       | 20     |        | 0,012               |        |                     |        |                     |
|                       | 30     |        | 0,018               |        |                     |        |                     |
| 50                    | 10     | 30     | 0,03                |        |                     |        |                     |
|                       | 20     |        | 0,06                |        |                     |        |                     |
|                       | 30     |        | 0,09                |        |                     |        |                     |
| 500                   | 10     | 30     | 0,3                 |        |                     |        |                     |
|                       | 20     |        | 0,6                 |        |                     |        |                     |
|                       | 30     |        | 0,9                 |        |                     |        |                     |

20 точек для построения хода  $I(\beta)$  в интервале  $\beta=0 \div \beta_{\min}$ . Остальные параметры оптической системы соответствуют пункту «а».

$$\left. \begin{aligned}
 \rho_{\max}(\min) &= \frac{2\pi}{\lambda} a_{\max}(\min) \\
 \beta_{\min} &\simeq \frac{\lambda}{a_{\max}} \\
 \beta_{\max} &= 12^\circ \\
 \lambda &\text{ равно } 0,4; 0,55; 0,7 \text{ мк} \\
 \alpha &= \frac{\beta_{\min}}{20} \\
 f_{\text{см}} &= \frac{L_3 \text{ см}}{\alpha \text{ рад.}} \\
 a_{\max} &\text{ равно } 15, 20, 30, 40 \text{ и } 50 \text{ мк}
 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Анализ данных табл. 3 показывает, что:

1) при измерениях капль с  $a=2 \div 30$  мк необходимо использовать длиннофокусные объективы ( $f_{\text{л}_3} \simeq 40 \div 150$  см);

2) при работе с крупнокапельными системами выгоднее пользоваться светом с  $\lambda=0,6 \div 0,7$  мк, с мелкокапельными —  $0,5-0,4$  мк; это позволяет несколько улучшить результаты подсчета спектра размеров по основной формуле метода малых углов, так как для самых мелких частиц можно пользоваться значениями  $\rho \geq 20 \div 30$  [10];

Таблица 3

| Основ-<br>ные<br>парамет-<br>ры | $a_{\max} = 15$ мк |                  |                 | $a_{\max} = 20$ мк |                  |                 | $a_{\max} = 30$ мк |                  |                 |
|---------------------------------|--------------------|------------------|-----------------|--------------------|------------------|-----------------|--------------------|------------------|-----------------|
|                                 | $\lambda = 0,4$    | $\lambda = 0,55$ | $\lambda = 0,7$ | $\lambda = 0,4$    | $\lambda = 0,55$ | $\lambda = 0,7$ | $\lambda = 0,4$    | $\lambda = 0,55$ | $\lambda = 0,7$ |
| $\rho_{\max}$                   | 236                | 171              | 135             | 314                | 228              | 179             | 471                | 342              | 269             |
| $\rho_{\min}$                   | 31                 | 23               | 18              | 31,4               | 23               | 18              | 31,4               | 23               | 18              |
| $\varphi_{\min}$                | 1°30'              | 2°6'             | 2°40'           | 1°9'               | 1°30'            | 2°              | 44'                | 1°3'             | 1°16'           |
| $\alpha$                        | 4,5'               | 6'               | 8'              | 3,4'               | 4,5'             | 6'              | 2,2'               | 3'               | 3,8'            |
| $f$ см                          | 71                 | 56               | 43              | 111                | 71               | 56              | 167                | 111              | 83              |

| Основ-<br>ные<br>парамет-<br>ры | $a_{\max} = 40$ мк |                  |                 | $a_{\max} = 50$ мк |                  |                 |
|---------------------------------|--------------------|------------------|-----------------|--------------------|------------------|-----------------|
|                                 | $\lambda = 0,4$    | $\lambda = 0,55$ | $\lambda = 0,7$ | $\lambda = 0,4$    | $\lambda = 0,55$ | $\lambda = 0,7$ |
| $\rho_{\max}$                   | 628                | 456              | 356             | 785                | 570              | 448             |
| $\rho_{\min}$                   | 31,4               | 23               | 18              | 31,4               | 23               | 18              |
| $\varphi_{\min}$                | 34'                | 47'              | 1°              | 30'                | 40'              | 1°7'            |
| $\alpha$                        | 1,7'               | 2'               | 3'              | 1,5'               | 2'               | 3'              |
| $f$ см                          | 167                | 167              | 111             | 167                | 167              | 111             |

3) угловое разрешение  $\alpha$ , равное 2—3', трудно выполнить на практике из-за остаточной расходимости светового пучка ( $\omega_0 < \alpha$ , см. [6]), однако для туманов с преобладающими размерами капель в области 2—20 мк вполне достаточны значения  $\alpha = 5 \div 10'$ .

в) Итак, для работы с приземными туманами с  $a = 2 \div 30$  мк,  $f_{\max}(a)$ , лежащими в области 2—15 мк, и концентрациями  $n = 50 \div 500$  1/см<sup>3</sup> имеем следующие параметры оптической части фотометра:  $l_{\max} = 30$  см;  $\beta = 12^\circ$ ;  $V_{\min} = 60$  см<sup>3</sup>;  $1,6 \leq d \leq 3$  см (без протяжки тумана через освещенный объем);  $D_3 = 1$  мм;  $\alpha = 5 \div 10'$ ;  $\lambda = 0,4 \div 0,7$  мк;  $D_{\text{Л}} = 10 \div 15$  см;  $f_{\text{Л}_3} \leq 100 \div 150$  см. Нами были использованы сменные ахроматические объективы с  $f_{\text{Л}_3} = 36$  и 50 см,  $D_{\text{Л}_3} = 12$  см и интерференционные светофильтры с  $\lambda$ , равным 0,4; 0,546 и 0,6 мк с шириной пропускания не более 12 мкм.

г) При расчете коллиматора, конденсора и осветителя обычное в таких случаях требование максимального использования светосилы источника не является главным. Основные требования к конденсору и коллиматору: 1) обеспечить равномерную и стабильную освещенность диафрагмы  $D_1$  и линзы  $L_2$  коллиматора (рис. 1); 2) получить на выходе коллиматора параллельный пучок монохроматического света с равномерным распределением освещенности в поперечном сечении пучка  $d \geq 1,6$  см во всем освещенном объеме на пути  $l_{\max} \approx 30$  см; 3) остаточная расходимость параллельного пучка должна быть минимальной или во всяком случае  $\omega_0 < \alpha$ ; 4) устранить весь посторонний свет, рассеянный или отраженный диафрагмами, оправами объективов и стеклами линз или идущий от менее стабильных и неравномерных по яркости частей тела накала; 5) обеспечить такое общее увеличение  $\gamma$  телескопической системы линз  $L_1, L_2, L_3$ , чтобы изображение источника света (диафрагмы  $D_0$ , рис. 1) в фокальной плоскости  $L_3$  было сравнимо с величиной подвижной диафрагмы  $D_3$  ( $\gamma D_0 \leq D_3$ ).

Расчет конденсора и коллиматора производится обычными методами, описанными в литературе, например в [14] и [15]. Для выполнения перечисленных здесь требований к коллиматору и конденсорам в схеме рис. 1 приняты следующие меры: для использования наиболее яркой и стабильной по яркости части тела накала (или плазмы) источника света устанавливается дополнительная диафрагма; диаметр и фокусные расстояния линз  $L_1$ ,  $L_2$  выбираются с учетом  $\omega_0 = \frac{2D_{L_1}}{f_{L_2}} < \alpha$  и  $d \geq d_{\min}$  ( $d_{\min} = 1,6$  см,  $\alpha \simeq 10'$ ); для полного заполнения линзы  $L_2$  светом, поступающим из конденсора, необходимо также, чтобы  $\frac{D_{L_1}}{S'} = \frac{D_{L_2}}{f_{L_2}}$ , где  $S'$  — расстояние до изображения источника света (до места установки диафрагмы  $D_1$ ). Наиболее удобна система конденсора из двух линз с параллельным пучком света между ними, так как в этом промежулке можно установить оптические ослабители, светофильтры и другие вспомогательные оптические детали; для устранения паразитного рассеянного и отраженного света служат диафрагмы  $D_0$ ,  $D_1$ ,  $D_4$ , а также дополнительные диафрагмы между  $D_1$  и  $D_2$  (на рис. 1 не показаны); общее увеличение определяется соотношением

$$D'_0 = \gamma D_0 = \frac{f_{L_2}}{f_{L_1}} D_0 \leq D_3. \quad (15)$$

д) Исходя из интервала размеров капель, подлежащих измерениям  $a = 2 \div 30$  мк ( $f_{\max}(a)$  в области  $2-15$  мк); минимальной и максимальной концентрации их  $n = 50-500$  1/см<sup>3</sup> и теоретической точности фотометрирования  $I(\beta)$ , равной  $\pm 5 \div 10\%$ , были получены следующие параметры оптической системы малоугольного фотометра (рис. 1):  $D_1 = 1$  мм;  $D_{L_2} = 1$  см,  $f_{L_1} = 5$  см;  $D_{L_2} = 5$  см,  $f_{L_2} = 45$  см;  $D_{L_3} = 12$  см,  $f_{L_3}$  равно 36, 50 или 70 см;  $D_3 = 1$  мм;  $\lambda$  равно 0,4; 0,55; 0,7 мк ( $\pm 0,012$  мк);  $\beta_{\max} = 12^\circ$ ;  $l_{\max} = 30$  см;  $V_{\min} = 60$  см<sup>3</sup> (без протяжки тумана). Расхождение светового пучка не более  $1-3'$  (при  $\alpha = 10'$ ). Точность центровки осветителя и приемника света  $\nu_0 = 0,1 \div 0,2^\circ$ . Разрешающая способность светоприемника по углу  $\beta$  при указанном  $l_{\max} = 30$  мк  $\alpha \simeq 5-10'$  (в реальной системе  $\alpha = 8-10'$ ). Линзы  $L_2$ ,  $L_3$  — склеенные ахроматы, исправленные на сферическую и хроматическую абберацию и кривизну поля.

### К расчету электрической части прибора

1. При расчете электрической части фотометра требуется решить следующие задачи:

а) определить перепад освещенностей в фокальной плоскости линзы  $L_3$  светоприемника для реальных распределений  $f(a)$  в туманах в интервале углов  $\beta = 0 \div \beta_{\max}$  ( $0 \div 12^\circ$  в нашем случае);

б) выбрать фотоэлектрический приемник света с подходящей спектральной характеристикой, достаточной чувствительностью и линейностью во всем диапазоне измеряемых световых потоков;

в) решить вопрос о необходимости усиления сигнала и выбрать схему усилителя;

г) выяснить требования к стабилизации источников питания осветителя, фотоэлемента и усилителей;

д) исходя из времени, необходимого для сбора полной информации о микроструктуре тумана в виде  $I(\beta)$  во всем интервале  $\beta = 0 \div \beta_{\max}$ , достаточной для построения полного спектра  $f(a)$ , определить тип самописца-регистратора, его электрические характеристики (чувствительность, инерцию и т. д.) и необходимую скорость записи  $I(\beta)$ ;

е) уточнить данные о мощности источника света, определить световую шкалу фотометра.

2. Перепад интенсивностей рассеянного света  $\xi$  (световой диапазон фотометра) определяется как

$$\xi = \frac{\Phi_0}{\Phi^*}, \quad \Phi^* = \frac{\pi D_3^2}{4} I(\beta_{\max}), \quad (16)$$

где  $\Phi_0$  — световой поток в диафрагме чувствительного элемента в направлении  $\beta=0$ ,  $\Phi^*$  — то же в направлении  $\beta_{\max}$ .

Для оценки  $\xi$  удобно воспользоваться теоретическими кривыми распределения капель туманов по размерам в виде так называемого четырехпараметрического распределения

$$f(a) = Aa^\nu e^{-\Delta a}. \quad (17)$$

Различными авторами найдено, что в приземных туманах можно считать  $\nu=2 \div 8$ ,  $\gamma=1$ . Если принять во внимание, что ширина спектра размеров  $\Delta\varepsilon = \frac{\Delta a}{a_{\max}}$  и параметры  $\nu$ ,  $\Delta$  связаны соотношениями:

$$\Delta\varepsilon \simeq \frac{2,48}{\sqrt{\nu}}, \quad a_{\max} = \frac{\nu}{\Delta}, \quad (18)$$

то для интересующего нас интервала  $\Delta a = 2 \div 30$  мк имеем  $\Delta \simeq 0,08 \div 4$  и  $\Delta\varepsilon \simeq 1 \div 1,8$ . Таким образом, распределения  $f(a)$  в приземных туманах относятся к так называемым «почти монодисперсным» системам.

Интенсивность в направлении  $\beta$  можно рассчитать по формуле

$$\frac{I(\beta)}{I_0 n} = \frac{4\pi^2}{\lambda^2 \Delta^4} \frac{\mu^{\nu+5}}{\Gamma(\nu+1)} \varphi_{\nu+2}(\mu), \quad (19)$$

где  $n$  — число частиц в единице объема,  $\mu = \frac{\lambda \Delta}{2\pi} \frac{1}{\beta}$ ;  $\Gamma(\nu+1)$  — гамма-функция,  $\varphi_{\nu+2}(\mu)$  — вспомогательная функция [1].

Расчеты по формулам (16) и (19) дают для  $a = 2 \div 30$  мк,  $\Delta = 4 \div 0,08$ ,  $\Delta\varepsilon = 1 \div 2$  и  $n = 50 \div 500$  1/см<sup>3</sup> значения  $\xi = 10^3 - 10^5$ . Таким образом, световой поток  $\Phi^*$  на входе чувствительного элемента может изменяться в  $\xi = 10^5$  раз.

3. В качестве чувствительного элемента при  $\xi = 10^5$  удобно использовать фотоумножители (ФЭУ), обладающие большой чувствительностью и линейностью световой характеристики в широком диапазоне световых потоков. Фотоумножители позволяют производить измерения в спектральном интервале 0,3—0,6 мк и при  $\xi = 10^5 \div 10^{10}$  [11].

4. Так как для повышения разрешающей способности светоприемника фотокатод ФЭУ имеет диафрагму малого диаметра  $D_3$  и для работы самопишущих устройств типа фоторегистратора на выходе фотометра требуется значительная электрическая мощность, то необходимо применять усиление сигнала, снимаемого с нагрузки в аноде ФЭУ.

Методика расчета усилителей электрического фотометра имеется в целом ряде широко известных работ (см., например, [11, 12, 13]).

В последнее время появились автоматические электронные потенциометры типа ЭППВ-51, позволяющие производить измерения фото-токов непосредственно с анодной нагрузки ФЭУ [17]. Возможно также применение усилителей с логарифмической характеристикой, позволяющих записать весь световой диапазон  $I(\beta)$  (или хотя бы наиболее существенную часть его) на одной диаграмме.

Наиболее рациональны усилители переменного тока (фотометр с модулированным световым сигналом). В первом макете прибора был использован усилитель постоянного тока, описанный в [3].

4. Для стабилизации питания осветительной лампы должны быть приняты специальные меры. Обычное барретирование не дает хороших результатов, поэтому применяют устройства, состоящие из дополнительного фотоэлемента, включенного на одно из сопротивлений делителя высоковольтного питания ФЭУ [12]. При изменениях интенсивности источника света изменяется освещенность на фотокатоде, и фототок фотоэлемента, протекающий через сопротивления делителя ФЭУ, изменяет режим питания динодов ФЭУ и компенсирует нестабильность источника света.

5. При измерениях плавно меняющихся  $I(\beta)$  требуются ФЭУ с постоянной чувствительностью. Однако практика работы с ФЭУ [12] показывает, что чувствительность ФЭУ может изменяться из-за утомления эммитеров, особенно при больших  $i_{\phi}$ . Утомление имеет место даже при очень слабых токах, но снижение чувствительности при этом меньше, а время восстановления стационарного режима больше. При проведении точных измерений лучше, если  $i_{\phi}$  на выходе ФЭУ не превышает  $10^{-6}$ — $10^{-7}$  а, что при указанных здесь параметрах оптической системы (см. рис. 1) соответствует световым потокам  $\Phi_{\max}^* \simeq 10^{-3}$  лм.

Желательно отобрать экземпляры ФЭУ с минимальным значением темнового тока  $i_{\tau}$ .

6. Постоянство характеристик ФЭУ зависит также от стабильности питания его элементов. Если измерения нужно производить с точностью до 1%, то точность стабилизации питающих напряжений должна быть  $\frac{1}{n_k}\%$ , где  $n_k$  — число каскадов умножения. У нас теоретическая точность фотометра  $\pm 5 \div 10\%$ , число каскадов 9—13, т. е. точность стабилизации  $\pm 0,1\%$ . Можно использовать сухие элементы с высокой э. д. с. и малой емкостью, так как потребление тока в цепях питания ФЭУ невелико.

7. Стабилизация усилителей осуществляется феррорезонансным стабилизатором и стабилвольтами в цепях анода. Для усилителей постоянного тока следует иметь в виду экспериментально установленный факт [13], что для большинства ламп с оксидным катодом изменение напряжения накала  $U_f$  на 10% дает изменение напряжения  $U_{\text{вых}}$ , равноценное действию сигнала на входе  $U_{\text{вх}} = 0,1$  в. Таким образом, при стабилизации усилителя в наших условиях требовалась точность до  $\pm 0,025 \div 0,05\%$ . Стабилизация накала с такой точностью требует применения электронной стабилизации или питания последовательно включенных ламп от высоковольтного источника со сглаживающим фильтром, снижающим пульсации тока накала. Как показано в [12], подобные схемы могут обеспечить стабилизацию до  $\pm 0,1 \div 0,05\%$  и значительно снизить дрейф нуля усилителя.

8. Расчет скорости сканирования  $I(\beta)$  в интервале углов  $\beta = 0 \div \beta_{\max}$  производится с учетом необходимой точности фотометрирования ( $\pm 5 \div 10\%$ ), постоянной времени усилителя и регистрирующего прибора, а также времени, необходимого для сбора информации о микроструктуре тумана (от 0,5 до 2 мин. в применяемых в настоящее время методах измерения спектра  $f(a)$ , например, поточными ловушками).

Длина хода механической развертки (перемещение диафрагмы  $D_3$ ) при  $\beta_{\max} = 12^\circ$  и  $f_L = 36$  см

$$L_{\beta_{\max}} = \beta_{\max} f_{L_3}, \quad L_{12^\circ} \simeq 75 \text{ мм.} \quad (20)$$

Время изменения  $U_{\text{вых}}$  при скачке напряжения на входе усилителя и регистратора (время реакции) [13]

$$t_p = 5\tau, \quad (21)$$

где  $\tau$  — постоянная времени усилителя. За время  $t_p$   $U_{\text{вых}}$  достигает своего максимального значения, и  $U_{\text{вх}} \sim i_{\text{ф}}$  воспроизводится в этом случае без искажений. Для регистраторов типа К-4-51 и ПС-1-02 имеем соответственно:  $\tau_1 = 0,25$  сек.;  $\tau_2 = 2$  сек. и  $t_{p_1} = 1,25$  сек.;  $t_{p_2} = 10$  сек.

Скорость перемещения диафрагмы  $D_3$  (скорость механической развертки) при полном использовании разрешающей способности системы  $L_3, D_3$  (рис. 1) будет

$$v_a = \frac{L_a}{t_p} = \frac{\alpha f_{L_3}}{t_p}. \quad (22)$$

Для  $\alpha = 10'$  и  $t_p$ , равного 1,25 и 10 сек., имеем соответственно  $L_a \approx 1,05$  мм,  $v_1 \approx 0,8$  мм/сек. и  $v_2 \approx 0,1$  мм/сек.

Полное время записи кривой распределения рассеянного света в интервале углов  $\beta = 0 - \beta_{\text{max}}$

$$T_{\pi} = \frac{L_{\beta_{\text{max}}}}{v_a}, \quad (23)$$

что составляет 1,5 мин. для К-4-51 и 12,5 мин. для ПС-1-02.

Так как  $t_p$  рассчитывалось в предположении  $U_{\text{вых}} = U_{\text{max}}$ , а реальные изменения  $\frac{\Delta I}{\Delta \beta}$  не превышают обычно  $\frac{1}{2} - \frac{1}{3}$  всей шкалы самопишущего прибора (например, при записи «венца»), то можно считать  $T_{\pi} = 1,5$  и 12,5 мин. завышенными. В случае если имеем дело с полидисперсным туманом с мало меняющейся плотностью во времени, то можно вести здесь запись  $I(\beta)$  с указанными самописцами в интервале  $\beta = 0 - \beta_{\text{max}}$  за время  $\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}\right) T_{\pi}$ .

Длина интервала  $\beta = 0 - \beta_{\text{max}}$  на ленте самописца, т. е. расход бумаги на запись одного распределения  $I(\beta)$

$$L'_{\beta_{\text{max}}} = \frac{v'}{v} \beta_{\text{max}} f_{L_3}, \quad (24)$$

где  $v$  — скорость механической развертки (скорость перемещения),  $v'$  — скорость хода ленты самописца.

Ввиду того что перепад интенсивностей  $\xi$  от 0 до  $\beta_{\text{max}}$  — величина чрезвычайно изменчивая и зависит от таких трудно контролируемых в процессе записи факторов, как спектр  $f(a)$  и концентрация  $n$ , то полезно иметь возможность варьировать скорости  $v'$ . В этом случае фоторегистратор К-4-51, имеющий набор скоростей  $v' = 0,05 - 10$  мм/сек., является наиболее удобным.

При обработке лент самописца удобно пользоваться переводным коэффициентом  $k$

$$k = \frac{v}{v' f_{L_3}}, \quad (25)$$

показывающим, какое число угловых минут приходится на единицу длины перемещения ленты самописца.

9. После расчета основных параметров оптики малоугольного фотометра и его электрической части можно определить необходимую яркость источника света. Для этого нужно подсчитать возможные потери света во всех оптических деталях системы на рис. 1.

Если потери на отражения  $r$  на поглощение  $k$  и  $r$  равно 4% для кронов и 5% для флинта, а  $k=0,5 \div 2\%$  на пути в стекле  $L=1$  см ([14, 15], то коэффициент пропускания системы оптических стекол будет

$$\tau_0 = (1 - \bar{r})(1 - \bar{k}) = 0,96^{N_1} \cdot 0,95^{N_2} \cdot 0,98^L, \quad (26)$$

где  $N_1$  — число преломлений на кронах,  $N_2$  — на флинтах.

С учетом пропускания светофильтра в системе конденсора  $\tau_{\phi_1}$  и геометрии конденсора и коллиматора имеем для светового потока, выходящего в мутную среду,

$$\Phi_{k, \lambda} = \tau_0 \tau_{\phi_1} B_0 \omega \frac{\pi D_0^2}{4} = A \tau_0 \tau_{\phi_1} B_0, \quad (27)$$

где  $B_0$  — искомая яркость источника света, а

$$\omega = \frac{\pi D_0^2}{4r_a'^2} = \frac{\pi D_{\phi_1}^2}{4s'^2}. \quad (28)$$

Все обозначения согласно рис. 1.

При отсутствии рассеяния к приемнику света придет световой поток

$$\Phi_{\text{пр}, \lambda} = \tau_{\phi_2} \tau_2 \tau_{\text{опт. ос}} A B_0 \quad (29)$$

где  $\tau_{\phi_2}$  — пропускание фильтра в системе приемника света,  $\tau_1 = \tau_0 \tau_{\phi_1}$ ,  $\tau_{\text{опт. осл}}$  — пропускание дополнительного ступенчатого ослабителя.

Так как общее увеличение  $\gamma$  системы линз  $L_2, L_3$  таково, что  $D_0' = \gamma D_0 < D_3$ , то весь поток  $\Phi_{\text{пр}, \lambda}$  будет принят чувствительным элементом:  $\Phi_{\text{пр}, \lambda} = \Phi_0^*$ .

Яркость источника определится как

$$B_0 = \frac{\Phi_{\text{max}}^*}{\tau_{\phi_2} \tau_2 \tau_{\text{опт. осл}} A}, \quad (30)$$

где  $\Phi_{\text{max}}^* = \Phi_0^* \simeq 10^{-3}$  лм (см. выше).

Расчеты по формулам (26) — (30) для конкретной оптической системы, использованной нами в макете полевого прибора (см. § 5), дают для  $B_0$  значения  $10^3$ — $10^4$  стильб. Такие яркости можно получить с помощью ртутных ламп типа СВДШ-250-3 и даже от ламп накаливания с вольфрамовой нитью специальной формы, например, в виде конической спирали.

Расчеты светового потока  $\Phi^*(\beta_{\text{max}})$ , соответствующего различным распределениям  $f(a)$  и  $\Phi_0^* = 10^{-3}$  лм производятся по формулам (16) — (19). При существующем  $\xi = 10^5$  фотометр работает в диапазоне световых потоков от  $10^{-3}$  до  $10^{-8}$  лм.

После изготовления фотометра производится его градуировка с калиброванным источником света и проверка линейности световой шкалы.

## Макет полевого дифракционного структуромера

1. **Общий вид.** Принципиальная оптическая схема прибора соответствует указанной на рис. 1. Общий вид прибора приводится на рис. 4. В состав блоков 8, 11 входят элементы счетно-решающего устройства (см. [10, 11]). Для установки прибора можно применять специальную тележку 12. При транспортировке прибора блоки 1, 7, 8, 9 и 10 разъединяются. При монтаже прибора в полевых условиях блоки 1,

3, 4—6, 7, 8 легко соединяются без дополнительной подрегулировки. Общее время подготовки прибора к работе после его транспортировки не превышает 30 мин.

**2. Основные параметры.** Макет полевого дифракционного структуромера предназначен в основном для работы с приземными туманами, поэтому были выбраны следующие параметры оптической части прибора и его электрического фотометра:  $D_0=1$  мм;  $D_{Л_1}=1,5\div 2$  см,  $f_{Л_1}=5$  см;  $D_{Л_2}=5$  см,  $f_{Л_2}=45$  см;  $D_{Л_3}=12$  см,  $f_{Л_3}$  равно 36, 50 или 73 см;  $D_3=0,5\div 1$  мм;  $\lambda$  равно 0,4; 0,546; 0,65 мк ( $\pm 0,012$  мк);  $\beta_{\max}=12^\circ$ ;  $l_{\max}=30$  см (может изменяться от 10 до 50 см);  $1,6\leq d\leq 3$  см (при отсутствии протяжки тумана);  $V_{\min}=60$  см<sup>3</sup> (не менее 3000 частиц в освещенном объеме при  $n_{\min}=50$  л/см<sup>3</sup>);  $\omega_0\approx 1-3'$ ;  $v_0\leq 0,1-0,2^\circ$ ;  $\alpha\approx 10'$ .

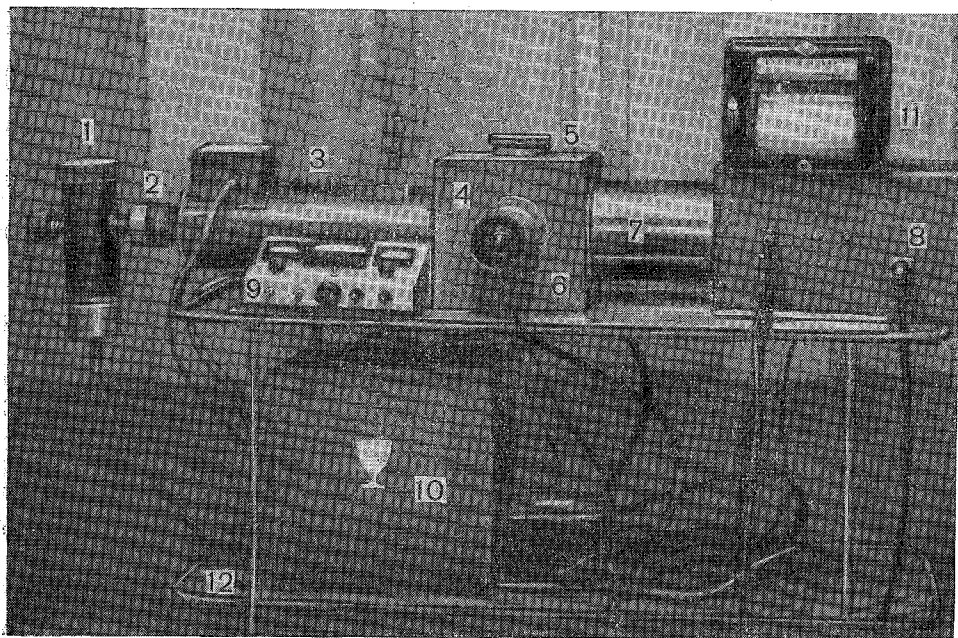


Рис. 4. Общий вид макета дифракционного структуромера.

1 — блок осветителя, 2 — конденсор, 3 — кожух коллиматора с оптическим ослабителем и световым затвором (внутри кожуха), 4 — камера тумана с устройством для забора тумана 5 и протяжки 6, 7 — приемник света с развертывающим устройством 8 и регистратором углового распределения рассеянного света 11, 9 — пульт управления, 10 — блок питания, 12 — специальная тележка для установки прибора.

щенном объеме при  $n_{\min}=50$  л/см<sup>3</sup>);  $\omega_0\approx 1-3'$ ;  $v_0\leq 0,1-0,2^\circ$ ;  $\alpha\approx 10'$ .

При указанных параметрах оптической системы имеется возможность работы с туманами, имеющими радиус капель 2—30 мк,  $f_{\max}(a)$  при 2—15 мк и минимальные концентрации  $n=50$  л/см<sup>3</sup>.

Для работы в дневных условиях предусмотрена защита от посторонней засветки: камера и заборное устройство. Скорость протяжки тумана  $v_n\geq 3$  м/сек. при расходе аэрозоля до 27 л/сек. При работе с протяжкой тумана снимается ограничение на минимальный диаметр светового пучка  $d_{\min}\geq 1,6$  см, т. е. можно работать с более тонкими пучками.

В электрическом фотометре прибора:

- а) диапазон световых потоков  $10^{-3}$ — $10^{-8}$  лм;
- б) поддиапазоны электрического ослабителя:  $10^{-3}$  ( $10^{-1}$ )  $10^{-8}$  лм;

в) ослабление нейтральным ступенчатым ослабителем внутри каждого поддиапазона от 0 до 90% через 10—30%;

г) точность фотометрирования световых потоков  $\Phi_{\text{min}} \approx 10^{-8}$  лм около  $\pm 8 \div 10\%$  (по данным градуировки прибора с плоскими и объемными моделями аэрозоля из сферических частиц метилметакрилата на плоском стекле или взвешенных в воде, см. [10]);

д) скорость механической развертки с электронным потенциометром ПС-1-02  $v_1 = 0,10$  мм/сек.; полное время записи  $I(\beta) T_1 = 12$  мин.; для К-4-51:  $v_2 \approx 0,8$  мм/сек. и  $T_2 \approx 1,5$  мин. Скорость лентопротяжного механизма у ПС-1-02  $v_1' = 60$  мм/мин.; у К-4-51  $v_2' = 300$  мм/мин.

Режимы питания электрического фотометра:

аноды ламп усилителя:  $U_a = 108 \div 110$  в ( $\pm 4,5$  в);

накал:  $U_f = 6$  в; 0,6 а ( $\pm 0,05\%$ );

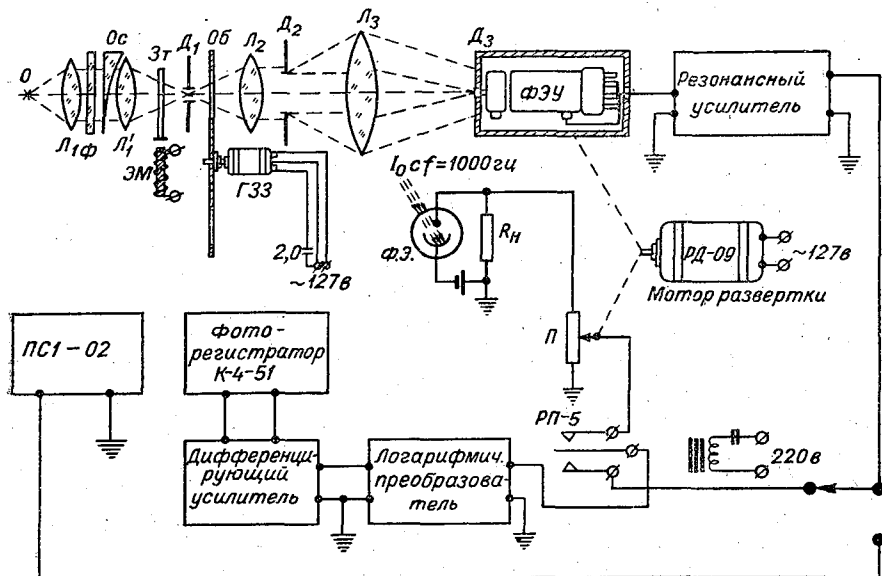


Рис. 5. Фотометр с модулированным световым сигналом (блок-схема).

М — синхронный мотор, Д — диск модулятора, ФТ — фототранзистор.

ФЭУ:  $U_{\text{выс}}$  равно 650 или 740 в (от батареи типа 315-ПМЦГ-80); сеть: 127 или 220 в ( $\pm 5\%$ );

лампа осветителя: 12 в, 100 вт (стабилизация тока бареттерами и светового потока дополнительным фотоэлементом, включенным в делитель высоковольтного питания ФЭУ).

Дрейф нуля после 0,5—1-часового прогрева усилителя не превышает 0,1—0,05% всей шкалы за 1 мин. (все регулировки нуля производятся на шкале фотометра  $10^{-8}$  лм).

Сеть 127 или 220 в подключается через стабилизатор типа СНЭ-500 или СТ-250. При работе в туманах на влажной земле необходимо заземлить корпус прибора.

**3. Фотометр с модулированным световым сигналом и логарифмической характеристикой.** Блок-схема такого фотометра, используемого нами, приводится на рис. 5. Частота модуляции светового потока  $f = 1000$  гц (или 100 гц в случае применения ртутных ламп в осветителе). На частоту модуляции настроен резонансный фильтр RC в виде T-образного моста, включенного в схему усилителя переменного тока.

Модулированный световой сигнал позволяет обнаруживать очень малые световые потоки на фоне дневного освещения, снижает помехи электрического происхождения, позволяет использовать быстродействующие регистраторы при записи  $I(\beta)$ , а также избавиться от камеры тумана и заборных устройств.

Вместо усилителя с линейной характеристикой мы применяли усилитель переменного тока (в лабораторных исследованиях) с логарифмической характеристикой, построенный по схеме, предложенной в [17], но отличающийся от нее применением узкополосного фильтра  $RC$  на частоту 1000 гц. Этот же усилитель используется в блоках устройства, моделирующего функцию  $\beta^3 I$ , входящую в основную формулу метода малых углов (см. [10]).

**4. Устройство для забора и протяжки тумана.** Применение камеры и заборных устройств в макете с постоянным световым сигналом связано лишь с необходимостью устранить посторонние засветки и тем самым несколько расширить применение макета (особенно днем).

Кроме того, протяжка тумана нужна, если приходится сравнивать результаты измерений с другими методами, предполагающими определенный, контролируемый расход аэрозоля (например, с поточными ловушками). Это особенно важно при работе в туманах с сильно изменчивой микроструктурой.

Чтобы обеспечить хорошую вентиляцию камеры и исключить возможность установления в ней своего микрорежима тумана, мы применяли скорости протяжки  $v_n \geq 3$  м/сек. с расходом аэрозоля не менее 27 л/сек. (полное обновление объема тумана в 1 сек.).

Применение замкнутой камеры тумана нежелательно из-за возможного рассеяния тумана при различии температур внутри камеры и снаружи. Запотевание стекол  $L_2$  и  $L_3$  также наиболее трудно контролировать в замкнутом объеме камеры. Для борьбы с запотеванием применяются специальные электрические подогреватели.

### Запись индикатрис. Контроль ослабления

а. Один цикл записи индикатрисы рассеяния должен состоять из измерения нулевого распределения  $I_0$  без рассеяния и измерения  $I(\beta)$  в интервале  $\beta = 0 \div 12^\circ$  с туманом, так как в формулу малых углов входит отношение  $\frac{I(\beta)}{I_0}$ .

Обычно при заданном диаметре светового пучка  $d$  и неизменном пропускании оптического ослабителя в системе коллиматора  $I_0$  — величина постоянная. Поэтому при измерениях относительных спектров  $f(a)$  можно не вычислять отношение  $\frac{I(\beta)}{I_0}$ , а брать ход  $I(\beta)$  в единицах световой шкалы фотометра или даже в миллиметрах отклонения пера самописца. Если при этом запись хода  $I(\beta)$  производилась на нескольких поддиапазонах фотометра, то при обработке удобно построить сводный график  $I(\beta)$  с учетом изменений масштаба записи при переходе от одной шкалы к другой.

б. При измерениях в естественных условиях оценить  $I_0$  трудно, так как невозможно исключить рассеивающую среду — туман. Поэтому обычно довольствуются измерениями  $I_0$  (и зависимости  $I_0$  от диаметра светового пучка  $d$ ) в лабораторных условиях или после рассеяния тумана.

Величина  $I_0$  нужна для контроля общего ослабления потока  $\Phi_0$  от источника света и оценки возможности появления вторичного рассеяния.

При измерениях обычно невозможно произвести разделение светового потока, рассеянного в направлении  $\beta=0$  и прошедшего в том же направлении без рассеяния. Однако для мелкокапельных туманов ( $a=2\div 15$  мк) поток  $\Phi(\rho\beta)$  сосредоточен в углах  $\beta_{\max} \leq 12^\circ$ , а угловые размеры диафрагмы фотометра  $D_3$  и изображения источника света составляют лишь несколько угловых минут (причем  $D_3$  несколько больше диаметра изображения источника света в фокальной плоскости  $L_3$ :  $D_3 > D_0'$ ,  $D_3 = 1$  мм и  $D_0' = 0,8$  мм в нашем случае (см. рис. 1).

По этой причине можно приближенно считать, что приемник света  $D_3$  в положении  $\beta=0$  будет собирать в основном невозмущенный поток  $\Phi(0)$

$$\Phi(0) = \Phi_0 - \Delta\Phi, \quad (31)$$

где  $\Delta\Phi$  — уменьшение светового потока  $\Phi_0$  вследствие рассеяния.

Для исключения вторичного рассеяния необходимо, чтобы

$$\tau = \frac{\Delta\Phi}{\Phi_0} \leq 0,1 \div 0,3. \quad (32)$$

Ослабление светового потока на пути в мутной среде приближенно можно рассчитать по формуле из [9]

$$\frac{\Phi_0}{\Phi(\beta)} = e^\tau. \quad (33)$$

Относительное ослабление

$$\left| \frac{\Delta\Phi}{\Phi_0} \right| = \frac{\Phi_0 - \Phi}{\Phi_0} = e^{-\tau} - 1 \simeq \tau. \quad (34)$$

Так как в эксперименте обычно измеряется «пропущенный» световой поток  $\Phi(0)$ , то условие (32) можно переписать в виде, более удобном для оценки пропускания,

$$\frac{\Phi(0)}{\Phi_0} = \frac{\Phi_0 - \Delta\Phi}{\Phi_0} = 1 - \tau \geq 0,9 - 0,7. \quad (35)$$

### Расчет спектра размеров по экспериментальным распределениям $I(\beta)$

Вопрос о расчете относительных спектров размеров  $f(a)$  освещен в [2, 3, 4].

Если измерять  $I_0$ ,  $I(0)$  и  $I(\beta)$  в абсолютных световых единицах, то можно рассчитать число капель в единице объема  $n_i$  и во всем освещенном объеме  $N = n_i V$ .

Имеем

$$f(\rho) = -\frac{2}{\rho^2} \int_0^\infty \varphi(\beta) F(\rho\beta) d\beta, \quad (36)$$

$$\varphi(\beta) = \frac{d}{d\beta} \left[ \pi\beta^3 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^3 \frac{I(\beta)}{I_0} \right], \quad (37)$$

$$f(\rho) = -\frac{16\pi^4}{\rho^2 \lambda^3 I_0} \int_0^\infty \frac{d}{d\beta} (\beta^3 I) F(\rho\beta) d\beta. \quad (38)$$

Так как

$$\left. \begin{aligned} \Phi^* &= \frac{\pi D_3^2}{4} I(\beta) \\ \Phi_0 &= \frac{\pi D_0'^2}{4} I_0 \\ \rho &= \frac{2\pi a}{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

то для числа капель в единице объема

$$n_i(a) = - \frac{4\pi^2}{a^2 \lambda \Phi_0} \frac{D_0'^2}{D_3^2} \int_0^\infty \frac{d}{d\beta} (\beta^3 \Phi^*) F(\rho\beta) d\beta, \left[ \frac{1}{\text{см}^3} \right], \quad (40)$$

где  $\Phi_0$  и  $\Phi^*(\beta)$  — потоки света, измеренные приемником с подвижной диафрагмой  $D_3$  в направлении  $\beta=0$  и  $\beta$ ;  $D_0'$  — диаметр изображения источника света в фокусе линзы светоприемника,  $F(\rho\beta)$  — табличная функция [1]—[3].

### О выборе оптимальных режимов фотометрирования под малыми углами

При измерениях микроструктуры золя с неизвестным спектром размеров распределение  $I(\beta)$  имеет вид монотонно спадающей кривой. Поэтому по видимому ходу кривой  $I(\beta)$  трудно определить ее участки, наиболее чувствительные к микроструктуре, которые следовало бы прописать с наибольшим угловым разрешением и чувствительностью приемника света.

Особенности хода  $I(\beta)$  наглядно выявляются лишь в случае монодисперсных систем («венцы»). В случае полидисперсных систем для выявления особенностей хода  $I(\beta)$ , связанных с микроструктурой, нужно воспользоваться «структурочувствительными» величинами  $\beta^3 I$  и  $\frac{d}{d\beta} (\beta^3 I)$ , входящими в основную формулу метода малых углов. Так как эти функции получаются в процессе графического дифференцирования экспериментальных индикатрис, то особенности микроструктуры и качество записи исходных кривых  $I(\beta)$  выявляются лишь при обработке экспериментальных данных.

Чтобы иметь возможность следить за режимом и качеством записи  $I(\beta)$  в самом процессе эксперимента, необходимы устройства, моделирующие функции  $\beta^3 I$ ,  $\frac{d}{d\beta} (\beta^3 I)$ .

Характер изменения микроструктуры будет виден из особенностей хода этих функций: положение максимумов и минимумов  $\beta^3 I$ ,  $\frac{d}{d\beta} (\beta^3 I)$  относительно углов  $\beta$  связано с параметрами кривой распределения по размерам —  $f(a)$  [10].

Моделирование позволяет также обойти трудоемкий этап графического дифференцирования и сократить время на обработку одной индикатрисы  $I(\beta)$  до 10—15 мин. по сравнению с временем от 0,5 до 1 часа, затрачиваемым для получения  $f(a)$  при обычной обработке.

Макет устройства, моделирующего  $\beta^3 I$ , построен в ГГО и испытывается в лабораторных условиях [10].

### Заключение

Макет полевого прибора испытан в лабораторных условиях с калиброванными моделями мутных сред в искусственном и естественном туманах.

Результаты этих испытаний приводятся в [10].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шифрин К. С. Вычисление некоторого класса определенных интегралов, содержащих квадрат бесселевой функции. Труды ВЗЛТИ, вып. 2, 1956.
2. Шифрин К. С. Оптические исследования облачных частиц. Сб. «Исследования облаков, туманов и грозового электричества». Гидрометеиздат, Л., 1957.
3. Голиков В. И. Лабораторная установка для измерения спектров сферических частиц и капель туманов. Труды ГГО, вып. 109, 1961.
4. Шифрин К. С., Голиков В. И. Определение спектра капель методом малых углов. Труды 6-й межведомственной конференции по исследованию облаков, осадков и грозового электричества в 1959 г. Изд. АН СССР, М., 1961.
5. Шифрин К. С., Голиков В. И. Авт. свид. № 125399. Бюлл. изобр., № 1, 1960.
6. Голиков В. И. К исследованию погрешностей оптической системы при фотометрировании индикатрис рассеяния под малыми углами. Труды ГГО, вып. 118, 1961.
7. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. Гостехиздат, М., 1953.
8. Дьяченко П. В. Опыт применения методов математической статистики к изучению микроструктуры туманов и облаков. Труды ГГО, вып. 101, 1959.
9. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде. Гостехиздат, М., 1951.
10. Шифрин К. С., Голиков В. И. Измерения микроструктуры методом малых углов (см. настоящий сборник).
11. Чечик Н. О., Файнштейн С. М., Лифшиц Т. М. Электронные умножители. Гостехиздат, М., 1954.
12. Полонников Д. Е. Электронные усилители автоматических компенсаторов. Физматгиз, М., 1960.
13. Бонч-Бруевич А. М. Применение электронных ламп в экспериментальной физике. Гостехиздат, М., 1954.
14. Тудоровский А. И. Теория оптических приборов, т. 1. Изд. АН СССР, М., 1948.
15. Слюсарев Г. Г. Геометрическая оптика. Изд. АН СССР, М., 1946.
16. Камионко Л. А., Котляр Л. М. Регистрация фототоков самопишущим потенциометром ЭППВ-51. ПТЭ, № 6, 1950.
17. Сус А. И., Ратанов Г. В. Усилитель с логарифмической характеристикой. ПТЭ, № 1, 1959.

## РАСЧЕТ ПОЛУСФЕРИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ ПИРГЕОМЕТРОВ

Дан расчет коэффициентов излучения черного излучателя полусферической формы для различных отношений радиуса полусферы к диаметру излучающего отверстия и различных коэффициентов черноты внутренней поверхности полости; произведена оценка влияния исследуемого прибора на коэффициент излучения полости, а также ошибки за счет неточного измерения температуры поверхности.

### 1. Расчет коэффициента излучения абсолютно черного тела полусферической формы

Для градуировки пиргеометров в настоящее время используются или «снежное небо», по которому градуируются пиргеометры Онгстрема и Фалькенберга, или черное тело полусферической формы, использованное, например, Штерном и Шварцманом [5] и В. Л. Гаевским [2]. Однако коэффициенты излучения этих эталонов до сих пор точно не известны.

Исследованию коэффициента излучения абсолютно черного излучателя такого типа, как описанный в работе [2], и посвящена данная работа. Так как экспериментально измерить коэффициент излучения в настоящее время затруднительно, то были выполнены некоторые теоретические расчеты.

Вопрос о расчете коэффициентов черноты полых тел полнее всего освещен в работах [3] и [4]. Расчет коэффициента черноты для некоторого конкретного случая цилиндрического излучателя выполнен в [1]. В соответствии с вышеуказанными работами расчет коэффициента черноты полого тела может быть осуществлен по двум схемам: во-первых, путем интегрирования излучения по всей поверхности излучающей сферы в направлении отверстия; во-вторых, вычислением также с помощью интегрирования отражения полостью радиации, падающей на отверстие. Во втором случае излучательная способность полости в направлении  $\varphi$  (по отношению к нормали) выразится как  $\epsilon(\varphi) = 1 - R(\varphi)$ , где  $R(\varphi)$  — коэффициент отражения под углом  $\varphi$ .

В работе [3] имеются данные коэффициентов излучения для полых тел цилиндрической и сферической форм, полученные по первой схеме. Однако аналогичных расчетов для тел полусферической формы нет.

В данной работе по схеме, аналогичной схеме [3], произведен расчет коэффициентов излучения черных тел полусферической формы для различных отношений радиуса полусферы к диаметру отверстия  $\frac{R}{d}$  и различных коэффициентов излучения черных покрытий излучающей по-

лости  $\varepsilon_1$ . Решение выполнено для общего случая, когда температуры поверхностей полусферы  $T_1$  и дна  $T_2$  и соответствующие коэффициенты излучения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  различны. Отражение от поверхностей полусферического черного тела считалось диффузным, а излучение — изотропным. Расчет производился последовательным учетом всех потоков, возникающих в полости в результате излучения ее стенок и последующих от них отражений. Так как температура полусферы и дна различна, то удобнее учитывать излучения, обусловленные каждой из этих поверхностей отдельно, принимая во внимание независимость потоков.

Рассмотрим сначала потоки, возникающие за счет излучения полусферической поверхности в отверстие  $a = \frac{\pi d^2}{4}$ , и эти же потоки, выходящие в отверстие после отражений различных порядков от полусферы и дна.

Первый поток предполагает лишь непосредственное излучение полусферы в отверстие  $a$  диаметром  $d$ . Найдем его величину. Излучение элемента поверхности полусферы  $ds$  на  $a$  (рис. 1) будет

$$dI_1 = \frac{\varepsilon_1 \sigma T_1^4}{\pi} \frac{a \cos i \cos \theta ds}{R^2},$$

где  $i$  — угол между направлением излучения и перпендикуляром к излучающей поверхности (в данном случае полусферической поверхности).

Так как  $ds = R^2 \sin \theta d\theta d\varphi$ , то

$$dI_1 = \frac{\varepsilon_1 \sigma T_1^4}{\pi} a \sin \theta \cos \theta d\theta d\varphi.$$

Излучение всей поверхности полусферы в отверстие  $a$  можно получить интегрированием

$$I_1 = \frac{\varepsilon_1 \sigma T_1^4}{\pi} a \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi = \varepsilon_1 \sigma T_1^4 a. \quad (1)$$

Второй поток в отверстие  $a$  возникает за счет излучения полусферы самой на себя и отражения ею этого потока в отверстие. Так как полная радиация, излучаемая полусферой во всех направлениях, равна  $2\pi R^2 \varepsilon_1 \sigma T_1^4$ , а радиация, излучаемая ею на дно, как можно показать, равна  $\pi R^2 \varepsilon_1 \sigma T_1^4$ , то этот поток будет

$$I_2 = \frac{\rho_1}{2} a \varepsilon_1 \sigma T_1^4. \quad (2)$$

Третий поток, выходящий из отверстия, возникает за счет отражения излучения полусферы от дна и затем вторичного отражения от полусферы в отверстие

$$I_3 = \frac{\rho_1}{2} \rho_2 \varepsilon_1 \sigma T_1^4 \pi \left( R^2 - \frac{d^2}{4} \right) \frac{a}{\pi R^2} = \frac{\rho_1}{2} \rho_2 \varepsilon_1 \sigma T_1^4 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right) a. \quad (3)$$

Аналогичным образом можно проследить образование бесконечного множества потоков, если учитывать отражения второго, третьего и т. д. порядков как от дна, так и от полусферы. Если все эти потоки

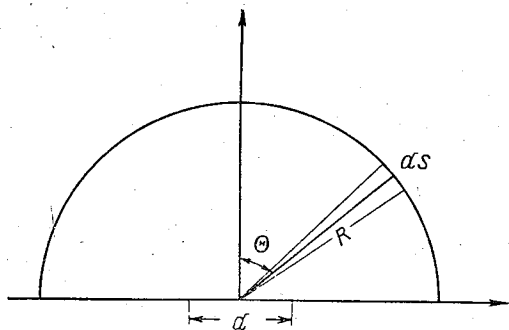


Рис. 1.

последовательно просуммировать, получится ряд, представляющий собой сумму бесконечно убывающей геометрической прогрессии,

$$I_{\text{сф}} = \varepsilon_1 \sigma T_1^4 a \left\{ 1 + \frac{\rho_1}{2} \left[ 1 + \rho_2 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right) \right] + \frac{\rho_1^2}{4} \left[ 1 + 2\rho_2 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right) + \rho_2^2 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right)^2 \right] + \frac{\rho_1^3}{8} \left[ 1 + 3\rho_2 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right) + 3\rho_2^2 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right)^2 + \rho_2^3 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right)^3 \right] + \dots \right\} = \varepsilon_1 \sigma T_1^4 a \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ 1 + \rho_2 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right) \right]^n \frac{\rho_1^n}{2^n} \right\}. \quad (4)$$

Теперь рассмотрим все потоки выходящего из  $a$  излучения, обусловленные излучением дна и последовательными многократными отражениями этого излучения как от самого дна, так и от полусферы.

Первый поток создается излучением дна, отраженным от полусферы в отверстие

$$F_1 = \frac{\rho_1}{2} \varepsilon_2 \sigma T_2^4 a \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right).$$

Второй поток возникает за счет отражения в отверстие  $a$  радиации дна, отраженной полусферой самой на себя, т. е. за счет радиации, дважды отраженной полусферой,

$$F_2 = \frac{\rho_1^2}{4} \varepsilon_2 \sigma T_2^4 a \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right).$$

Третий поток — это радиация, отраженная дважды полусферой и один раз дном, и т. д.

Просуммировав, как и в первом случае, все бесконечное множество возможных членов, получим бесконечно-убывающую геометрическую прогрессию

$$\begin{aligned} F_{\text{дна}} &= \varepsilon_2 \sigma T_2^4 a \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right) \left\{ \frac{\rho_1}{2} + \frac{\rho_1^2}{4} \left[ 1 + \rho_2 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right) \right] + \frac{\rho_1^3}{8} \left[ 1 + 2\rho_2 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right) + \rho_2^2 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right)^2 \right] + \dots \right\} = \\ &= \varepsilon_2 \sigma T_2^4 a \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left[ 1 + \rho_2 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right) \right]^{n-1} \frac{\rho_1^n}{2^n}. \end{aligned} \quad (5)$$

Полное излучение полусферы, с учетом излучений, обусловленных дном и полусферой, будет равно:

$$I = I_{\text{сф}} + F_{\text{дна}} = \varepsilon_1 \sigma T_1^4 a S_1 + \varepsilon_2 \sigma T_2^4 a \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right) S_2;$$

где

$$S_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ 1 + \rho_2 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right) \right]^n \frac{\rho_1^n}{2^n};$$

$$S_2 = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ 1 + \rho_2 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right) \right]^{n-1} \frac{\rho_1^n}{2^n};$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S_1 = \frac{1}{1 - \left[ 1 + \rho_2 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right) \right] \frac{\rho_1}{2}}; \quad \lim_{n \rightarrow \infty} S_2 = \frac{\frac{\rho_1}{2}}{1 - \left[ 1 + \rho_2 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right) \right] \frac{\rho_1}{2}}.$$

Окончательная формула для излучения черного тела полусферической формы с различными температурами поверхностей полусферы и дна и различными коэффициентами отражения этих поверхностей будет

$$I = \frac{\epsilon_1 \sigma T_1^4 + \epsilon_2 \sigma T_2^4 \left(1 - \frac{d^2}{4R^2}\right) \frac{1 - \epsilon_1}{2}}{1 - \left[1 + (1 - \epsilon_2) \left(1 - \frac{d^2}{4R^2}\right)\right] \frac{1 - \epsilon_1}{2}} a. \quad (6)$$

Из формулы (6) можно получить выражение для коэффициента излучения полости по отношению к излучению абсолютно черного тела, имеющего температуру  $T_1$

$$\epsilon_n = \frac{\epsilon_1 \sigma T_1^4 + \epsilon_2 \sigma T_2^4 \left(1 - \frac{d^2}{4R^2}\right) \frac{1 - \epsilon_1}{2}}{\sigma T_1^4 \left\{1 - \left[1 + (1 - \epsilon_2) \left(1 - \frac{d^2}{4R^2}\right)\right] \frac{1 - \epsilon_2}{2}\right\}}. \quad (7)$$

В случае если  $\epsilon_1 = \epsilon_2$ , а температура поверхности дна равна температуре излучающей полусферы ( $T_1 = T_2$ ), формула (7) принимает более простой вид

$$\epsilon_n = \frac{\epsilon \left[1 + \left(1 - \frac{d^2}{4R^2}\right) \frac{1 - \epsilon}{2}\right]}{1 - \left[1 + (1 - \epsilon) \left(1 - \frac{d^2}{4R^2}\right)\right] \frac{1 - \epsilon}{2}}. \quad (8)$$

Коэффициенты излучения полусферических полостей, рассчитанные по формулам (7) и (8) для различных отношений радиуса излучающей полусферы к диаметру ее отверстия и различных коэффициентов излучения черных покрытий полусферы, приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Коэффициент излучения полусферического черного тела при различных

$\frac{R}{d}$  и  $\epsilon_1$

$\epsilon_2 = 0,052, T_1 = 313^\circ, T_2 = 293^\circ$

| $\epsilon_1$ | $\frac{R}{d}$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|              | 0,5           | 1,0   | 2,0   | 3,0   | 4,0   | 5,0   | 6,0   | 7,0   | 8,0   | 9,0   | 10,0  | 15,0  |
| 0,99         | 0,995         | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,98         | 0,990         | 0,998 | 0,999 | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,97         | 0,985         | 0,996 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,96         | 0,980         | 0,995 | 0,998 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,95         | 0,974         | 0,993 | 0,998 | 0,998 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,94         | 0,969         | 0,992 | 0,998 | 0,998 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,93         | 0,962         | 0,990 | 0,997 | 0,998 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 1,000 |
| 0,92         | 0,958         | 0,989 | 0,997 | 0,997 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 |
| 0,91         | 0,953         | 0,988 | 0,996 | 0,997 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 |
| 0,90         | 0,947         | 0,986 | 0,996 | 0,996 | 0,998 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 |
| 0,85         | 0,919         | 0,978 | 0,994 | 0,994 | 0,998 | 0,998 | 0,998 | 0,998 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 |
| 0,80         | 0,889         | 0,969 | 0,991 | 0,990 | 0,996 | 0,997 | 0,998 | 0,998 | 0,998 | 0,998 | 0,998 | 0,999 |
| 0,75         | 0,857         | 0,959 | 0,987 | 0,989 | 0,995 | 0,996 | 0,997 | 0,997 | 0,997 | 0,997 | 0,998 | 0,998 |
| 0,70         | 0,824         | 0,948 | 0,985 | 0,986 | 0,994 | 0,995 | 0,996 | 0,996 | 0,996 | 0,997 | 0,997 | 0,998 |

Коэффициент излучения полусферического черного тела с черным дном при различных  $\frac{R}{d}$  и  $\varepsilon$ , при одинаковой температуре полусферы и дна

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon, \quad T_1 = T_2$$

| $\varepsilon$ | $\frac{R}{d}$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               | 0,5           | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 15    |
| 0,99          | 0,995         | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,98          | 0,990         | 0,998 | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,97          | 0,985         | 0,996 | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,96          | 0,980         | 0,995 | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,95          | 0,974         | 0,994 | 0,998 | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,94          | 0,969         | 0,992 | 0,998 | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,93          | 0,962         | 0,991 | 0,998 | 0,999 | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,92          | 0,958         | 0,989 | 0,998 | 0,999 | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,91          | 0,953         | 0,988 | 0,997 | 0,999 | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,90          | 0,947         | 0,987 | 0,997 | 0,999 | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,85          | 0,919         | 0,978 | 0,995 | 0,998 | 0,999 | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,80          | 0,889         | 0,971 | 0,993 | 0,998 | 0,998 | 0,999 | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,75          | 0,857         | 0,963 | 0,990 | 0,996 | 0,998 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 1,000 | 1,000 |
| 0,70          | 0,824         | 0,953 | 0,988 | 0,996 | 0,996 | 0,997 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 1,000 | 1,000 |

Таблица 1 рассчитана для черной полусферы и дна, покрытого алюминиевой фольгой  $\varepsilon_2=0,054$ , которое в первом приближении считаем отражающим диффузию.

В табл. 2 приведены коэффициенты излучения, рассчитанные по формуле (9) для случая  $\varepsilon_1=\varepsilon_2$  и  $T_1=T_2$ .

## 2. Поправка к коэффициенту излучения за счет излучения градуируемого прибора

При градуировке пиргеометров излучающее отверстие черного тела запирается приемной поверхностью прибора, образуя замкнутую полость. Излучение на прибор в этом случае может отличаться от рассчитанного с помощью табл. 1 и 2, во-первых, из-за излучения самого прибора и, во-вторых, из-за отражения прибором излучения абсолютно черного тела. Оценим поправки, обусловленные обоими из указанных потоков, учитывая также и их многократные отражения внутри полости.

а. Оценим поправку за счет излучения самого прибора. Пусть температура прибора будет  $T_3$ , площадь приемной поверхности  $a$ . Площадь зачерненной части приемной поверхности  $a_2$ , площадь никелированной поверхности  $a_1=a-a_2$ . Схематически вид сверху на приемную поверхность изображен на рис. 2.

$\rho''$  — коэффициент отражения для черной поверхности.

$\rho'$  — соответствующий коэффициент для блестящей части прибора.

Излучение приемной поверхности прибора на полусферу будет равно

$$I' = \varepsilon' a_1 \sigma T_3^4 + \varepsilon'' a_2 \sigma T_3^4.$$

Радияция, попавшая на приемную поверхность прибора после отражения от полусферы, будет

$$I'' = \frac{\varepsilon' a_1 + \varepsilon'' a_2}{2\pi R^2} \rho_1 \sigma T_3^4 a_2.$$

Учитывая многократные отражения, подобно тому, как это делалось в разд. 1, найдем, что эта добавка к коэффициенту излучения черной полости за счет излучения прибора составит:

$$\Delta \epsilon'_{\text{пол}} = \frac{(\epsilon' a_1 + \epsilon'' a_2) \rho_1}{2 - \left[ \left( 1 + \rho' \frac{a_1}{\pi R^2} \right) + \rho_2 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right) \right] \rho_1} \frac{\sigma T_3^4}{\sigma T_1^4} \frac{1}{\pi R^2}. \quad (9)$$

б. Найдем теперь поправку за счет отражения от прибора. Излучение, приходящее на прибор от полусферы, составляет  $\epsilon_n \delta T_1^4 a$ . После отражения от прибора эта радиация составит поток на полусферу, равный

$$F' = \epsilon_n a_1 \rho' \sigma T_1^4 + \epsilon_n a_2 \rho'' \sigma T_1^4.$$

После отражения от полусферы этот поток создаст «освещенность» на приемной поверхности, равную

$$F'' = \frac{a_1 \rho' + a_2 \rho''}{2\pi R^2} \rho' \epsilon_n \sigma T_1^4.$$

Учитывая  $F''$ , а также все последующие потоки, являющиеся результатом многократных отражений, найдем поправку к коэффициенту  $\epsilon_n$  за счет отражения от приемника. Эта поправка имеет вид:

$$\Delta \epsilon_n = \frac{[a - (\epsilon' a_1 + \epsilon'' a_2)] \rho_1}{2 - \left[ \left( 1 + \rho' \frac{a_1}{\pi R^2} \right) + \rho_2 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right) \right] \rho_1} \frac{\epsilon_n}{\pi R^2}. \quad (10)$$

Учитывая (9) и (10), получим в конечном виде выражение для поправки на коэффициент излучения полусферического черного тела за счет влияния градуируемого прибора

$$\Delta \epsilon_n = \frac{\rho_1 \left[ \epsilon_n a - (\epsilon' a_1 + \epsilon'' a_2) \left( \epsilon_n - \frac{\sigma T_3^4}{\sigma T_1^4} \right) \right]}{2 - \left[ \left( 1 + \rho' \frac{a_1}{\pi R^2} \right) + \rho_2 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right) \right] \rho_1} \frac{1}{\pi R^2}. \quad (11)$$

Рассчитаем по этой формуле поправку для абсолютно черного тела, описанного в [2]. В этом случае  $\frac{R}{d} = 2$ ,  $R = 20$  см,  $a_1 = 9$  см<sup>2</sup>,  $a_2 = 69,5$  см<sup>2</sup>. Пусть  $T_3 = T_2 = 293^\circ$ . Примем  $\epsilon' = 0,15$ ,  $\epsilon'' = 1$ ;  $\epsilon$  найдем из табл. 1. Тогда поправки к коэффициенту излучения для различных  $\epsilon_1$ , рассчитанные по формуле (11), можно найти в табл. 3.

Таблица 3

| $\epsilon_1$ | $\Delta \epsilon_n$ | $\epsilon_1$ | $\Delta \epsilon_n$ | $\epsilon_1$ | $\Delta \epsilon_n$ |
|--------------|---------------------|--------------|---------------------|--------------|---------------------|
| 0,99         | 0,000               | 0,94         | 0,0015              | 0,85         | 0,004               |
| 0,98         | 0,0005              | 0,93         | 0,002               | 0,80         | 0,006               |
| 0,97         | 0,001               | 0,92         | 0,002               | 0,75         | 0,008               |
| 0,96         | 0,001               | 0,91         | 0,0025              | 0,70         | 0,010               |
| 0,95         | 0,001               | 0,90         | 0,003               |              |                     |

Таким образом, для градуировки пиргеометров можно вполне пользоваться полусферическим черным телом при геометрическом соотношении  $\frac{R}{d}=2$  и перепаде температур  $T_1-T_2=20^\circ$ . Даже при наихудшем из возможных коэффициентов черноты для матовых покрытий ( $\epsilon_1=0,85$ ) коэффициент излучения такого тела будет равен (с учетом поправки на излучение приемной поверхности прибора)

$$\epsilon_{\Pi}=0,994+0,004=0,998.$$

### 3. Влияние погрешностей измерения температуры поверхностей излучателя

Основная ошибка коэффициента излучения абсолютно черного тела возникает за счет ошибки измерения температуры излучающей поверхности. При конструкции черного тела, описанного в [2], предполагалось, что температура излучающей поверхности равна температуре воды, омывающей эту поверхность. При такой конструкции возможны ошибки: 1) из-за неоднородного распределения температуры по излучающей поверхности вследствие плохой циркуляции воды и изоляции; 2) из-за несоответствия измеряемой температуры воды истинной температуре поверхности.

Для уменьшения первой из этих ошибок была создана непрерывная циркуляция воды с помощью термостата. Измерения температуры термомпарами в различных точках поверхностей полусферы и дна (всего 17 термопар) показали, что максимальный разброс между отдельными точками по поверхности полусферы составляет не более  $\pm 0,13^\circ$ , что находится в пределах точности измерения температуры поверхности. Разброс по дну значительно больший из-за плохой термоизоляции между дном и полусферой. Он достигает  $\pm 3^\circ$ .

Температурные ошибки можно оценить исходя из формулы (7)

$$\frac{\Delta \epsilon_{\Pi}}{\epsilon_{\Pi}} = \frac{4 \left[ \epsilon_1 d T_1 + \epsilon_2 \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^3 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right) \frac{1 - \epsilon_1}{2} d T_2 \right]}{\epsilon_1 T_1 + \epsilon_2 \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^3 T_2 \left( 1 - \frac{d^2}{4R^2} \right) \frac{1 - \epsilon_1}{2}} + \frac{4 d T_1}{T_1}. \quad (12)$$

Для полученных нами значений распределения температуры можно считать  $d T_1=0^\circ$ ,  $d T_2=3^\circ$ . Тогда для рассчитываемого тела имеем ошибку за счет неоднородного распределения температуры по поверхности

$$\frac{\Delta \epsilon_{\Pi}}{\epsilon_{\Pi}} = 0,0001 \simeq 0,01\%.$$

Несоответствие температуры поверхности полусферы температуре подогревающей ее воды видно из табл. 4.

Таблица 4

| $t_{\text{в}}$ | $t_{\text{пов}}$ | $t_{\text{в}} - t_{\text{пов}}$ |
|----------------|------------------|---------------------------------|
| 20,40          | 20,00            | 0,40                            |
| 20,50          | 20,40            | 0,10                            |
| 20,65          | 20,50            | 0,15                            |
| 21,20          | 21,00            | 0,20                            |
| 45,30          | 45,45            | -0,15                           |
| 45,30          | 45,50            | -0,20                           |
| 33,90          | 34,30            | -0,40                           |

Как видно из табл. 4. наибольшие отклонения реальной температуры поверхности от температуры воды не превышают  $\pm 0,4^\circ$ . Подставив это значение в формулу (12), получим возможную ошибку коэффициента излучения за счет несоответствия измеряемой температуры истинной

$$\frac{\Delta_2 \epsilon_n}{\epsilon_n} \cong 0,01 \cong 1\%.$$

В действительности ошибка может быть значительно меньше, так как точность измерения температуры воды составляет  $\pm 0,1^\circ$ ; а точность измерения температуры поверхности порядка  $\pm 0,2^\circ$ .

Влиянием слоя воздуха внутри полости пренебрегаем, так как, согласно выполненным измерениям, разность температур поверхности черного тела и воздуха внутри полости не превышает  $1^\circ$  при открытом излучающем отверстии.

Таким образом, коэффициент излучения полости типа, описанного в [2], будет равен

$$\epsilon_n = 1,00 \pm 0,01.$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Броунштейн А. М. Черный излучатель с большим отверстием. Труды ГГО, вып. 100, 1960.
2. Гаевский В. Л. Исследование длинноволнового излучения атмосферы. Труды ГГО, вып. 100, 1960.
3. De Vos I. C. Physica, XX, No 10, p. 669, 1954.
4. Farkas Győző és Varga Péter: „Sugárzó üreg emisszióképességének meghatározásáról”, Magyar fizikai folyóirat, т. VII, N 1, 1959.
5. Sidneġ C. Stern and Frederick Schwartzman: „An infrared detector for measurement of the black radiation from the sky”. Journal of Meteorology, v. 11, No 2, 1954.

## О СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В АКТИНОМЕТРИЧЕСКОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Приводятся измеренные на ИКС-12 и ИКС-14 спектральные характеристики некоторых материалов, применяемых в актинометрических приборах в качестве фильтров и покрытий приемных поверхностей, необходимые для оценки ошибок актинометрических приборов.

Развитие работ, связанных с изучением радиационного режима земного шара, и работ по активному воздействию на климат потребует повышения точности измерений на сети актинометрических станций.

Между тем до настоящего времени актинометрические приборы еще плохо изучены и зачастую недостаточно идентичны по своим характеристикам, что приводит к неопределенности в интерпретации результатов измерений и во всяком случае снижает их точность.

Исследованию ошибок измерений, выполняемых при помощи термоэлектрических пиранометров, посвящена работа Ю. К. Росса [1]. Зависимость результатов измерений рассеянной радиации от спектральных характеристик прибора может быть исключена введением поправочного спектрального коэффициента к переводному множителю. Этот коэффициент зависит от спектральной характеристики приемной поверхности и спектральных свойств колпака пиранометра.

Ю. К. Росс рассчитал поправочные коэффициенты на основании лабораторных измерений элементов пиранометров, выполненных в Институте физики и астрономии АН ЭССР. Пропускание стеклянных колпаков двух пиранометров, по данным Росса, довольно хорошо согласуется с пропусканием стекла БС-5.

Измеренное в ГГО на приборе ИКС-12 пропускание двух стеклянных колпаков показывает (рис. 1), что они могут значительно отличаться друг от друга и от колпаков, исследованных Россом.

Неопределенность пропускания колпаков пиранометров не позволяет пользоваться вычисленными поправочными коэффициентами без специального исследования.

Кроме того, иногда стеклянные колпаки применяются для отделения дифференциальным методом коротковолновой радиации [2, 3]. При этом существенное значение имеет правильная оценка границы пропускания стекла. Действительная граница пропускания исследованных колпаков такова, что при 4,3 мк они пропускают около 50% радиации, причем граница пропускания неопределенна. Значительно лучшую характеристику имеет колпак голландской фирмы Кипп, уменьшающий пропускание

в. обычно указываемой для стекла области около 2,8 мк с 80 до 30%.

Из сказанного можно сделать вывод о необходимости установления стандарта на стекло колпаков пиранометра. В качестве одной из рекомендаций можно указать, что поставленным требованиям, а также

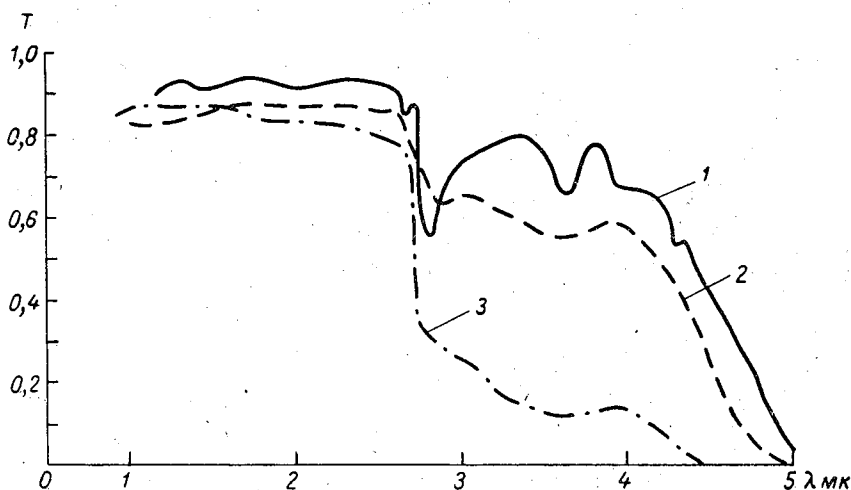


Рис. 1. Пропускание стеклянных колпаков.  
1 — образец I, 2 — образец II, 3 — образец фирмы Кипп.

требованиям по химической устойчивости и малой люминесценции под действием ультрафиолетового облучения хорошо удовлетворяет стекло типа БС-8.

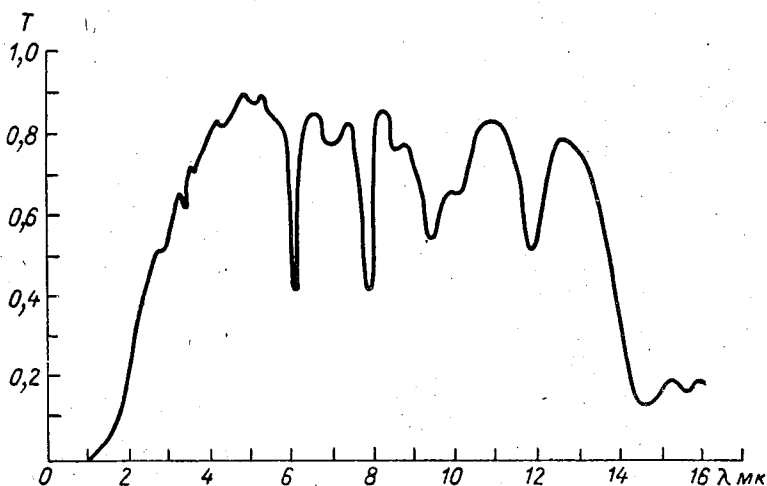


Рис. 2. Пропускание окиси магния толщиной 0,07 мм на подложке из КСl (ИКС-12).

Одним из способов выделения длинноволновой части радиации при дневных измерениях является покрытие приемной поверхности прибора окисью магния. Пропускание окиси магния определяется многими факторами: материалом подложки, способом нанесения покрытия, его толщиной и т. д.

Мы измерили пропускание двух образцов окиси магния толщиной 0,07 и 0,09 мм на подложке КСl (рис. 2 и 3). Была принята наиболее

простая технология нанесения покрытия — закапчивание магниевой «копотью» пластинки из хлористого калия на открытом воздухе. Измерения производились двумя спектрометрами — ИКС-12 и ИКС-14 с призмами LiF, NaCl, KBr. Сравнение наших данных с кривыми пропускания  $MgO$ , взятыми из работы [6], показывает, что они не противоречат друг другу,

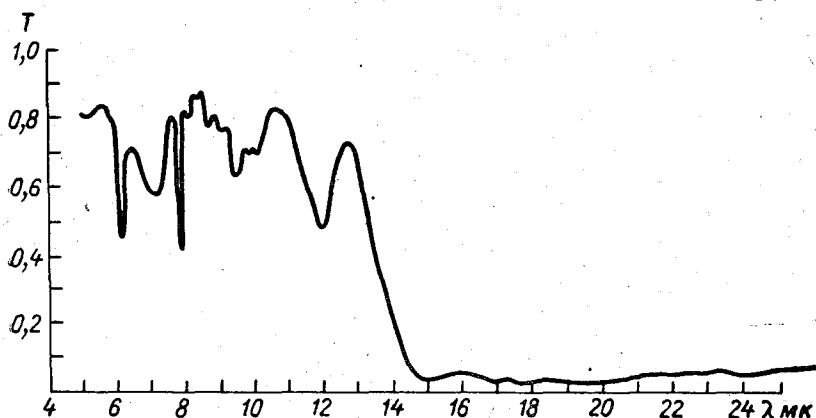


Рис. 3. Пропускание окиси магния толщиной 0,09 мм на подложке из KCl (ИКС-14).

хотя разрешение в работе [6] с призмой KBr много ниже, чем при наших измерениях.

При измерениях коротковолновой радиации приемные площадки приборов хорошо защищаются от внешних воздействий стеклянными

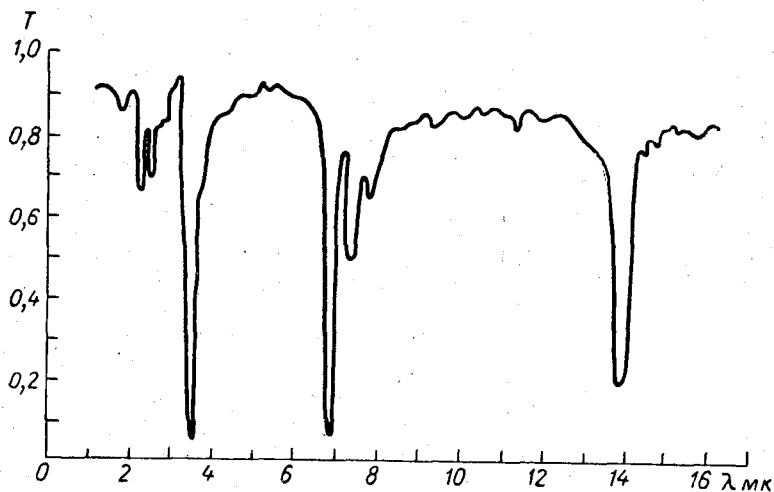


Рис. 4. Пропускание полиэтилена толщиной 0,06 мм (ИКС-12).

окнами. Это исключает также влияние ветра на показания прибора. При измерениях длинноволновой части радиации приходится сталкиваться с трудностью подбора материала для защиты прибора. Основными из этих требований являются малая селективность, большое пропускание в исследуемой области, дешевизна изготовления.

Существует опыт применения в качестве защиты покровных пластинок из кристаллов NaCl, KCl, покрытых слоем селена или ацетилцеллюлозы [4], KRS-5 [2, 3]. Но эти материалы дороги и недостаточно стойки

ж внешним воздействиям. Поэтому сейчас все шире стараются применять для этой цели полиэтилен [5]. Исследованию полиэтилена посвящено много отечественных и зарубежных работ.

Нами было измерено пропускание полиэтилена толщиной 60 мк, изготовленного на Охтинском химкомбинате, после восьмимесячного хранения (рис. 4, 5). Изменения были сделаны в области длин волн 1—16 мк на спектрометре ИКС-12 и в области 5—25 мк на спектрометре ИКС-14.

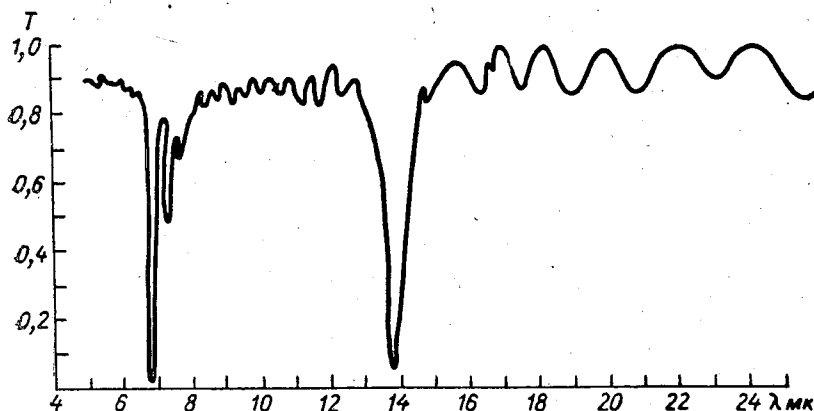


Рис. 5. Пропускание полиэтилена толщиной 0,06 мм (ИКС-14).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Росс Ю. К. Об измерении радиации пиранометрами Янишевского. Изв. АН ЭССР, т. VI, № 1, 1957.
2. Гаевский В. Л. Исследование длинноволнового излучения атмосферы. Труды ГГО, вып. 100, 1960.
3. Дьяченко Л. Н. Сравнение некоторых методов определения длинноволновой радиации. Труды ГГО, вып. 80, 1959.
4. Хволес С. Б. Опыт работы с дневным пиргеометром АФИ. Сб. трудов по агроном, физ., вып. 5, 1952.
5. Голиков В. И. К вопросу об измерении радиации прибором с ветрозащитой из полиэтилена. Труды ГГО, вып. 80, 1959.
6. Momin W. S. The infrared spectrum of magnesium oxide between 1 and 21  $\mu$ . Radiation Laboratory Meteorological Office. Poona, 1952.

## ЭЛЕКТРОННЫЙ ТЕРМОРЕГУЛЯТОР

Дается описание и принцип работы терморегулятора, а также измерителя регулируемой температуры, предназначенного для радиационных датчиков, как-то: термоэлементов, болометров и т. п.

Терморегулятор предназначен для поддержания заданной температуры в интервале от  $-15$  до  $+35^{\circ}\text{C}$ , при этом регулируемая температура измеряется с погрешностью  $0,1^{\circ}$ . Терморегулятор собран на полупроводниковых приборах с питанием от бортовой сети самолета напряжением 26 в.

При радиационных измерениях возникает задача поддержания заданной температуры приемника радиации при изменении температуры окружающей среды.

Необходимая точность регулирования температуры приемника радиации определяется его параметрами. При измерениях длинноволновой радиации в малом телесном угле в отдельных спектральных интервалах точность регулирования температуры корпуса термоэлемента или болометра обычно составляет величину порядка  $0,01^{\circ}$ . При этом уровень регулирования должен измеряться с точностью не ниже  $0,1^{\circ}$ .

Настоящая работа посвящена описанию разработанного малогабаритного устройства для регулирования и контроля температуры корпуса термоэлемента типа ТК  $3 \times 1,5$ , используемого в самолетном приборе для измерения радиационной температуры подстилающей поверхности. Следует заметить, что этот прибор носит универсальный характер и может применяться для регулирования и измерения температуры в других аналогичных системах. Блок-схема прибора показана на рис. 1, из которой следует, что регулирование осуществляется по замкнутой системе. В качестве датчика системы регулирования используется термочувствительное сопротивление — термистор, помещенный в одно из плеч моста. Регулирование температуры основано на изменении величины сопротивления термистора под влиянием изменения температуры корпуса термоэлемента, которое управляет током подогрева корпуса. В целом устройство состоит из двух самостоятельных каналов: канала регулирования заданной температуры и канала измерения температуры.

Для унификации и взаимозаменяемости узлов в обоих каналах использованы однотипные элементы: генератор, усилитель и синхронный детектор. Вся установка выполнена на полупроводниках, что позволило обеспечить питание от бортовой сети с напряжением 26 в и иметь небольшие габариты при большом сроке службы.

**Канал регулирования температуры.** Как уже указывалось выше, система регулирования температуры работает по замкнутому циклу, где переменной величиной является окружающая температура. Изменение

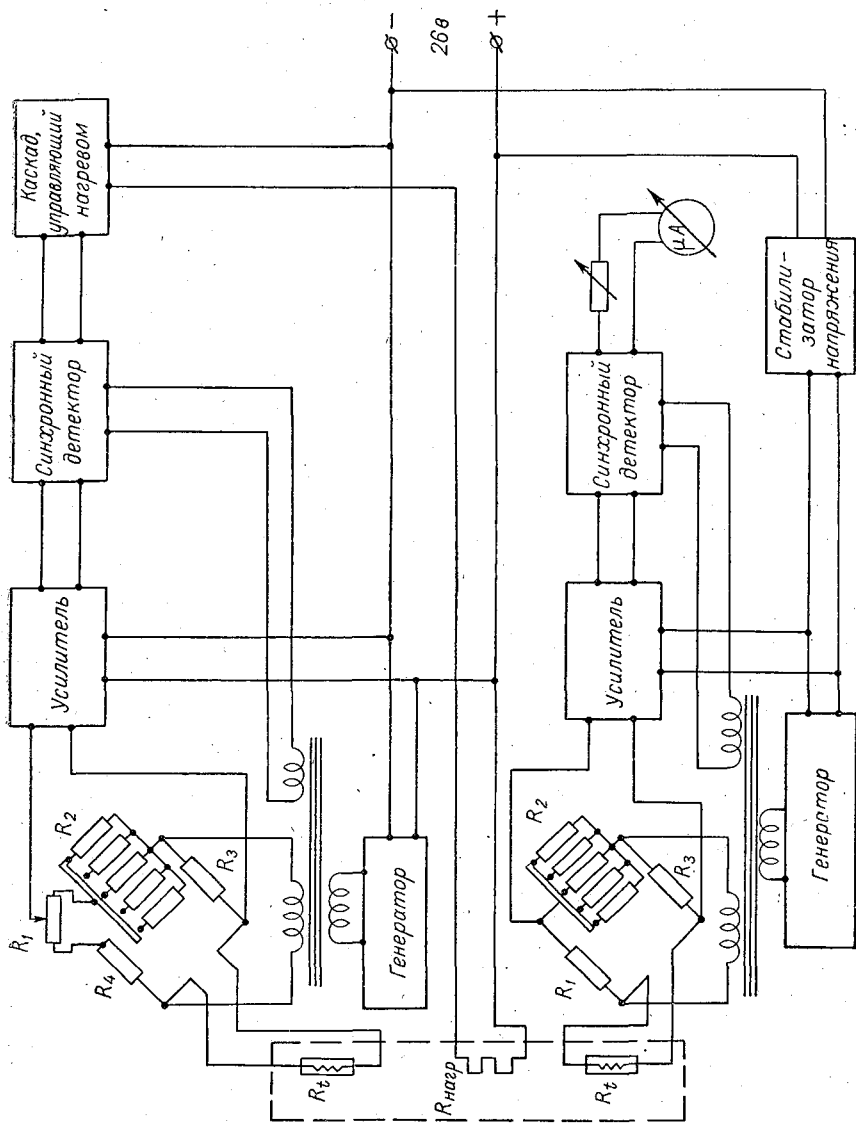


Рис. 1. Блок-схема установки.

этой температуры или условий теплоотдачи вызывает соответствующее изменение сопротивления термистора, который включен в одно из плеч моста. Напряжение разбаланса моста после усиления используется для управления подогревом.

Согласно теории автоматического регулирования, дифференциальный кольцевой коэффициент для данной системы равен

$$k = \frac{\partial T}{\partial P} \frac{\partial R_T}{\partial T} \frac{\partial v_1}{\partial R_T} \frac{\partial v_2}{\partial v_1} \frac{\partial P}{\partial v_2}, \quad (1)$$

где  $T$  — заданная температура регулирования,  $R_T$  — сопротивление термочувствительного элемента (термистора),  $v_1$  — напряжение в диагонали моста при разбалансе (оно же на входе усилителя),  $v_2$  — напряжение на выходе усилителя,  $P$  — мощность, выделяемая в обмотке подогрева.

Для осуществления автоматического регулирования необходимо иметь отрицательный коэффициент  $k$ , что осуществляется посредством изменения фазы напряжения питания моста, которое создается отдельным генератором с частотой около 2 кГц. Питание системы переменным током позволяет упростить схему усилителя и повысить точность регулирования, так как усилители постоянного тока имеют существенный недостаток — дрейф нуля.

На принципиальной схеме регулятора рис. 2 изображен измерительный мост. В одном плече его включено термосопротивление типа КМТ-8, а в противоположном — набор сопротивлений на каждый диапазон температур. С помощью переключателя  $П_1$  осуществляется перестройка регулируемой системы на один из пяти диапазонов температуры. Перекрытие одного диапазона составляет  $10^\circ$ . В пределах каждого из диапазонов можно установить любую температуру потенциометром  $R_1$ . Чтобы изменение коэффициента усиления усилителя не влияло на точность поддержания температуры, система работает в режиме малых сигналов разбаланса моста. Усилитель состоит из двух типовых блоков, каждый из которых имеет коэффициент усиления около 40 дБ и собран на транзисторах типа П-103.

Для обеспечения работы аппаратуры при колебаниях окружающей температуры от  $-10$  до  $40^\circ$  потребовалось применить специальные термостабилизирующие элементы в усилителях. Для этой цели в цепи базы транзисторов включены термосопротивления типа ММТ, которые компенсируют изменения коэффициента усиления, а весь усилитель охвачен отрицательной обратной связью по току. Применение каскадной схемы с отрицательной обратной связью по напряжению во входной цепи усилителя позволяет обеспечить входное сопротивление усилителя не менее 50 ком при всех рабочих температурах.

Напряжение с выхода усилителя через трансформатор подается на синхронный детектор, собранный по схеме балансного демодулятора на диодах типа Д-809. Опорное напряжение на детектор снимается с трансформатора  $Tr_1$ , с которого одновременно подается питание на измерительный мост. Применение синхронного детектора значительно повысило помехоустойчивость системы, а следовательно, и точность регулирования.

Напряжение, полученное на выходе детектора, управляет током подогрева нагревателя через усилитель постоянного тока на транзисторах  $T_9$  и  $T_{10}$ . Для уменьшения пульсаций переменного напряжения на выходе детектора перед усилителем постоянного тока имеется фильтр на  $RC$ . Транзистор  $T_9$ , работающий в схеме усилителя с общим коллектором, является согласующим между детектором и управляемым транзистором

$T_{10}$ . В зависимости от амплитуды полярности напряжения подаваемого на базу транзистора  $T_{10}$  ток его может изменяться от долей миллиампера до одного ампера, обеспечивая тем самым необходимый режим нагрева. Для уменьшения тока подогрева и для стабилизации режима управляемого триода в цепи эмиттора введен потенциометр, ручка которого выведена под шлиц на переднюю панель прибора.

**Канал измерения температуры.** Принцип работы канала измерения температуры аналогичен каналу регулирования. Здесь также используется измерительный мост, питание которого осуществляется переменным напряжением от генератора (рис. 2).

Система измерения температуры работает на принципе неуравновешенного (процентного) моста, в котором величина выходного напряжения и его фаза линейно связаны с величиной разбаланса. Эта линейная связь осуществляется только при малых разбалансах, в пределах  $\pm 5\%$ . Выходное напряжение моста зависит от напряжения питания, параметров самого моста и разбаланса. Оно определяется формулой

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{п}} \frac{\alpha}{(1 + \alpha)^2} \frac{\Delta}{1 + \frac{\Delta}{1 + \alpha}}, \quad (2)$$

где  $U_{\text{вых}}$  — выходное напряжение моста,  $U_{\text{п}}$  — напряжение питания,  $\Delta$  — относительное изменение сопротивления,  $\alpha$  — отношение сопротивлений плеч моста.

В канале измерения температуры в качестве датчика используется термометр сопротивления из медной проволоки. Учитывая температурный коэффициент сопротивления меди ( $\alpha_t = 0,0043$ ), на каждом 10-градусном диапазоне измерения температуры наибольший разбаланс моста составит около  $\pm 2\%$ . Весь диапазон измеряемых температур от  $-15$  до  $35^\circ$  разбит на пять поддиапазонов. Переключение поддиапазонов осуществляется переключателем  $\Pi_2$ , который одновременно служит и переключателем рода работы.

Необходимость применения относительно грубого индикатора прибора при обеспечении точности измерения температуры  $0,1^\circ$  потребовало осуществить предварительное усиление напряжения разбаланса. Схема усилителя и детектора аналогична используемой в системе регулирования с той лишь разницей, что здесь нагрузкой детектора служит стрелочный прибор типа М-24. Для обеспечения требуемой точности измерения питание элементов схемы осуществляется через стабилизатор напряжения, собранный на кремниевых транзисторах ( $T_{19}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{21}$ ) типа П-303 и П-103. Опорное напряжение для стабилизатора снимается со стабилитронов Д-809, последовательно с которыми включены термокомпенсирующие диоды Д7Г.

Настройка измерительной схемы производится с помощью корректора нуля и контроля чувствительности. Контроль чувствительности осуществляется введением постоянного разбаланса от постоянного сопротивления из манганина.

Весь прибор конструктивно оформлен в металлическом корпусе размерами  $300 \times 250 \times 200$  мм, изготовленном из алюминия. На переднюю панель выведены все ручки управления, а также индикаторный прибор и разъемы для подключения питания измерительного и регулирующего датчиков. Предлагаемый прибор может найти применение для измерения и регулирования температуры приемников радиации и излучателей.

## КЮВЕТА ДЛЯ НЕФЕЛОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ С ВЫСОКИМ УГЛОВЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ В ОБЛАСТИ УГЛОВ $5-175^\circ$

Произведена оценка погрешностей нефелометрических измерений при использовании прямоугольной и цилиндрической кювет. На основе проведенных оценок предлагается двойная цилиндрическая кювета для нефелометрических измерений с высоким угловым разрешением в области углов  $5-175^\circ$ , в частности для исследования рассеяния света на макетах облачных капель.

Для решения ряда проблем геофизики (оптика облаков и туманов, видимость в облаках, оптические методы исследования кинематики образования облаков и др.) необходимо знание индикатрис рассеяния света в облаках и туманах. Определение этих индикатрис возможно лишь при наличии осредненных индикатрис рассеяния света квазимонодисперсными туманами с малым разбросом частиц по размерам  $\Delta r$ . Расчетные методы получения указанных индикатрис для облачных капель чрезвычайно громоздки.

В Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова разработана лабораторная установка с высоким угловым разрешением для экспериментального определения индикатрис рассеяния света на макетах, представляющих собой взвеси стеклянных шариков в иммерсионной жидкости с относительным показателем преломления  $n=1,33$  в области углов  $5-175^\circ$ .

Схема установки такова, что исследуемый объем освещается параллельным пучком монохроматического света с углом расхождения  $\delta=0,1^\circ$ . В приемник также попадает только параллельный пучок света, рассеянный внутри области углов  $\pm 0,1^\circ$  от оси приемного устройства. Измерение интенсивности рассеянного света производится непрерывно в области углов  $5-175^\circ$ .

При таких строгих условиях измерения чрезвычайно важным становится вопрос о форме используемой кюветы. Необходимо выбрать кювету, которая не нарушала бы параллельность световых пучков, как освещающего, так и рассеянного, а также, поскольку нас интересуют абсолютные значения функций рассеяния, не вносила бы не поддающихся учету погрешностей в измеряемые значения интенсивностей света. В настоящее время существует много работ по экспериментальному исследованию угловой зависимости интенсивности рассеянного света, однако лишь в немногих из них разбираются погрешности, связанные с использованием кюветы [1—3, 5, 6].

Обычно в нефелометрах используется прямоугольная либо цилиндрическая кювета. В настоящей работе подробно рассмотрены все погрешности, связанные с использованием той или иной кюветы, с целью рационального выбора кюветы, пригодной для интересующих нас исследований.

## 1. Прямоугольная кювета

Рассмотрим ход лучей в кювете (рис. 1 а). Толщиной стенок кюветы пренебрегаем ввиду того, что коэффициенты преломления жидкости и стекла кюветы подбираются одинаковыми. Кювета располагается нормально к падающему пучку света, так что при переходе из воздуха в кювету с жидкостью пучок практически не деформируется, за исключением

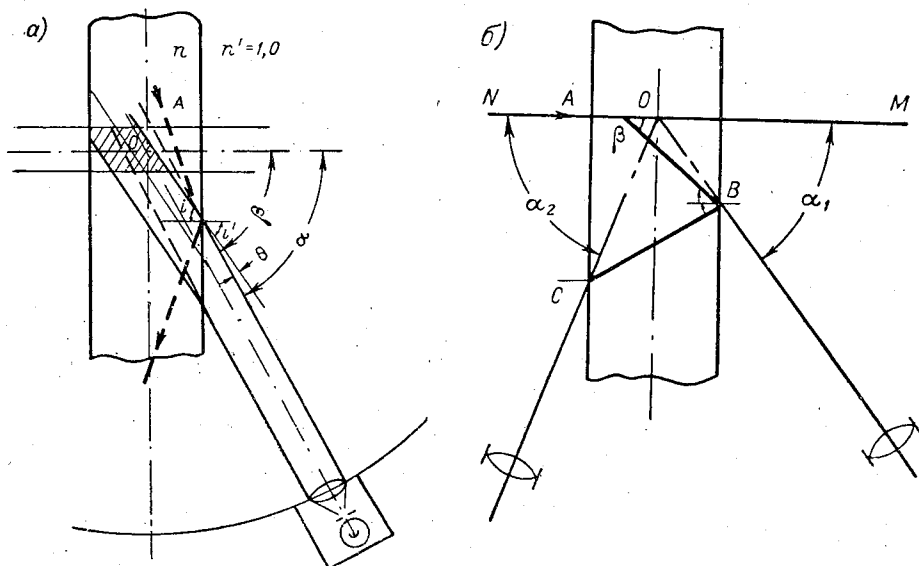


Рис. 1. Ход лучей в прямоугольной кювете.

того, что его угол расхождения вследствие закона преломления уменьшается в  $n$  раз. Действительно,  $\sin \delta_v = n \sin \delta_{ж}$ , поскольку  $\delta$  мало,  $\delta_v = n \delta_{ж}$ , где  $\delta_v$  — угол расхождения в воздухе,  $\delta_{ж}$  — угол расхождения в жидкости,  $n$  — коэффициент преломления жидкости относительно воздуха.

Подробный анализ всех возможных ошибок при использовании прямоугольной кюветы дают Штейн и Кин [1], Брайс и Слейсер [2], а также Германс и Левинсон [3].

Можно указать следующие причины ошибок:

- 1) преломление на границе среда — воздух;
- 2) отражение от поверхности кюветы;
- 3) изменение рассеивающего объема с углом;
- 4) вторичное рассеяние.

**Преломление на границе среда—воздух.** При расчете поправок на преломление авторы указанных выше работ ставили задачу рассчитать  $c_n = \frac{I_1}{I_n}$ , где  $I_n$  — интенсивность света, рассеянного данным элементом объема, измеряемая приемником при наличии иммерсионной среды с показателем преломления  $n$ ;  $I_1$  — интенсивность света, рассеянного этим же элементом объема, но измеренная при отсутствии иммерсионной среды.

Авторы рассматривали определенный элемент объема, например в центре кюветы [5], и вводили поправку на уменьшение количества света, достигающего приемника, в результате уменьшения апертуры приемника. В случае малой кюветы и удаленного приемника для угла наблюдения  $90^\circ$   $c_n = n^2$ . В случае переменного угла наблюдения эта поправка принимает сложный вид [1].

Однако постановка нашей задачи (измерение точных индикатрис) и особенности нашей приемной системы (в приемник попадают только лучи, параллельные оси приемника с углом расхождения  $\pm 0,1^\circ$ ) заставляют нас интересоваться не поправками к измеренной интенсивности, а скорее величиной объема, который вызвал данную интенсивность, и углом, под которым рассеял этот объем свет данной интенсивности.

Рассмотрим рис. 1 а. В приемник, ориентированный под углом  $\alpha$  к направлению падения света, попадает свет, рассеянный некоторым объемом (на рисунке заштрихован) под углом  $\beta$ . Зная связь между углами  $\alpha$  и  $\beta$ , а также величину рассеивающего объема для каждого угла наблюдения  $\alpha$ , можно однозначно определить точную индикатрису рассеяния света частицами, взвешенными в жидкости. Как видно из рисунка,

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n}{n'} = n, \quad (1)$$

$$\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n}. \quad (2)$$

Очевидно, что величина объема  $V$  будет меняться с углом  $\beta$  по закону

$$V = \frac{V_0}{\sin \beta} = \frac{V_0 n}{\sin \alpha}, \quad (3)$$

где  $V_0$  — величина рассеивающего объема при наблюдении под углом  $90^\circ$ .

Наличие у прямоугольной кюветы ребер не позволяет проводить измерения в большом диапазоне углов. Чтобы охватить весь интересующий нас интервал углов, следует проводить измерения при двух положениях кюветы: нормально к оси, как показано на рис 1 а, и вдоль оси. Соотношение между углами  $\alpha$  и  $\beta$  в этом случае будет

$$\frac{\sin (90^\circ - \alpha)}{\sin (90^\circ - \beta)} = \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} = n, \quad (4)$$

$$\cos \beta = \frac{\cos \alpha}{n}. \quad (5)$$

Следствием закона преломления на границе двух сред является также существенный для нас недостаток прямоугольной кюветы. Речь идет о явлении полного внутреннего отражения при переходе света из кюветы в воздух. При некотором значении угла рассеяния  $\beta$  угол падения луча на грань кюветы  $i$  достигает своего предельного значения и полностью от нее отражается (луч А, рис. 1 а).

Для коэффициента преломления  $n=1,45$  имеем предельный угол падения  $i_{\text{пред}} = \arcsin \frac{1}{n} = 43^\circ 40'$ .

Следовательно, для углов  $\beta \geq 43^\circ 40'$  кювета в положении, указанном на рис. 1 а, не будет работать. При этом положении кюветы можно измерить индикатрису только в областях  $0^\circ - 43^\circ 40'$  и  $180^\circ - 136^\circ 20'$ . В положении, перпендикулярном этому, выпадают области углов  $0^\circ - 47^\circ 20'$  и  $180^\circ - 132^\circ 40'$ . Таким образом, при двух взаимно перпендикулярных положениях кюветы полностью исключаются из измерений области углов  $\beta$ , равные  $43^\circ 40' - 47^\circ 20'$  и  $132^\circ 40' - 136^\circ 20'$ .

**Отражение от стенок кюветы.** При прохождении как падающего, так и рассеянного света через оптическую границу кювета—воздух происходит его отражение, которое необходимо учесть. С этой точки зрения следует рассмотреть два возможных следствия отражения:

а) потерю интенсивности падающего и рассеянного пучков из-за отражения;

б) возможность попадания отраженного света в приемник.

Рассмотрим ход луча, падающего на кювету перпендикулярно ее входной грани (рис. 1 б). На границе кюветы в точке  $A$  луч претерпевает отражение, величину которого нетрудно рассчитать по формуле

$$r = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} = \frac{(1,45-1)^2}{(1,45+1)^2} = 0,033.$$

Далее свет, рассеянный в точке  $O$  под углом  $\beta$ , претерпев в точке  $B$  отражение, попадает в приемник, ориентированный под углом  $\alpha_1$ . Расчет величины этого отражения представляется весьма трудным, поскольку она является довольно сложной функцией угла  $\beta$ .

Кроме того, достигающий приемника свет после прохождения границы кювета—воздух обладает поляризацией, обусловленной как отражением света на границе, так и рассеянием света на частицах. Кин и Штейн в [1] предлагают формулу для расчета величины отражения от выходной грани кюветы

$$r = f \left[ \frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)} \right]^2 + (1-f) \left[ \frac{\operatorname{tg}(i-r)}{\operatorname{tg}(i+r)} \right]^2, \quad (6)$$

где  $i$  и  $r$  — углы падения и преломления на этой грани,

$$r = \arcsin(\sin i \cdot n) \quad (7)$$

(в нашем случае  $i = \beta$ ,  $r = \alpha$ );  $f$  — часть падающего на поверхность света, поляризованная параллельно поверхности. Для точки  $B$   $f = p'$ , где  $p'$  — отношение деполяризации для рассеяния частицами при данном угле рассеяния. Естественно, что  $p' = f(\beta)$ .

Далее, отраженный в точке  $B$  свет, пройдя границу кювета—воздух в точке  $C$ , может попасть в приемник, ориентированный под углом  $\alpha_2$ . Учет величины этого количества света еще сложнее, поскольку для отражения от грани в точке  $C$  формула (6) приобретает еще более сложный вид из-за функции  $f$ , которую в данном случае приблизительно можно описать формулой [1]

$$f = \left[ \frac{1 - \left[ \frac{\operatorname{tg}(i-r)}{\operatorname{tg}(i+r)} \right]^2}{1 - \left[ \frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)} \right]^2} \right] p'. \quad (8)$$

Очевидно, что точный учет отражений для прямоугольной кюветы при исследовании индикатрисы рассеяния в широком диапазоне углов чрезвычайно сложен, тем более что для вычисления поправок необходимо знание самих измеряемых величин (отношение деполяризации рассеяния).

**Поправки на вторичное рассеяние.** Вообще говоря, при достаточно большом рассеивающем объеме свет претерпевает несколько рассеяний, что ослабляет потоки падающего и рассеянного света. Во избежание связанных с этим погрешностей выбирается соответствующая концентрация рассеивающих частиц, при которой вторичным рассеянием можно пренебречь.

Степень многократности рассеяния характеризует так называемая оптическая толщина мутной среды  $\tau$  [4]

$$\tau = \frac{a^2 R}{l^3}, \quad (9)$$

где  $a$  — размеры частицы,  $l$  — среднее расстояние между частицами в мутной среде,  $R$  — линейный размер мутного объема.

Условие  $\tau \ll 1$  означает, что многократным рассеянием можно пренебречь. Путем несложных преобразований можно из формулы (9) получить выражения для весовой и объемной концентрации рассеивающих частиц

$$C_v = \frac{Nv}{V} = \frac{4a\tau}{R} \quad (10)$$

и

$$C_p = \frac{Np}{V} = \frac{4a\tau d}{R} \text{ г/см}^3, \quad (11)$$

где  $N$  — число частиц в рассеивающем объеме,  $d$  — удельный вес материала частицы ( $\text{г/см}^3$ ),  $V$  — объем заключенной в кювету жидкости ( $\text{см}^3$ ),  $v$  — объем отдельной частицы ( $\text{см}^3$ ),  $p$  — вес частицы ( $\text{г}$ ).

Резюмируя изложенное выше, можно сказать, что прямоугольная кювета не может быть использована для исследования рассеяния света в широкой области углов.

## 2. Цилиндрическая кювета

Для исследования углового распределения рассеянного света естественно использовать цилиндрическую кювету, хотя в цилиндрической кювете труднее реализовать параллельный пучок света. С этой целью можно применить кювету с плоским вставленным окном либо направить на кювету заведомо расходящийся пучок света, который в кювете будет параллельным. Поскольку в нашу задачу входит измерение индикатрис рассеяния для различных длин волн в области 0,4—1,0 мк, то, естественно, выбираем кювету с плоским окном, хотя окно сужает область исследуемых углов. Рассмотрим погрешности цилиндрической кюветы [6].

**Преломление на границе кювета — воздух.** Толщиной кюветы пренебрегаем, как уже отмечалось выше. При входе пучка света в кювету через плоскопараллельное окно, так же как и в случае прямоугольной кюветы, уменьшается его угол расходимости. При наблюдении же рассеянного света под различными углами следует иметь в виду, что кювета работает как цилиндрическая линза и собирает параллельный пучок рассеянного света, падающий на ее поверхность, в плоскости, параллельной основанию, в фокусе. Фокусное расстояние такой линзы определяется показателем преломления  $n$  иммерсионной жидкости, наполняющей кювету, и радиусом  $R$  последней:

$$f = -\frac{R}{1-n}. \quad (12)$$

Лучи рассеянного света, падающие на поверхность кюветы в плоскостях, перпендикулярных основанию, всегда нормальны к поверхности и, следовательно, не отклоняются от первоначального направления.

Фокусирующее действие кюветы в плоскости, параллельной основанию, можно нейтрализовать дополнительной цилиндрической линзой. Для лучей, лежащих в плоскостях, перпендикулярных основанию кюветы, цилиндрическая линза работает как плоскопараллельная пла-

стина, нормальная к пучку лучей, а поэтому никаких искажений в ход лучей вносить не будет.

Очевидно, что при использовании цилиндрической кюветы угол установки прибора соответствует углу рассеяния без каких-либо поправок во всей области исследуемых углов.

Поправка на величину рассеивающего объема вводится аналогичным с прямоугольной кюветой образом.

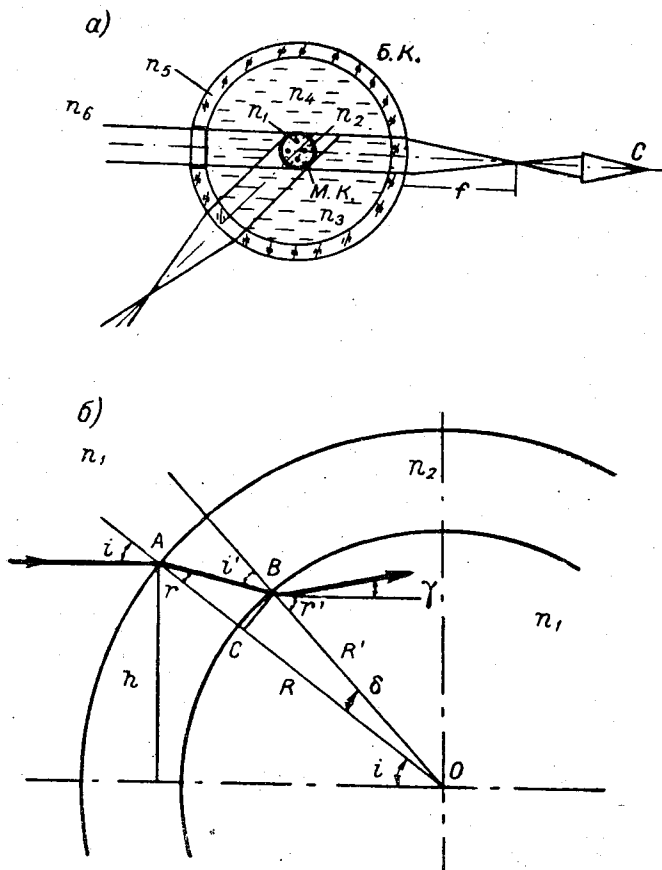


Рис. 2.

а — схема двойной цилиндрической кюветы: Б. К. — большая кювета, М. К. — малая кювета, С — светолушшка; б — ход луча через цилиндрическую кювету.

**Отражение в цилиндрической кювете.** Основным недостатком цилиндрической кюветы являются значительные помехи, связанные с многократным отражением света на границе кювета—воздух. Отраженный свет создает значительную освещенность, на фоне которой измеряется интенсивность рассеянного света.

Следует также иметь в виду, что для обеспечения заданной области исследуемых углов необходима кювета с большим радиусом, а следовательно, требуются большие количества иммерсионной жидкости и стеклянных шариков. Большие размеры кюветы затрудняют также выполнение условия малости рассеивающего объема по сравнению с расстоянием до приемника света, которого требует высокое угловое разрешение установки.

### 3. Двойная цилиндрическая кювета

Предлагаемая нами двойная цилиндрическая кювета позволяет избежать перечисленных выше недостатков цилиндрической кюветы. Она состоит из большой цилиндрической кюветы с плоским окном, подобной описанной выше, в центре которой помещена дополнительная цилиндрическая малая кювета. Большая кювета заполняется иммерсионной жидкостью, в малую помещается исследуемая взвесь шариков в этой же жидкости. Коэффициенты преломления стекла обеих кювет и жидкости подбираются одинаковыми (рис. 2 а).

Размеры светового пучка и малой кюветы должны быть выбраны такими, чтобы кювета не нарушала хода лучей. Рассмотрим ход луча, падающего на кювету на расстоянии  $h$  от ее оси (рис. 2 б). При прохождении через кювету луч претерпевает два преломления, в результате которых он отклоняется от своего первоначального направления на угол  $\gamma$ .

Нетрудно показать, что

$$\sin \gamma = \frac{R \sin r \cos r - \sin r \sqrt{R'^2 - R^2 \sin^2 r}}{R'} \quad (13)$$

Таблица 1

$$n = 1,01, \quad R - R' = 1 \text{ мм}$$

| $h$ мм | Угол отклонения $\gamma^\circ$ |            |            |
|--------|--------------------------------|------------|------------|
|        | $R = 6$ мм                     | $R = 7$ мм | $R = 8$ мм |
| 1,0    | 0                              | 0          | 0          |
| 2,0    | 0                              | 0          | 0          |
| 3,0    | 0,1                            | 0,07       | 0          |
| 4,0    | 0,3                            | 0,13       | 0          |
| 4,5    | 0,5                            | 0,2        | —          |
| 4,7    | 0,8                            | —          | —          |
| 4,9    | 1,5                            | —          | —          |
| 5,0    | 4,3                            | 0,4        | 0          |
| 5,5    | —                              | 0,6        | —          |
| 5,7    | —                              | 0,9        | —          |
| 5,9    | —                              | 1,5        | —          |
| 6,0    | —                              | 7,1        | 0,2        |
| 6,5    | —                              | —          | 0,5        |
| 6,7    | —                              | —          | 0,8        |
| 6,9    | —                              | —          | 1,5        |
| 7,0    | —                              | —          | 3,1        |

В табл. 1 представлены зависимости угла  $\gamma$  от расстояния  $h$  для трех малых кювет одинаковой толщины и разных радиусов. Коэффициент преломления стекла кюветы относительно иммерсионной жидкости принят равным 1,01. Из данных таблицы видно, что угол отклонения  $\gamma$  резко возрастает для лучей, падающих на кювету на расстояниях от оси, близких к радиусу кюветы. Очевидно, что для получения малых  $\gamma$  необходим пучок света, по ширине меньший диаметра кюветы. Если выбрать кювету с радиусами  $R=8$  мм и  $R'=7$  мм и пучок света шириной 8 мм, то для крайнего луча  $\gamma=0$ , т. е. кювета не вносит никаких отклонений в ход лучей.

Чтобы выяснить влияние коэффициента преломления стекла кюветы относительно жидкости на величину угла отклонения  $\gamma$ , нами была вы-

числена зависимость  $\gamma=f(n)$  для крайнего луча пучка света (табл. 2). Как видно из таблицы, для крайнего луча падения ( $h=4$  мм) угол отклонения  $\gamma$  чрезвычайно сильно зависит от коэффициента преломления. Это указывает на то, что для получения желаемой точности измерений нужно очень тщательно подбирать стекло кюветы и иммерсионную жидкость по показателям преломления. Так, чтобы угол  $\gamma$  не превышал  $0,1^\circ$ , коэффициенты преломления стекла и жидкости должны быть равны с точностью до единицы второго знака, т. е. относительный коэффициент преломления должен быть соответственно не более 1,01.

Таблица 2

$$R=7 \text{ мм}, R'=6 \text{ мм}, h=4,0 \text{ мм}$$

|                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $n_{\text{отн}}$ | 0,800 | 0,850 | 0,900 | 0,950 | 0,990 | 1,005 | 1,008 | 1,010 | 1,050 | 1,100 | 1,200 |
| $\gamma^\circ$   | -3,8  | -2,4  | -1,4  | -0,7  | -0,1  | 0     | 0,1   | 0,2   | 0,7   | 1,1   | 1,9   |

Следует, однако, отметить, что если диаметр кюветы больше диаметра светового пучка, условие постоянства рассеивающего объема не сохраняется. Введем поправку на изменение величины рассеивающего

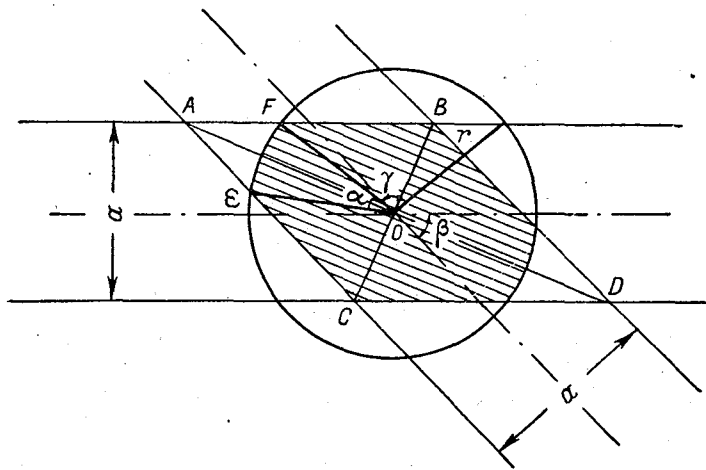


Рис. 3. Геометрическое построение для определения зависимости величины рассеивающего объема от угла рассеяния  $\beta$ .

объема с углом рассеяния  $\beta$ . Рассмотрев рис. 3, нетрудно показать, что площадь сечения рассеивающего объема (на рисунке заштрихована)

$$S = \frac{a^2}{\sin^2 \beta} \text{ для } \beta \geq 2 \arcsin \left( \frac{a}{2r} \right), \quad (14)$$

$$S = \frac{a^2}{\sin^2 \beta} - r^2 \left( \frac{1 - \cos \alpha}{\tan \frac{\beta}{2}} - \frac{\pi \alpha}{180} + \sin \alpha \right) \text{ для } \beta \leq 2 \arcsin \left( \frac{a}{2r} \right), \quad (15)$$

где  $\alpha = 180^\circ - (\gamma + \beta)$ , и

$$\gamma = 2 \arccos \left( \frac{a}{2r} \right). \quad (16)$$

Таблица 3

|               |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\beta^\circ$ | 5     | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 65    | 70    | 75    | 80    | 85    | 90    |
| $k$           | 1,630 | 1,560 | 1,470 | 1,380 | 1,300 | 1,220 | 1,130 | 1,096 | 1,060 | 1,030 | 1,015 | 1,004 | 1,000 |

В табл. 3 представлена зависимость поправочного коэффициента  $k = \frac{V_\beta}{V_{90^\circ}}$  от угла рассеяния  $\beta$ . Здесь  $V_\beta$  и  $V_{90^\circ}$  представляют собой величины рассеивающего объема при наблюдении соответственно под углами  $\beta$  и  $90^\circ$ . Очевидно, что  $V_{90^\circ} = a^2b$ , где  $b$  — высота светового пучка.

Основным преимуществом двойной кюветы является возможность значительного снижения помех, связанных с отражением света от стенок кюветы.

Рассмотрим рис. 4. При наличии малой кюветы рассеивающие частицы заключены в объеме, ограниченном размерами кюветы. Рассеянный частицами свет не может упасть на стенку кюветы под углом, большим угла  $i$ , определяемого соотношением

$$\sin i = \frac{r}{R}. \quad (17)$$

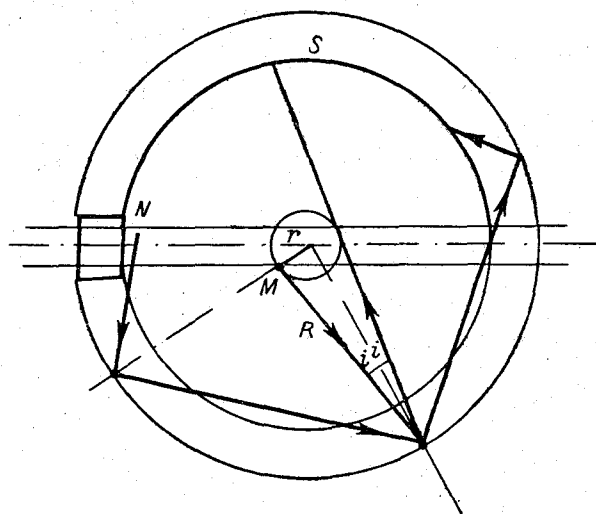


Рис. 4. Отражение света в кювете.  
S — матированная и зачерненная поверхность кюветы.

В выбранном нами случае  $i = 3^\circ$ , следовательно, величина отражения невелика. Многократные отражения можно совершенно исключить, соответственно обработав нерабочую половину стенки кюветы. При одинарной кювете частицы присутствуют на всем протяжении освещающего пучка лучей. Рассеянный ими свет может падать на поверхность кюветы под любым углом и претерпевать по несколько отражений. Примером такого луча может служить луч, выходящий из точки N (рис. 4). Кроме того, применение малой кюветы позволяет точно учесть величину остаточного отражения путем последовательной записи индикатрис рассеяния оптически чистого образца (иммерсионная жидкость без шариков) и исследуемого образца (взвесь шариков в иммерсионной жидкости). Разность этих измерений даст истинную индикатрису нашего образца.

На основании сказанного еще раз перечислим достоинства двойной цилиндрической кюветы при измерении точных индикатрис рассеяния. Предлагаемая нами кювета:

- 1) обеспечивает широкую область углов наблюдения;

2) не требует поправок на угол рассеяния (угол наблюдения равен углу рассеяния);

3) не вносит искажений в условия освещения рассеивающих частиц;

4) значительно снижает помехи, связанные с отражением на стенках;

5) дает возможность точного учета последних;

6) позволяет выполнить условие малости рассеивающего объема по сравнению с расстоянием до приемника света;

7) обеспечивает малый расход иммерсионной жидкости при большом числе исследуемых образцов.

К недостаткам кюветы можно отнести необходимость внесения поправки на величину рассеивающего объема и некоторую сложность ее изготовления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Stein, Keane. The scattering of light from thin polymer films. I. Polymer Science, 17, No 83, 1955, 21—44.
2. Halwer, Brice, Speiser. Photoelectric light-scattering photometer for determining high molecular weights. JOSA, 40, No 11, 1950, 768.
3. Hermans, Levinson. Some geometrical factors in light-scattering apparatus. JOSA, 41, No 7, 1951, 460—465.
4. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде. Гостехиздат, М.—Л., 1951.
5. Carr, Limm. Absolute intensity of light scattering from pure liquids and solutions. I. Chem. Phys., 18, No 12, 1950, 1616—1626.
6. Sedláček. Некоторые факторы при измерении рассеяния света в цилиндрической кювете (чешск.). Chemické Listy, 47, N 8, 1953.

## СПЕКТРАЛЬНАЯ ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЛАКОВ

Рассматривается вопрос о спектральной отражательной способности капельножидких облаков. Показано, что облако является практически «серым» до  $\lambda \approx 0,7$  мк. В полосах поглощения водяного пара наблюдается некоторое уменьшение отражательной способности. При  $\lambda > 2,5$  мк вследствие большого увеличения поглощения радиации жидкой водой имеет место резкое падение величины альbedo облака. Предложен способ приближенной оценки спектрального альbedo ледяных облаков.

Изучение спектральных свойств облаков представляет большой интерес в связи с целым рядом метеорологических задач, а также задач аэрофотосъемки. Однако ввиду технических трудностей до сих пор не осуществлено непосредственное экспериментальное определение спектрального альbedo облаков. Поэтому особую важность приобретает теоретическое рассмотрение этого вопроса. Следует заметить, что теоретическое решение позволит определить альbedo облаков при любых типах подстилающей поверхности, от спектральных свойств которой в сильной степени зависит спектральное альbedo облака (особенно это относится к облакам верхнего яруса).

Если для капельножидких облаков поставленная задача может быть решена с достаточной достоверностью, то для ледяных облаков в настоящее время можно дать лишь грубоориентировочные величины, которые лишь качественно могут соответствовать истинному ходу спектральной отражательной способности облаков.

Остановимся сначала на случае спектрального альbedo капельножидких облаков достаточной мощности (т. е. облаков нижнего и среднего ярусов).

Согласно результатам работы [1], система дифференциальных уравнений, описывающая процесс переноса радиации в рассеивающей и поглощающей среде, имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dF^{(1)}}{d\tau} &= -m^{(1)}(\tau) [\sigma\Gamma(\tau) + K] F^{(1)}(\tau) + m^{(2)}(\tau) \sigma\Gamma^{(2)}(\tau) F^{(2)}(\tau), \\ \frac{dF^{(2)}}{d\tau} &= m^{(1)}(\tau) \sigma\Gamma^{(1)}(\tau) F^{(1)}(\tau) - m^{(2)}(\tau) [\sigma\Gamma^{(2)}(\tau) + K] F^{(2)}(\tau), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $F^{(1)}(\tau)$  и  $F^{(2)}(\tau)$  — восходящий и нисходящий потоки,  $\tau$  — оптическая толщина,  $\sigma$  — объемный коэффициент рассеяния,  $K$  — объемный коэффициент поглощения,  $m^{(1)}$  и  $m^{(2)}$  — осредненные секансы зенитных углов, определяющих направление распространения «центров тяжести» восходящих и нисходящих потоков.

В случае мощных облаков можно считать  $m^{(1)} = m^{(2)} = m_D$  ( $m_D \approx 2$ );  $\Gamma^{(1)}$  и  $\Gamma^{(2)}$  определяют соответственно долю восходящей и нисходящей радиации, рассеянной элементарным объемом в нижнюю или верхнюю полусферу. При мощных облаках  $\Gamma^{(1)} = \Gamma^{(2)} = \Gamma_D$  ( $\Gamma_D \approx 0,05$ ) [2].

Система уравнений (1) решается при следующих граничных условиях: на верхней границе облаков  $F^{(2)}(\tau^*) = S \sin h_\odot$ , где  $S$  — падающий поток солнечной радиации,  $h_\odot$  — угловая высота солнца над горизонтом; на уровне земли  $F^{(1)}(0) = F^{(2)}(0)a$ , где  $a$  — величина альbedo подстилающей поверхности.

При рассмотрении вопроса об альbedo мощных облаков влиянием подоблачного и надоблачного слоев можно пренебречь.

Решая систему уравнений (1) при заданных граничных условиях, получим для величины альbedo облака следующее выражение:

$$a(t^*) = \frac{[(1-a) + \beta(1+a)] e^{\alpha t^*} (1-\beta) - [(1-a) - \beta(1+a)] e^{-\alpha t^*} (1+\beta)}{[(1-a) + \beta(1+a)] e^{\alpha t^*} (1+\beta) - [(1-a) - \beta(1+a)] e^{-\alpha t^*} (1-\beta)}, \quad (2)$$

$$\text{где } \alpha = m_D \sqrt{1-g^2}, \quad \beta = \sqrt{\frac{1-g}{1+g}}, \quad g = \frac{\sigma \Gamma_D}{\sigma \Gamma_D + K}, \quad t^* = \int_0^{z^*} (\sigma \Gamma_D + K) dz,$$

$z^*$  — геометрическая толщина облака.

Таким образом, для определения спектрального альbedo необходимо располагать достаточно надежными данными о коэффициентах, входящих в соотношение (2). Вопрос об этих коэффициентах рассмотрим несколько подробнее.

Коэффициент поглощения  $K$  складывается из суммы двух коэффициентов: коэффициента поглощения радиации облачными каплями  $k_b$  и коэффициента поглощения радиации водяным паром  $k_n$ .

Величина объемного коэффициента поглощения  $k_b$  может быть определена следующим образом:

$$k_b = \frac{3}{4} \frac{\rho}{r} (1 - \bar{R}) (1 - e^{-2\alpha' \bar{r}}),$$

где  $\bar{r}$  — средний радиус облачных капель,  $\beta$  — средняя водность облаков (для облаков нижнего и среднего ярусов эта величина равна в среднем 8 мк),  $\alpha'$  — коэффициент поглощения жидкой воды,  $\bar{R}$  — коэффициент, определяющий величину отраженной от капли радиации.

В интервале длин волн 0,4—2,5 мк  $\bar{R}$  изменяется в пределах 0,06—0,07.

Для облаков среднего яруса  $\rho$  может быть принято равным  $0,25 \cdot 10^{-6}$  г/см<sup>3</sup>, для облаков нижнего яруса —  $0,35 \cdot 10^{-6}$  г/см<sup>3</sup> [3, 4].

Коэффициент  $\sigma$  находится как разность  $S - k_b$ , где  $S$  — объемный коэффициент ослабления. Величина  $S$  может быть найдена из следующего соотношения [5]:

$$S = \frac{3}{2} \frac{\rho}{r}.$$

Таким образом, объемные коэффициенты  $k_b$  и  $\sigma$  могут быть определены достаточно просто.

Сложнее дело обстоит с определением коэффициента поглощения радиации водяным паром  $k_n$ .

Как известно, использование понятия коэффициента поглощения возможно лишь в случае выполнения закона Бугера. Однако при поглощении радиации водяным паром закон Бугера не выполняется даже в случае очень узких спектральных интервалов. Следовательно, при поглощении радиации водяным паром понятие коэффициента поглощения теряет смысл, и в этом случае приходится иметь дело с так называемыми функциями пропускания.

Е. С. Кузнецов на основе обработки опытного материала дает следующую эмпирическую формулу для функции пропускания:

$$P(\omega) = \gamma e^{-c\omega} + (1 - \gamma) e^{-d\omega},$$

которая хорошо оправдывается в широком диапазоне длин волн.

Здесь  $\omega$  — содержание водяного пара,  $c$  и  $d$  могут быть истолкованы как средние массовые коэффициенты поглощения на двух участках спектрального интервала, на которые тем или иным образом разбивается данная полоса поглощения, а  $\gamma$  и  $(1 - \gamma)$  — как относительные длины этих участков. При этом множество точек, характеризующих коэффициентом  $c$ , не обязательно связано [6].

Вид функции пропускания, предложенной Кузнецовым, удобен тем, что позволяет формально пользоваться понятием коэффициента поглощения. Действительно, разбивая полосу поглощения на участки  $\gamma$  и  $1 - \gamma$ , можем считать, что для первого участка  $k_{\pi} = c\omega_0$ , а для второго  $k_{\pi} = d\omega_0$ , где  $\omega_0$  — абсолютная влажность, которая может быть определена на основании известной формулы Магнуса.

Значения величин  $c$ ,  $d$  и  $\gamma$  для шести основных полос поглощения радиации водяным паром приведены в работе [6].

При решении системы уравнений (1) предполагалось, что коэффициент  $g = \frac{\sigma \Gamma_D}{\sigma \Gamma_D + k_b + k_{\pi}}$  не зависит от высоты над нижней границей облака.

В настоящее время мы не располагаем достаточно надежными данными для того, чтобы детально исследовать вопрос об изменении параметра  $g$  с изменением высоты. Качественные же оценки показывают, что наше предположение относительно независимости коэффициента  $g$  от высоты вполне оправданно.

В качестве иллюстрации нами было рассчитано спектральное альбедо облаков среднего яруса (геометрическая толщина облаков среднего яруса 500 м).

Методика расчета состояла в следующем. Весь спектральный диапазон, соответствующий коротковолновой солнечной радиации, разбивался на интервалы, каждый из которых равнялся либо ширине одной из полос поглощения водяного пара, либо ширине промежутка между ними. Для интервала, включающего полосу поглощения, альбедо находилось как средневзвешенное:

$$a = a_c \gamma + (1 - \gamma) a_d,$$

где  $a_c$  — альбедо, соответствующее участку  $\gamma$ , и  $a_d$  — альбедо, соответствующее участку  $(1 - \gamma)$ .

Мы не имеем возможности определить локализацию этих участков. Поэтому спектральное «разрешение» (если пользоваться приборной терминологией) нашей методики в полосах поглощения водяного пара не очень высокое.

В промежутках между полосами поглощения пара «разрешение» может быть достаточно высоким, так как там поглощает только жидкая вода, которая обладает непрерывным спектром поглощения.

При расчете подстилающая поверхность принималась «серой» с  $a_s = 0,2$ .

Полученная нами зависимость  $a(\lambda)$  представлена на рис. 1.

Как видно из рисунка, до  $\lambda \approx 0,7$  мк альbedo облака не зависит от длины волны. Имеющиеся на рисунке провалы в основном объясняются влиянием поглощения радиации водяным паром. При  $\lambda > 2,5$  мк резко возрастает поглощение жидкой воды, так что при  $\lambda = 3$  мк облако становится почти черным.

Как уже было сказано выше, в случае ледяных облаков верхнего яруса речь может идти лишь о грубоприближенной оценке их спектральной отражательной способности, так как в настоящее время отсутствуют сколько-нибудь надежные данные об оптических характеристиках этих облаков.

Подойдем к решению поставленной задачи формально. Аналитическое выражение для величин альbedo облаков верхнего яруса может быть приближенно представлено в виде, аналогичном (2). Однако соотношения  $m^{(1)} = m^{(2)} = m_D$  и  $\Gamma^{(1)} = \Gamma^{(2)} = \Gamma_D$ , которые справедливы лишь в случае очень больших оптических толщин, здесь уже не будут иметь места.

В случае малых оптических толщин (оптическая толщина облаков верхнего яруса мала) решение системы (1) переходит в другой предельный случай:

$$a(t^*) = \frac{[(1-a_c) + v(1+a_c)] e^{\mu t^*} (1-v) - [(1-a_c) - v(1+a_c)] e^{-\mu t^*} (1+v)}{[(1-a_c) + v(1+a_c)] e^{\mu t^*} (1+v) - [(1-a_c) - v(1+a_c)] e^{-\mu t^*} (1-v)}, \quad (2')$$

$$\text{где} \quad v = m_{\odot} \sqrt{1-q^2}, \quad \mu = \sqrt{\frac{1-q}{1+q}}, \quad q = \frac{\sigma \Gamma_{\odot}}{\sigma \Gamma_{\odot} + K}.$$

Здесь  $m_{\odot}$  — секанс зенитного угла солнца,  $\Gamma_{\odot}$  — доля прямой радиации, рассеянной элементарным объемом в верхнюю полусферу (согласно [7],  $\Gamma_{\odot} \approx 0,25$ ),  $a_c$  — спектральное альbedo системы подстилаю-

щая поверхность — подоблачная атмосфера,  $t^* = \int_0^{z^*} (\sigma \Gamma_{\odot} + K) dz$ ,  $\sigma$  — объемный коэффициент рассеяния,  $K = k_b + k_n$  ( $k_b$  — объемный коэффициент поглощения ледяными кристаллами).

Так как ослабление радиации в облаках верхнего яруса происходит почти полностью за счет рассеяния на крупных частицах (роль поглощения очень мала), то  $t^*$  практически не зависит от длины волны.

Таким образом, чтобы рассчитать спектральное альbedo ледяных облаков, надо знать три величины:  $a_c$ ,  $t^*$  и  $q$ .

Величина  $a_c$  может быть определена достаточно надежно, если известно спектральное альbedo подстилающей поверхности.

Величина  $t^*$  также может быть определена достаточно надежно [7].

Таким образом, для того чтобы рассчитать спектральное альbedo облаков верхнего яруса, необходимо определить величину  $q$ .

Представим себе, что мы имеем дело с оптически бесконечно толстым облаком, состоящим из ледяных кристаллов. В этом случае, как легко получить из (2),

$$a(\lambda) = \frac{\sqrt{1-g(\lambda)} - \sqrt{1-g(\lambda)}}{\sqrt{1+g(\lambda)} - \sqrt{1+g(\lambda)}},$$

т. е. альбедо такого облака зависит только от величины параметра  $g$ . Если бы мы измерили спектральное альбедо бесконечно толстого ледяного облака, мы бы тем самым определили параметр

$$g(\lambda) = \frac{2a(\lambda)}{1 + a^2(\lambda)}.$$

Строго говоря, параметр  $g$ , который входит в выражение (2), полученное для случая очень толстых оптических слоев, и параметр  $q$  в выражении (2') могут несколько различаться. Однако так как в первом приближении в случае ледяных облаков можно считать  $\Gamma_{\odot} = \Gamma_D \approx 0,25$ , то  $g(\lambda) \approx q(\lambda)$ .

Грубым аналогом такого оптически бесконечно толстого облака может служить достаточно толстый слой сухого свежеснежавшего пушистого снега. Необходимо, однако, отметить, что решение (2'), строго говоря, не применимо к случаю распространения радиации в снеге, так как при такой концентрации частиц следует оперировать не с интенсивностями, а с полями. Уравнение же переноса, на основе которого получена система уравнений (1), написано для интенсивностей. Однако для качественных оценок этот прием, по видимому, может быть применен.

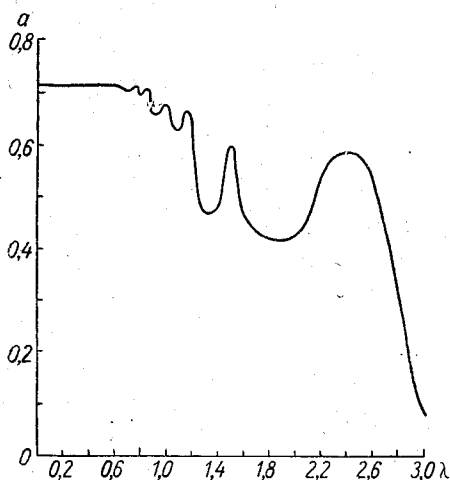


Рис. 1. Спектральное альбедо облаков среднего яруса.

Тщательные измерения спектрального альбедо снега были выполнены Л. Б. Красильщиковым. Используя данные о спектральном альбедо свежеснежавшего сухого снега, любезно представленные Красильщиковым, мы получили следующие значения параметра  $g$  (табл. 1).

Однако оптические свойства снега определяются исключительно оптическими свойствами кристалликов, в то время как оптические свойства облаков в некоторой (хоть и в малой) степени зависят от оптических свойств водяного пара. Поэтому необходимо определить не

$$q = \frac{\sigma\Gamma}{\sigma\Gamma + k_{\lambda}}, \quad (3)$$

а

$$q_1 = \frac{\sigma\Gamma}{\sigma\Gamma + k_{\lambda} + k_{\pi}}. \quad (4)$$

Из (3) и (4) нетрудно получить  $q_1 = \frac{q}{1 + q_1 \frac{k_{\pi}}{\sigma\Gamma_{\odot}}}$ .

Таблица 1

|           |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\lambda$ | 0,70  | 0,75  | 0,80  | 0,85  | 0,90  | 0,95  | 1,00  | 1,05  | 1,10  | 1,15  |
| $g$       | 0,99  | 0,995 | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 0,998 | 0,994 | 0,985 | 0,991 | 0,967 |
| $\lambda$ | 1,20  | 1,25  | 1,30  | 1,35  | 1,40  | 1,45  | 1,50  | 1,55  | 1,60  | 1,65  |
| $g$       | 0,883 | 0,873 | 0,875 | 0,834 | 0,640 | 0,260 | 0,100 | 0,100 | 0,174 | 0,293 |
| $\lambda$ | 1,70  | 1,75  | 1,80  | 1,85  | 1,90  | 1,95  | 2,00  | 2,05  | 2,10  | 2,15  |
| $g$       | 0,362 | 0,400 | 0,400 | 0,236 | 0,050 | 0,00  | 0,00  | 0,074 | 0,246 | 0,269 |
| $\lambda$ | 2,20  | 2,25  | 2,30  | 2,35  | 2,40  | 2,45  | 2,50  |       |       |       |
| $g$       | 0,269 | 0,246 | 0,149 | 0,198 | 0,024 | 0,024 | 0,00  |       |       |       |

Следовательно, для определения величины  $q_1$  необходимо еще оценить отношение  $\frac{k_{\pi}}{\sigma \Gamma_{\odot}}$ .

Величина  $k_{\pi}$  может быть определена достаточно просто по температуре облаков в соответствии с методикой, изложенной выше (для слушающая капельножидких облаков).

Величина  $\Gamma_{\odot} \approx 0,25$ ,  $\sigma = 0,5 \cdot 10^{-5}$  [7].

Таким образом, все величины, которые необходимы для расчетов, могут быть определены и расчет спектрального альбеда ледяных облаков может быть произведен по формуле (2').

В заключение отметим, что в том случае, когда ледяные облака наблюдаются сверху, спектральный состав восходящего потока радиации будет зависеть не только от спектрального альбеда облаков (так как эти облака достаточно тонки и прозрачны), но и от спектрального альбеда подстилающей поверхности. Поэтому расчет, основанный на предположении «серости» подстилающей поверхности и подоблачной атмосферы, не дает правильного представления о спектральном составе выходящей из облака радиации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Е. С. Общий метод построения приближенных уравнений переноса лучистой энергии. Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., № 4, 1951.
2. Берлянд М. Е., Новосельцев Е. П. К теории зависимости суммарной радиации от облачности. Научн. сообщ. Ин-та геологии и географии АН ЛитССР, т. 13, 1962.
3. Физика облаков. Под ред. А. Х. Хргиана. Гидрометеиздат, Л., 1961.
4. Минервин В. Е., Мазин И. П., Бурковская С. Н. Некоторые новые данные о водности облаков. Труды ЦАО, вып. 19, 1958.
5. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде. Гостехиздат, М.—Л., 1951.
6. Кузнецов Е. С. О поглощении радиации Солнца земной атмосферой. Труды Геофиз. ин-та, № 23 (150), 1954.
7. Новосельцев Е. П. О водности облаков верхнего яруса. Метеорология и гидрология, № 8, 1962.

К. С. ШИФРИН, А. Я. ПЕРЕЛЬМАН, Л. К. ПОТЕХИНА

## ТАБЛИЦЫ ДЛЯ РАСЧЕТА СПЕКТРА ЧАСТИЦ ДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЫ ПО ЕЕ ПРОЗРАЧНОСТИ

Приведены формулы для расчета спектра частиц дисперсной системы по данным о ее прозрачности и подробные таблицы специальных функций задачи.

Вычисление спектра частиц дисперсной системы  $f(r)$ , состоящей из различных сферических частиц радиусом  $r$ , по данным о ее прозрачности производится по формуле

$$f(r) \simeq \frac{-1}{2\pi^2 a^2 r_0^4} \left[ \sum_{j=1}^n g\left(\frac{x_j}{2}\right) \omega(ax_j) \Delta x_j + c_0 \tau \omega_0(a\tau) + c_2 \frac{\omega_2(a\tau)}{\tau} \right]. \quad (1)$$

Здесь введены следующие обозначения:

1)  $r_0$  — масштаб длины,  $a$  — безразмерный радиус,

$$r = ar_0; \quad (2)$$

2)  $g\left(\frac{x}{2}\right)$  и  $x$  — безразмерный полидисперсный коэффициент прозрачности и безразмерное волновое число соответственно. Эти величины связаны с экспериментальным коэффициентом прозрачности  $g^*(v^*)$ , описывающим спектральную прозрачность исследуемой дисперсной системы, и с волновым числом  $v^*$  соотношениями:

$$g\left(\frac{x}{2}\right) = r_0 g^*(v^*), \quad x = 2\beta v^* r_0, \quad (3)$$

причем

$$v^* = \lambda^{-1}, \quad \beta = 2\pi(m-1), \quad (4)$$

где  $\lambda$  — длина волны,  $m$  — коэффициент преломления;

3) коэффициенты  $c_0$  и  $c_2$  определяются с помощью эмпирической формулы вида

$$g\left(\frac{x}{2}\right) = c_0 + \frac{c_2}{x^2} \quad (5)$$

обработкой данных о прозрачности (например, по способу средних) на участке спада кривой  $g\left(\frac{x}{2}\right)$ ;

4)  $n$  — количество точек, в которых замерялась прозрачность; сумма в формуле (1) возникла вследствие замены интеграла квадратной формулой прямоугольников;

5)  $\tau$  — безразмерная величина, определяемая по формуле

$$\tau = 2\beta\tau^*r_0, \quad (6)$$

где  $\tau^*$  означает длину интервала волновых чисел  $\nu^*$ , в котором измерялись значения полидисперсного коэффициента рассеяния  $g^*(\nu^*)$ . Этот интервал  $0 < \nu^* < \tau^*$  должен содержать все четкие максимумы  $g^*(\nu^*)$ ;

6) в случае распределений, имеющих характер гамма-распределений, наименьший волновой промежуток, в котором необходимо измерять прозрачность, дается соотношениями:

$$\lambda_{\min} = \frac{2\beta r_0}{\tau}, \quad \lambda_{\max} = \frac{2\beta r_0}{\sigma}.$$

Здесь  $r_0$  — мода распределения,  $\tau \simeq 4$ ,  $\sigma \simeq 0,4$ ;

7) функции  $\omega(y)$ ,  $\omega_0(y)$  и  $\omega_2(y)$  определяются формулами:

$$\omega(y) = y \sin y + \cos y - 1, \quad \omega_0(y) = \cos y - 2 \frac{\sin y}{y} + 1,$$

$$\omega_2(y) = \cos y - 1. \quad (7)$$

Ниже приводятся подробные таблицы функций  $\omega(y)$ ,  $\omega_0(y)$  и  $\omega_2(y)$ , существенно облегчающие расчеты по формуле (1).

Функции  $\omega_0(y)$  и  $\omega_2(y)$  протабулированы для значений  $y$ , равных 0(0,1)24, а функция  $\omega(y)$  — для  $y$ , равных 0(0,01)24,2(0,04)48. При этом в таблицах вместо  $\omega_2(y)$  помещены значения —  $\omega_2(y)$ , так как  $\omega_2(y) \leq 0$ .

Отметим, что при использовании этих таблиц можно избежать интерполирования, например, при расчете спектра  $f(r)$  с постоянным шагом  $\Delta r$ , кратным  $0,05 r_0$ . Для этого надо  $\tau^*$  выбрать так, чтобы  $\tau$  равнялось целому числу, а количество узлов  $n$  в формуле (1) взять кратным 10.

Таблица функций  $\omega_0(y)$  и  $\omega_2(y)$ 

| $y$ | $\omega_0(y)$ | $-\omega_2(y)$ | $y$  | $\omega_0(y)$ | $-\omega_2(y)$ |
|-----|---------------|----------------|------|---------------|----------------|
| 0   | 0,00000       | 0,00000        | 5,9  | 2,05422       | 0,07252        |
| 0,1 | -0,00166      | 0,00500        | 6,0  | 2,05331       | 0,03983        |
| 0,2 | -0,00663      | 0,01993        | 6,1  | 2,04299       | 0,01673        |
| 0,3 | -0,01478      | 0,04466        | 6,2  | 2,02334       | 0,00346        |
| 0,4 | -0,02604      | 0,07894        | 6,3  | 1,99452       | 0,00014        |
| 0,5 | -0,04014      | 0,12242        | 6,4  | 1,95676       | 0,00682        |
| 0,6 | -0,05678      | 0,17466        | 6,5  | 1,91039       | 0,02341        |
| 0,7 | -0,07578      | 0,23516        | 6,6  | 1,85583       | 0,04977        |
| 0,8 | -0,09669      | 0,30329        | 6,7  | 1,79354       | 0,08562        |
| 0,9 | -0,11911      | 0,37839        | 6,8  | 1,72408       | 0,13060        |
| 1,0 | -0,14264      | 0,45970        | 6,9  | 1,64807       | 0,18427        |
| 1,1 | -0,16678      | 0,54640        | 7,0  | 1,56618       | 0,24610        |
| 1,2 | -0,19104      | 0,63764        | 7,1  | 1,47921       | 0,31545        |
| 1,3 | -0,21490      | 0,73250        | 7,2  | 1,38789       | 0,39165        |
| 1,4 | -0,23781      | 0,83003        | 7,3  | 1,29308       | 0,47392        |
| 1,5 | -0,25924      | 0,92926        | 7,4  | 1,19665       | 0,56145        |
| 1,6 | -0,27866      | 1,02920        | 7,5  | 1,09650       | 0,65336        |
| 1,7 | -0,29551      | 1,12884        | 7,6  | 0,99654       | 0,74874        |
| 1,8 | -0,30926      | 1,22720        | 7,7  | 0,89671       | 0,84663        |
| 1,9 | -0,31939      | 1,32329        | 7,8  | 0,79792       | 0,94604        |
| 2,0 | -0,32545      | 1,41615        | 7,9  | 0,70110       | 1,04600        |
| 2,1 | -0,32695      | 1,50485        | 8,0  | 0,60716       | 1,14550        |
| 2,2 | -0,32350      | 1,58850        | 8,1  | 0,51698       | 1,24354        |
| 2,3 | -0,31472      | 1,66628        | 8,2  | 0,43141       | 1,33915        |
| 2,4 | -0,30027      | 1,73739        | 8,3  | 0,35122       | 1,43138        |
| 2,5 | -0,27992      | 1,80114        | 8,4  | 0,27723       | 1,51929        |
| 2,6 | -0,25343      | 1,85689        | 8,5  | 0,21011       | 1,60201        |
| 2,7 | -0,22065      | 1,90407        | 8,6  | 0,15048       | 1,67872        |
| 2,8 | -0,18150      | 1,94222        | 8,7  | 0,09090       | 1,74865        |
| 2,9 | -0,13596      | 1,97096        | 8,8  | 0,05597       | 1,81109        |
| 3,0 | -0,08407      | 1,98999        | 8,9  | 0,02198       | 1,86544        |
| 3,1 | -0,02596      | 1,99914        | 9,0  | -0,00271      | 1,91113        |
| 3,2 | 0,03819       | 1,99829        | 9,1  | -0,01784      | 1,94772        |
| 3,3 | 0,10812       | 1,98748        | 9,2  | -0,02330      | 1,97484        |
| 3,4 | 0,18352       | 1,96680        | 9,3  | -0,01899      | 1,99223        |
| 3,5 | 0,26398       | 1,93646        | 9,4  | -0,00497      | 1,99969        |
| 3,6 | 0,34908       | 1,89676        | 9,5  | 0,01865       | 1,99717        |
| 3,7 | 0,43830       | 1,84810        | 9,6  | 0,05163       | 1,98469        |
| 3,8 | 0,53107       | 1,79097        | 9,7  | 0,09368       | 1,96236        |
| 3,9 | 0,62677       | 1,72593        | 9,8  | 0,14437       | 1,93043        |
| 4,0 | 0,72476       | 1,65364        | 9,9  | 0,20325       | 1,88919        |
| 4,1 | 0,82434       | 1,57482        | 10,0 | 0,26973       | 1,83907        |
| 4,2 | 0,92478       | 1,49026        | 10,1 | 0,34335       | 1,78045        |
| 4,3 | 1,02532       | 1,40080        | 10,2 | 0,42312       | 1,71414        |
| 4,4 | 1,12521       | 1,30733        | 10,3 | 0,50840       | 1,64068        |
| 4,5 | 1,22366       | 1,21080        | 10,4 | 0,59839       | 1,56083        |
| 4,6 | 1,31989       | 1,11215        | 10,5 | 0,69221       | 1,47537        |
| 4,7 | 1,41311       | 1,01239        | 10,6 | 0,78895       | 1,38517        |
| 4,8 | 1,50256       | 0,91250        | 10,7 | 0,88771       | 1,29111        |
| 4,9 | 1,58751       | 0,81349        | 10,8 | 0,98751       | 1,19415        |
| 5,0 | 1,66722       | 0,71634        | 10,9 | 1,08740       | 1,09524        |
| 5,1 | 1,74104       | 0,62202        | 11,0 | 1,18643       | 0,99539        |
| 5,2 | 1,80830       | 0,53148        | 11,1 | 1,28362       | 0,89558        |
| 5,3 | 1,86843       | 0,44563        | 11,2 | 1,37803       | 0,79681        |
| 5,4 | 1,92089       | 0,36531        | 11,3 | 1,46876       | 0,70008        |
| 5,5 | 1,96523       | 0,29133        | 11,4 | 1,55494       | 0,60634        |
| 5,6 | 2,00103       | 0,22443        | 11,5 | 1,63571       | 0,51653        |
| 5,7 | 2,02793       | 0,16529        | 11,6 | 1,71028       | 0,43156        |
| 5,8 | 2,04572       | 0,11448        | 11,7 | 1,77798       | 0,35226        |

| $y$  | $\omega_0 (y)$ | $-\omega_2 (y)$ | $y$  | $\omega_0 (y)$ | $-\omega_2 (y)$ |
|------|----------------|-----------------|------|----------------|-----------------|
| 11,8 | 1,83808        | 0,27944         | 17,9 | 1,67319        | 0,41765         |
| 11,9 | 1,89004        | 0,21382         | 18,0 | 1,74401        | 0,33941         |
| 12,0 | 1,93335        | 0,15605         | 18,1 | 1,80750        | 0,26776         |
| 12,1 | 1,96759        | 0,10671         | 18,2 | 1,86302        | 0,20342         |
| 12,2 | 1,99240        | 0,06630         | 18,3 | 1,90999        | 0,14705         |
| 12,3 | 2,00756        | 0,03522         | 18,4 | 1,94800        | 0,19920         |
| 12,4 | 2,01290        | 0,01378         | 18,5 | 1,97663        | 0,06035         |
| 12,5 | 2,00839        | 0,00219         | 18,6 | 1,99563        | 0,03089         |
| 12,6 | 1,99407        | 0,00057         | 18,7 | 2,00479        | 0,01111         |
| 12,7 | 1,97006        | 0,00894         | 18,8 | 2,00402        | 0,00121         |
| 12,8 | 1,93659        | 0,02721         | 18,9 | 1,99334        | 0,00129         |
| 12,9 | 1,89400        | 0,05520         | 19,0 | 1,97284        | 0,01135         |
| 13,0 | 1,84271        | 0,09263         | 19,1 | 1,94273        | 0,03129         |
| 13,1 | 1,78319        | 0,13913         | 19,2 | 1,90329        | 0,06091         |
| 13,2 | 1,71605        | 0,19423         | 19,3 | 1,85493        | 0,09991         |
| 13,3 | 1,64193        | 0,25737         | 19,4 | 1,79814        | 0,14790         |
| 13,4 | 1,56154        | 0,32794         | 19,5 | 1,73345        | 0,20441         |
| 13,5 | 1,47567        | 0,40523         | 19,6 | 1,66151        | 0,26887         |
| 13,6 | 1,38518        | 0,48846         | 19,7 | 1,58304        | 0,34063         |
| 13,7 | 1,29095        | 0,57679         | 19,8 | 1,49881        | 0,41898         |
| 13,8 | 1,19386        | 0,66936         | 19,9 | 1,40964        | 0,50314         |
| 13,9 | 1,09491        | 0,76523         | 20,0 | 1,31642        | 0,59226         |
| 14,0 | 0,99503        | 0,86345         | 20,1 | 1,22011        | 0,68545         |
| 14,1 | 0,89523        | 0,96303         | 20,2 | 1,12159        | 0,78179         |
| 14,2 | 0,79646        | 1,06298         | 20,3 | 1,02188        | 0,88031         |
| 14,3 | 0,69970        | 1,16230         | 20,4 | 0,92196        | 0,98002         |
| 14,4 | 0,60588        | 1,26000         | 20,5 | 0,82282        | 1,07993         |
| 14,5 | 0,51596        | 1,35510         | 20,6 | 0,72543        | 1,17905         |
| 14,6 | 0,43079        | 1,44665         | 20,7 | 0,63077        | 1,27637         |
| 14,7 | 0,35120        | 1,53374         | 20,8 | 0,53976        | 1,37094         |
| 14,8 | 0,27800        | 1,61550         | 20,9 | 0,45332        | 1,46180         |
| 14,9 | 0,21187        | 1,69111         | 20,0 | 0,37230        | 1,54804         |
| 15,0 | 0,15351        | 1,75981         | 21,1 | 0,29749        | 1,62881         |
| 15,1 | 0,10344        | 1,82092         | 21,2 | 0,22965        | 1,70329         |
| 15,2 | 0,06219        | 1,87383         | 21,3 | 0,16943        | 1,77075         |
| 15,3 | 0,03016        | 1,91800         | 21,4 | 0,11743        | 1,83051         |
| 15,4 | 0,00765        | 1,95301         | 21,5 | 0,07419        | 1,88197         |
| 15,5 | -0,00511       | 1,97849         | 21,6 | 0,04013        | 1,92461         |
| 15,6 | -0,00799       | 1,99420         | 21,7 | 0,01556        | 1,95802         |
| 15,7 | -0,00096       | 1,99997         | 21,8 | 0,00074        | 1,98186         |
| 15,8 | 0,01591        | 1,99575         | 21,9 | -0,00416       | 1,99588         |
| 15,9 | 0,04246        | 1,98158         | 22,0 | 0,00088        | 1,99996         |
| 16,0 | 0,07839        | 1,95761         | 22,1 | 0,01582        | 1,99404         |
| 16,1 | 0,12342        | 1,92406         | 22,2 | 0,04052        | 1,97819         |
| 16,2 | 0,17706        | 1,88128         | 22,3 | 0,07472        | 1,95257         |
| 16,3 | 0,23892        | 1,82960         | 22,4 | 0,11809        | 1,91743         |
| 16,4 | 0,30815        | 1,76971         | 22,5 | 0,17021        | 1,87312         |
| 16,5 | 0,38417        | 1,70213         | 22,6 | 0,23156        | 1,81909         |
| 16,6 | 0,46626        | 1,62754         | 22,7 | 0,29865        | 1,75875         |
| 16,7 | 0,55360        | 1,54668         | 22,8 | 0,37357        | 1,68993         |
| 16,8 | 0,64533        | 1,46035         | 22,9 | 0,45471        | 1,61421         |
| 16,9 | 0,74054        | 1,36942         | 23,0 | 0,54125        | 1,53236         |
| 17,0 | 0,83831        | 1,27481         | 23,1 | 0,63233        | 1,44519         |
| 17,1 | 0,93766        | 1,17744         | 23,2 | 0,72707        | 1,35357         |
| 17,2 | 1,03761        | 1,07831         | 23,3 | 0,82450        | 1,25842         |
| 17,3 | 1,13719        | 0,97839         | 23,4 | 0,92367        | 1,16069         |
| 17,4 | 1,23541        | 0,87869         | 23,5 | 1,02359        | 1,06135         |
| 17,5 | 1,33128        | 0,78020         | 23,6 | 1,12328        | 0,96140         |
| 17,6 | 1,42390        | 0,68390         | 23,7 | 1,22175        | 0,86183         |
| 17,7 | 1,51233        | 0,59077         | 23,8 | 1,31800        | 0,76365         |
| 17,8 | 1,59570        | 0,50172         | 23,9 | 1,40111        | 0,66782         |
|      |                |                 | 24,0 | 1,50012        | 0,57532         |

Таблица функции  $\omega(y)$ 

| $y$  | $\omega(y)$ | $y$  | $\omega(y)$ | $y$  | $\omega(y)$ |
|------|-------------|------|-------------|------|-------------|
| 0    | 0           | 0,63 | 0,17919     | 1,26 | 0,50545     |
| 0,01 | 0,00005     | 0,64 | 0,18431     | 1,27 | 0,50926     |
| 0,02 | 0,00020     | 0,65 | 0,18945     | 1,28 | 0,51298     |
| 0,03 | 0,00045     | 0,66 | 0,19465     | 1,29 | 0,51660     |
| 0,04 | 0,00080     | 0,67 | 0,19988     | 1,30 | 0,52013     |
| 0,05 | 0,00125     | 0,68 | 0,20515     | 1,31 | 0,52355     |
| 0,06 | 0,00180     | 0,69 | 0,21046     | 1,32 | 0,52689     |
| 0,07 | 0,00245     | 0,70 | 0,21579     | 1,33 | 0,53011     |
| 0,08 | 0,00319     | 0,71 | 0,22116     | 1,34 | 0,53321     |
| 0,09 | 0,00404     | 0,72 | 0,22656     | 1,35 | 0,53623     |
| 0,10 | 0,00498     | 0,73 | 0,23199     | 1,36 | 0,53913     |
| 0,11 | 0,00604     | 0,74 | 0,23744     | 1,37 | 0,54193     |
| 0,12 | 0,00717     | 0,75 | 0,24292     | 1,38 | 0,54459     |
| 0,13 | 0,00841     | 0,76 | 0,24842     | 1,39 | 0,54715     |
| 0,14 | 0,00976     | 0,77 | 0,25394     | 1,40 | 0,54960     |
| 0,15 | 0,01119     | 0,78 | 0,25947     | 1,41 | 0,55191     |
| 0,16 | 0,01272     | 0,79 | 0,26503     | 1,42 | 0,55411     |
| 0,17 | 0,01434     | 0,80 | 0,27060     | 1,43 | 0,55617     |
| 0,18 | 0,01606     | 0,81 | 0,27617     | 1,44 | 0,55812     |
| 0,19 | 0,01788     | 0,82 | 0,28176     | 1,45 | 0,55993     |
| 0,20 | 0,01980     | 0,83 | 0,28736     | 1,46 | 0,56162     |
| 0,21 | 0,02181     | 0,84 | 0,29296     | 1,47 | 0,56316     |
| 0,22 | 0,02391     | 0,85 | 0,29857     | 1,48 | 0,56457     |
| 0,23 | 0,02611     | 0,86 | 0,30418     | 1,49 | 0,56585     |
| 0,24 | 0,02839     | 0,87 | 0,30980     | 1,50 | 0,56698     |
| 0,25 | 0,03076     | 0,88 | 0,31540     | 1,51 | 0,56797     |
| 0,26 | 0,03321     | 0,89 | 0,32100     | 1,52 | 0,56881     |
| 0,27 | 0,03579     | 0,90 | 0,32661     | 1,53 | 0,56952     |
| 0,28 | 0,03844     | 0,91 | 0,33219     | 1,54 | 0,57007     |
| 0,29 | 0,04117     | 0,92 | 0,33777     | 1,55 | 0,57045     |
| 0,30 | 0,04400     | 0,93 | 0,34334     | 1,56 | 0,57071     |
| 0,31 | 0,04690     | 0,94 | 0,34890     | 1,57 | 0,57080     |
| 0,32 | 0,04990     | 0,95 | 0,35443     | 1,58 | 0,57072     |
| 0,33 | 0,05297     | 0,96 | 0,35898     | 1,59 | 0,57062     |
| 0,34 | 0,05614     | 0,97 | 0,36544     | 1,60 | 0,57011     |
| 0,35 | 0,05939     | 0,98 | 0,37091     | 1,61 | 0,56957     |
| 0,36 | 0,06272     | 0,99 | 0,37636     | 1,62 | 0,56886     |
| 0,37 | 0,06613     | 1,00 | 0,38177     | 1,63 | 0,56798     |
| 0,38 | 0,06961     | 1,01 | 0,38716     | 1,64 | 0,56693     |
| 0,39 | 0,07318     | 1,02 | 0,39252     | 1,65 | 0,56572     |
| 0,40 | 0,07683     | 1,03 | 0,39784     | 1,66 | 0,56430     |
| 0,41 | 0,08055     | 1,04 | 0,40312     | 1,67 | 0,56274     |
| 0,42 | 0,08426     | 1,05 | 0,40836     | 1,68 | 0,56100     |
| 0,43 | 0,08822     | 1,06 | 0,41357     | 1,69 | 0,55908     |
| 0,44 | 0,09216     | 1,07 | 0,41872     | 1,70 | 0,55698     |
| 0,45 | 0,09619     | 1,08 | 0,42385     | 1,71 | 0,55471     |
| 0,46 | 0,10027     | 1,09 | 0,42892     | 1,72 | 0,55224     |
| 0,47 | 0,10443     | 1,10 | 0,43393     | 1,73 | 0,54959     |
| 0,48 | 0,10864     | 1,11 | 0,43889     | 1,74 | 0,54675     |
| 0,49 | 0,11294     | 1,12 | 0,44379     | 1,75 | 0,54373     |
| 0,50 | 0,11730     | 1,13 | 0,44864     | 1,76 | 0,54050     |
| 0,51 | 0,12171     | 1,14 | 0,45343     | 1,77 | 0,53710     |
| 0,52 | 0,12620     | 1,15 | 0,45816     | 1,78 | 0,53352     |
| 0,53 | 0,13074     | 1,16 | 0,46283     | 1,79 | 0,52971     |
| 0,54 | 0,13535     | 1,17 | 0,46743     | 1,80 | 0,52573     |
| 0,55 | 0,14000     | 1,18 | 0,47196     | 1,81 | 0,52154     |
| 0,56 | 0,14473     | 1,19 | 0,47642     | 1,82 | 0,51715     |
| 0,57 | 0,14949     | 1,20 | 0,48081     | 1,83 | 0,51255     |
| 0,58 | 0,15431     | 1,21 | 0,48512     | 1,84 | 0,50776     |
| 0,59 | 0,15919     | 1,22 | 0,48935     | 1,85 | 0,50278     |
| 0,60 | 0,16412     | 1,23 | 0,49350     | 1,86 | 0,49756     |
| 0,61 | 0,16910     | 1,24 | 0,49757     | 1,87 | 0,49216     |
| 0,62 | 0,17412     | 1,25 | 0,50154     | 1,88 | 0,48655     |

| y    | $\omega(y)$ | y    | $\omega(y)$ | y    | $\omega(y)$ |
|------|-------------|------|-------------|------|-------------|
| 1,89 | 0,48073     | 2,53 | -0,36608    | 3,17 | -2,08963    |
| 1,90 | 0,47468     | 2,54 | -0,38690    | 3,18 | -2,12137    |
| 1,91 | 0,46843     | 2,55 | -0,40797    | 3,19 | -2,15319    |
| 1,92 | 0,46198     | 2,56 | -0,42923    | 3,20 | -2,18507    |
| 1,93 | 0,45530     | 2,57 | -0,45075    | 3,21 | -2,21706    |
| 1,94 | 0,44841     | 2,58 | -0,47248    | 3,22 | -2,24915    |
| 1,95 | 0,44129     | 2,59 | -0,49443    | 3,23 | -2,28127    |
| 1,96 | 0,43396     | 2,60 | -0,51659    | 3,24 | -2,31349    |
| 1,97 | 0,42642     | 2,61 | -0,53896    | 3,25 | -2,34578    |
| 1,98 | 0,41865     | 2,62 | -0,56159    | 3,26 | -2,37810    |
| 1,99 | 0,41065     | 2,63 | -0,58440    | 3,27 | -2,41049    |
| 2,00 | 0,40245     | 2,64 | -0,60746    | 3,28 | -2,44298    |
| 2,01 | 0,39401     | 2,65 | -0,63070    | 3,29 | -2,47547    |
| 2,02 | 0,38535     | 2,66 | -0,65418    | 3,30 | -2,50806    |
| 2,03 | 0,37648     | 2,67 | -0,67784    | 3,31 | -2,54064    |
| 2,04 | 0,36736     | 2,68 | -0,70175    | 3,32 | -2,57330    |
| 2,05 | 0,35802     | 2,69 | -0,72583    | 3,33 | -2,60598    |
| 2,06 | 0,34846     | 2,70 | -0,75014    | 3,34 | -2,63873    |
| 2,07 | 0,33865     | 2,71 | -0,77465    | 3,35 | -2,67148    |
| 2,08 | 0,32863     | 2,72 | -0,79939    | 3,36 | -2,70428    |
| 2,09 | 0,31837     | 2,73 | -0,82429    | 3,37 | -2,73710    |
| 2,10 | 0,30789     | 2,74 | -0,84943    | 3,38 | -2,76994    |
| 2,11 | 0,29718     | 2,75 | -0,87474    | 3,39 | -2,80277    |
| 2,12 | 0,28622     | 2,76 | -0,90025    | 3,40 | -2,83564    |
| 2,13 | 0,27505     | 2,77 | -0,92596    | 3,41 | -2,86852    |
| 2,14 | 0,26363     | 2,78 | -0,95188    | 3,42 | -2,90137    |
| 2,15 | 0,25198     | 2,79 | -0,97798    | 3,43 | -2,93429    |
| 2,16 | 0,24008     | 2,80 | -1,00425    | 3,44 | -2,96717    |
| 2,17 | 0,22795     | 2,81 | -1,03073    | 3,45 | -3,00003    |
| 2,18 | 0,21561     | 2,82 | -1,05739    | 3,46 | -3,03289    |
| 2,19 | 0,20301     | 2,83 | -1,08426    | 3,47 | -3,06577    |
| 2,20 | 0,19020     | 2,84 | -1,11127    | 3,48 | -3,09860    |
| 2,21 | 0,17712     | 2,85 | -1,13847    | 3,49 | -3,13141    |
| 2,22 | 0,16383     | 2,86 | -1,16585    | 3,50 | -3,16419    |
| 2,23 | 0,15028     | 2,87 | -1,19341    | 3,51 | -3,19696    |
| 2,24 | 0,13652     | 2,88 | -1,22116    | 3,52 | -3,22968    |
| 2,25 | 0,12249     | 2,89 | -1,24906    | 3,53 | -3,26236    |
| 2,26 | 0,10824     | 2,90 | -1,27714    | 3,54 | -3,29502    |
| 2,27 | 0,09373     | 2,91 | -1,30537    | 3,55 | -3,32763    |
| 2,28 | 0,07902     | 2,92 | -1,33379    | 3,56 | -3,36020    |
| 2,29 | 0,06405     | 2,93 | -1,36234    | 3,57 | -3,39268    |
| 2,30 | 0,04885     | 2,94 | -1,39107    | 3,58 | -3,42514    |
| 2,31 | 0,03341     | 2,95 | -1,41996    | 3,59 | -3,45751    |
| 2,32 | 0,01771     | 2,96 | -1,44898    | 3,60 | -3,48983    |
| 2,33 | 0,00180     | 2,97 | -1,47818    | 3,61 | -3,52210    |
| 2,34 | -0,01436    | 2,98 | -1,50752    | 3,62 | -3,55427    |
| 2,35 | -0,03076    | 2,99 | -1,53701    | 3,63 | -3,58635    |
| 2,36 | -0,04738    | 3,00 | -1,56663    | 3,64 | -3,61838    |
| 2,37 | -0,06425    | 3,01 | -1,59641    | 3,65 | -3,65030    |
| 2,38 | -0,08137    | 3,02 | -1,62632    | 3,66 | -3,68214    |
| 2,39 | -0,09871    | 3,03 | -1,65636    | 3,67 | -3,71388    |
| 2,40 | -0,11629    | 3,04 | -1,68652    | 3,68 | -3,74552    |
| 2,41 | -0,13409    | 3,05 | -1,71686    | 3,69 | -3,77707    |
| 2,42 | -0,15215    | 3,06 | -1,74728    | 3,70 | -3,80851    |
| 2,43 | -0,17043    | 3,07 | -1,77784    | 3,71 | -3,83982    |
| 2,44 | -0,18897    | 3,08 | -1,80853    | 3,72 | -3,87102    |
| 2,45 | -0,20772    | 3,09 | -1,83932    | 3,73 | -3,90213    |
| 2,46 | -0,22670    | 3,10 | -1,87024    | 3,74 | -3,93308    |
| 2,47 | -0,24592    | 3,11 | -1,90126    | 3,75 | -3,96391    |
| 2,48 | -0,26537    | 3,12 | -1,93241    | 3,76 | -3,99462    |
| 2,49 | -0,28506    | 3,13 | -1,96365    | 3,77 | -4,02519    |
| 2,50 | -0,30496    | 3,14 | -1,99501    | 3,78 | -4,05563    |
| 2,51 | -0,32511    | 3,15 | -2,02645    | 3,79 | -4,08591    |
| 2,52 | -0,34548    | 3,16 | -2,05801    | 3,80 | -4,11604    |

| y    | $\omega(y)$ | y    | $\omega(y)$ | y    | $\omega(y)$ |
|------|-------------|------|-------------|------|-------------|
| 3,81 | -4,14602    | 4,45 | -5,55707    | 5,09 | -5,36271    |
| 3,82 | -4,17581    | 4,46 | -5,56843    | 5,10 | -5,34365    |
| 3,83 | -4,20550    | 4,47 | -5,57956    | 5,11 | -5,32415    |
| 3,84 | -4,23499    | 4,48 | -5,58988    | 5,12 | -5,30410    |
| 3,85 | -4,26432    | 4,49 | -5,59997    | 5,13 | -5,28355    |
| 3,86 | -4,29346    | 4,50 | -5,60968    | 5,14 | -5,26249    |
| 3,87 | -4,32242    | 4,51 | -5,61896    | 5,15 | -5,24094    |
| 3,88 | -4,35121    | 4,52 | -5,62781    | 5,16 | -5,21883    |
| 3,89 | -4,37980    | 4,53 | -5,63623    | 5,17 | -5,19625    |
| 3,90 | -4,40823    | 4,54 | -5,64426    | 5,18 | -5,17317    |
| 3,91 | -4,43643    | 4,55 | -5,65180    | 5,19 | -5,14958    |
| 3,92 | -4,46446    | 4,56 | -5,65895    | 5,20 | -5,12542    |
| 3,93 | -4,49225    | 4,57 | -5,66566    | 5,21 | -5,10085    |
| 3,94 | -4,51987    | 4,58 | -5,67192    | 5,22 | -5,07572    |
| 3,95 | -4,54725    | 4,59 | -5,67775    | 5,23 | -5,05006    |
| 3,96 | -4,57442    | 4,60 | -5,68312    | 5,24 | -5,02394    |
| 3,97 | -4,60138    | 4,61 | -5,68805    | 5,25 | -4,99729    |
| 3,98 | -4,62810    | 4,62 | -5,69258    | 5,26 | -4,97018    |
| 3,99 | -4,65460    | 4,63 | -5,69660    | 5,27 | -4,94254    |
| 4,00 | -4,68084    | 4,64 | -5,70017    | 5,28 | -4,91442    |
| 4,01 | -4,70687    | 4,65 | -5,70328    | 5,29 | -4,88578    |
| 4,02 | -4,73265    | 4,66 | -5,70599    | 5,30 | -4,85666    |
| 4,03 | -4,75821    | 4,67 | -5,70818    | 5,31 | -4,82700    |
| 4,04 | -4,78351    | 4,68 | -5,70995    | 5,32 | -4,79686    |
| 4,05 | -4,80855    | 4,69 | -5,71122    | 5,33 | -4,76625    |
| 4,06 | -4,83333    | 4,70 | -5,71201    | 5,34 | -4,73515    |
| 4,07 | -4,85784    | 4,71 | -5,71239    | 5,35 | -4,70355    |
| 4,08 | -4,88208    | 4,72 | -5,71225    | 5,36 | -4,67148    |
| 4,09 | -4,90606    | 4,73 | -5,71163    | 5,37 | -4,63886    |
| 4,10 | -4,92977    | 4,74 | -5,71059    | 5,38 | -4,60580    |
| 4,11 | -4,95317    | 4,75 | -5,70903    | 5,39 | -4,57226    |
| 4,12 | -4,97620    | 4,76 | -5,70703    | 5,40 | -4,53821    |
| 4,13 | -4,99937    | 4,77 | -5,70450    | 5,41 | -4,50373    |
| 4,14 | -5,02176    | 4,78 | -5,70154    | 5,42 | -4,46875    |
| 4,15 | -5,04403    | 4,79 | -5,69805    | 5,43 | -4,43326    |
| 4,16 | -5,06600    | 4,80 | -5,69407    | 5,44 | -4,39734    |
| 4,17 | -5,08770    | 4,81 | -5,68964    | 5,45 | -4,36092    |
| 4,18 | -5,10908    | 4,82 | -5,68474    | 5,46 | -4,32404    |
| 4,19 | -5,13013    | 4,83 | -5,67928    | 5,47 | -4,28665    |
| 4,20 | -5,15090    | 4,84 | -5,67339    | 5,48 | -4,24882    |
| 4,21 | -5,17129    | 4,85 | -5,66699    | 5,49 | -4,21054    |
| 4,22 | -5,19144    | 4,86 | -5,66009    | 5,50 | -4,17180    |
| 4,23 | -5,21121    | 4,87 | -5,65270    | 5,51 | -4,13260    |
| 4,24 | -5,23065    | 4,88 | -5,64480    | 5,52 | -4,09295    |
| 4,25 | -5,24980    | 4,89 | -5,63640    | 5,53 | -4,05284    |
| 4,26 | -5,26861    | 4,90 | -5,62749    | 5,54 | -4,01226    |
| 4,27 | -5,28703    | 4,91 | -5,61812    | 5,55 | -3,97123    |
| 4,28 | -5,30515    | 4,92 | -5,60825    | 5,56 | -3,92980    |
| 4,29 | -5,32289    | 4,93 | -5,59785    | 5,57 | -3,88789    |
| 4,30 | -5,34033    | 4,94 | -5,58695    | 5,58 | -3,84552    |
| 4,31 | -5,35738    | 4,95 | -5,57552    | 5,59 | -3,80274    |
| 4,32 | -5,37408    | 4,96 | -5,56363    | 5,60 | -3,75954    |
| 4,33 | -5,39043    | 4,97 | -5,55122    | 5,61 | -3,71588    |
| 4,34 | -5,40638    | 4,98 | -5,53833    | 5,62 | -3,67180    |
| 4,35 | -5,42198    | 4,99 | -5,52487    | 5,63 | -3,62731    |
| 4,36 | -5,43722    | 5,00 | -5,51094    | 5,64 | -3,58240    |
| 4,37 | -5,45210    | 5,01 | -5,49652    | 5,65 | -3,53707    |
| 4,38 | -5,46658    | 5,02 | -5,48158    | 5,66 | -3,49127    |
| 4,39 | -5,48066    | 5,03 | -5,46610    | 5,67 | -3,44515    |
| 4,40 | -5,49437    | 5,04 | -5,45014    | 5,68 | -3,39856    |
| 4,41 | -5,50772    | 5,05 | -5,43370    | 5,69 | -3,35155    |
| 4,42 | -5,52066    | 5,06 | -5,41671    | 5,70 | -3,30422    |
| 4,43 | -5,53318    | 5,07 | -5,39923    | 5,71 | -3,25641    |
| 4,44 | -5,54533    | 5,08 | -5,38121    | 5,72 | -3,20823    |

| y    | $\omega$ (y) | y    | $\omega$ (y) | y    | $\omega$ (y) |
|------|--------------|------|--------------|------|--------------|
| 5,73 | -3,15968     | 6,37 | 0,54857      | 7,01 | 4,40536      |
| 5,74 | -3,11076     | 6,38 | 0,61201      | 7,02 | 4,45756      |
| 5,75 | -3,06142     | 6,39 | 0,67554      | 7,03 | 4,50934      |
| 5,76 | -3,01170     | 6,40 | 0,73910      | 7,04 | 4,56076      |
| 5,77 | -2,96159     | 6,41 | 0,80271      | 7,05 | 4,61169      |
| 5,78 | -2,91118     | 6,42 | 0,86628      | 7,06 | 4,66228      |
| 5,79 | -2,86033     | 6,43 | 0,92987      | 7,07 | 4,71244      |
| 5,80 | -2,80916     | 6,44 | 0,99341      | 7,08 | 4,76211      |
| 5,81 | -2,75761     | 6,45 | 1,05708      | 7,09 | 4,81142      |
| 5,82 | -2,70575     | 6,46 | 1,12066      | 7,10 | 4,86024      |
| 5,83 | -2,65349     | 6,47 | 1,18427      | 7,11 | 4,90862      |
| 5,84 | -2,60092     | 6,48 | 1,24785      | 7,12 | 4,95650      |
| 5,85 | -2,54797     | 6,49 | 1,31135      | 7,13 | 5,00395      |
| 5,86 | -2,49473     | 6,50 | 1,37487      | 7,14 | 5,05098      |
| 5,87 | -2,44113     | 6,51 | 1,43829      | 7,15 | 5,09749      |
| 5,88 | -2,38720     | 6,52 | 1,50175      | 7,16 | 5,14356      |
| 5,89 | -2,33295     | 6,53 | 1,56511      | 7,17 | 5,18906      |
| 5,90 | -2,27841     | 6,54 | 1,62836      | 7,18 | 5,23412      |
| 5,91 | -2,22350     | 6,55 | 1,69159      | 7,19 | 5,27867      |
| 5,92 | -2,16831     | 6,56 | 1,75471      | 7,20 | 5,32277      |
| 5,93 | -2,11285     | 6,57 | 1,81780      | 7,21 | 5,36629      |
| 5,94 | -2,05706     | 6,58 | 1,88079      | 7,22 | 5,40937      |
| 5,95 | -2,00094     | 6,59 | 1,94361      | 7,23 | 5,45185      |
| 5,96 | -1,94461     | 6,60 | 2,00639      | 7,24 | 5,49382      |
| 5,97 | -1,88794     | 6,61 | 2,06908      | 7,25 | 5,53525      |
| 5,98 | -1,83100     | 6,62 | 2,13159      | 7,26 | 5,57618      |
| 5,99 | -1,77378     | 6,63 | 2,19400      | 7,27 | 5,61649      |
| 6,00 | -1,71635     | 6,64 | 2,25629      | 7,28 | 5,65636      |
| 6,01 | -1,65858     | 6,65 | 2,31843      | 7,29 | 5,69556      |
| 6,02 | -1,60059     | 6,66 | 2,38045      | 7,30 | 5,73429      |
| 6,03 | -1,54233     | 6,67 | 2,44231      | 7,31 | 5,77235      |
| 6,04 | -1,48385     | 6,68 | 2,50399      | 7,32 | 5,80994      |
| 6,05 | -1,42509     | 6,69 | 2,56556      | 7,33 | 5,84686      |
| 6,06 | -1,36612     | 6,70 | 2,62688      | 7,34 | 5,88325      |
| 6,07 | -1,30687     | 6,71 | 2,68803      | 7,35 | 5,91909      |
| 6,08 | -1,24745     | 6,72 | 2,74906      | 7,36 | 5,95425      |
| 6,09 | -1,18782     | 6,73 | 2,80986      | 7,37 | 5,98887      |
| 6,10 | -1,12791     | 6,74 | 2,87041      | 7,38 | 6,02286      |
| 6,11 | -1,06784     | 6,75 | 2,93078      | 7,39 | 6,05624      |
| 6,12 | -1,00754     | 6,76 | 2,99096      | 7,40 | 6,08900      |
| 6,13 | -0,94709     | 6,77 | 3,05090      | 7,41 | 6,12114      |
| 6,14 | -0,88641     | 6,78 | 3,11066      | 7,42 | 6,15266      |
| 6,15 | -0,82552     | 6,79 | 3,17010      | 7,43 | 6,18354      |
| 6,16 | -0,76446     | 6,80 | 3,22935      | 7,44 | 6,21380      |
| 6,17 | -0,70324     | 6,81 | 3,28834      | 7,45 | 6,24336      |
| 6,18 | -0,64186     | 6,82 | 3,34709      | 7,46 | 6,27236      |
| 6,19 | -0,58032     | 6,83 | 3,40559      | 7,47 | 6,30065      |
| 6,20 | -0,51862     | 6,84 | 3,46374      | 7,48 | 6,32830      |
| 6,21 | -0,45676     | 6,85 | 3,52173      | 7,49 | 6,35533      |
| 6,22 | -0,39473     | 6,86 | 3,57937      | 7,50 | 6,38164      |
| 6,23 | -0,33260     | 6,87 | 3,63670      | 7,51 | 6,40730      |
| 6,24 | -0,27031     | 6,88 | 3,69376      | 7,52 | 6,43225      |
| 6,25 | -0,20793     | 6,89 | 3,75049      | 7,53 | 6,45663      |
| 6,26 | -0,14538     | 6,90 | 3,80697      | 7,54 | 6,48022      |
| 6,27 | -0,08273     | 6,91 | 3,86310      | 7,55 | 6,50315      |
| 6,28 | -0,02004     | 6,92 | 3,91890      | 7,56 | 6,52545      |
| 6,29 | +0,04281     | 6,93 | 3,97437      | 7,57 | 6,54700      |
| 6,30 | 0,10576      | 6,94 | 4,02950      | 7,58 | 6,56784      |
| 6,31 | 0,16881      | 6,95 | 4,08430      | 7,59 | 6,58806      |
| 6,32 | 0,23196      | 6,96 | 4,13869      | 7,60 | 6,60745      |
| 6,33 | 0,29514      | 6,97 | 4,19281      | 7,61 | 6,62619      |
| 6,34 | 0,35837      | 6,98 | 4,24651      | 7,62 | 6,64421      |
| 6,35 | 0,42170      | 6,99 | 4,29981      | 7,63 | 6,66150      |
| 6,36 | 0,48512      | 7,00 | 4,35283      | 7,64 | 6,67811      |

| y    | $\omega$ (y) | y    | $\omega$ (y) | y    | $\omega$ (y) |
|------|--------------|------|--------------|------|--------------|
| 7,65 | 6,69395      | 8,29 | 6,09204      | 8,93 | 2,36020      |
| 7,66 | 6,70910      | 8,30 | 6,05666      | 8,94 | 2,28138      |
| 7,67 | 6,72350      | 8,31 | 6,02046      | 8,95 | 2,20201      |
| 7,68 | 6,73114      | 8,32 | 5,98344      | 8,96 | 2,12218      |
| 7,69 | 6,75009      | 8,33 | 5,94569      | 8,97 | 2,04184      |
| 7,70 | 6,76225      | 8,34 | 5,90710      | 8,98 | 1,96102      |
| 7,71 | 6,77370      | 8,35 | 5,86775      | 8,99 | 1,87972      |
| 7,72 | 6,78439      | 8,36 | 5,82764      | 9,00 | 1,79795      |
| 7,73 | 6,79431      | 8,37 | 5,78671      | 9,01 | 1,71572      |
| 7,74 | 6,80351      | 8,38 | 5,74505      | 9,02 | 1,63301      |
| 7,75 | 6,81192      | 8,39 | 5,70258      | 9,03 | 1,54990      |
| 7,76 | 6,81960      | 8,40 | 5,65935      | 9,04 | 1,46630      |
| 7,77 | 6,82650      | 8,41 | 5,61534      | 9,05 | 1,38230      |
| 7,78 | 6,83261      | 8,42 | 5,57055      | 9,06 | 1,29789      |
| 7,79 | 6,83800      | 8,43 | 5,52502      | 9,07 | 1,21304      |
| 7,80 | 6,84259      | 8,44 | 5,47872      | 9,08 | 1,12779      |
| 7,81 | 6,84642      | 8,45 | 5,43168      | 9,09 | 1,04212      |
| 7,82 | 6,84944      | 8,46 | 5,38385      | 9,10 | 0,95609      |
| 7,83 | 6,85171      | 8,47 | 5,33531      | 9,11 | 0,86965      |
| 7,84 | 6,85322      | 8,48 | 5,28600      | 9,12 | 0,78284      |
| 7,85 | 6,85390      | 8,49 | 5,23592      | 9,13 | 0,69564      |
| 7,86 | 6,85384      | 8,50 | 5,18512      | 9,14 | 0,60810      |
| 7,87 | 6,85295      | 8,51 | 5,13360      | 9,15 | 0,52021      |
| 7,88 | 6,85132      | 8,52 | 5,08130      | 9,16 | 0,43199      |
| 7,89 | 6,84885      | 8,53 | 5,02832      | 9,17 | 0,34341      |
| 7,90 | 6,84562      | 8,54 | 4,97458      | 9,18 | 0,25451      |
| 7,91 | 6,84160      | 8,55 | 4,92010      | 9,19 | 0,16529      |
| 7,92 | 6,83676      | 8,56 | 4,86494      | 9,20 | 0,07576      |
| 7,93 | 6,83116      | 8,57 | 4,80905      | 9,21 | —0,01406     |
| 7,94 | 6,82471      | 8,58 | 4,75242      | 9,22 | —0,10421     |
| 7,95 | 6,81751      | 8,59 | 4,69510      | 9,23 | —0,19460     |
| 7,96 | 6,80949      | 8,60 | 4,63710      | 9,24 | —0,28531     |
| 7,97 | 6,80064      | 8,61 | 4,57838      | 9,25 | —0,37625     |
| 7,98 | 6,79102      | 8,62 | 4,51895      | 9,26 | —0,46749     |
| 7,99 | 6,78060      | 8,63 | 4,45885      | 9,27 | —0,55894     |
| 8,00 | 6,76935      | 8,64 | 4,39806      | 9,28 | —0,65065     |
| 8,01 | 6,75730      | 8,65 | 4,33660      | 9,29 | —0,74262     |
| 8,02 | 6,74446      | 8,66 | 4,27446      | 9,30 | —0,83478     |
| 8,03 | 6,73082      | 8,67 | 4,21162      | 9,31 | —0,92715     |
| 8,04 | 6,71635      | 8,68 | 4,14815      | 9,32 | —1,01976     |
| 8,05 | 6,70106      | 8,69 | 4,08400      | 9,33 | —1,11254     |
| 8,06 | 6,68500      | 8,70 | 4,01920      | 9,34 | —1,20552     |
| 8,07 | 6,66810      | 8,71 | 3,95372      | 9,35 | —1,29865     |
| 8,08 | 6,65040      | 8,72 | 3,88762      | 9,36 | —1,39199     |
| 8,09 | 6,63189      | 8,73 | 3,82089      | 9,37 | —1,48545     |
| 8,10 | 6,61255      | 8,74 | 3,75351      | 9,38 | —1,57911     |
| 8,11 | 6,59242      | 8,75 | 3,68550      | 9,39 | —1,67288     |
| 8,12 | 6,57149      | 8,76 | 3,61684      | 9,40 | —1,76679     |
| 8,13 | 6,54974      | 8,77 | 3,54761      | 9,41 | —1,86080     |
| 8,14 | 6,52718      | 8,78 | 3,47774      | 9,42 | —1,95495     |
| 8,15 | 6,50381      | 8,79 | 3,40725      | 9,43 | —2,04922     |
| 8,16 | 6,47961      | 8,80 | 3,33619      | 9,44 | —2,14354     |
| 8,17 | 6,45464      | 8,81 | 3,26452      | 9,45 | —2,23799     |
| 8,18 | 6,42885      | 8,82 | 3,19225      | 9,46 | —2,33250     |
| 8,19 | 6,40225      | 8,83 | 3,11941      | 9,47 | —2,42705     |
| 8,20 | 6,37484      | 8,84 | 3,04598      | 9,48 | —2,52170     |
| 8,21 | 6,34661      | 8,85 | 2,97199      | 9,49 | —2,61636     |
| 8,22 | 6,31761      | 8,86 | 2,89741      | 9,50 | —2,71109     |
| 8,23 | 6,28779      | 8,87 | 2,82231      | 9,51 | —2,80582     |
| 8,24 | 6,25715      | 8,88 | 2,74662      | 9,52 | —2,90060     |
| 8,25 | 6,22574      | 8,89 | 2,67042      | 9,53 | —2,99535     |
| 8,26 | 6,19352      | 8,90 | 2,59364      | 9,54 | —3,09014     |
| 8,27 | 6,16050      | 8,91 | 2,51635      | 9,55 | —3,18490     |
| 8,28 | 6,12666      | 8,92 | 2,43856      | 9,56 | —3,27964     |

| y     | $\omega(y)$ | y     | $\omega(y)$ | y     | $\omega(y)$ |
|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|
| 9,57  | -3,37435    | 10,21 | -8,92551    | 10,85 | -11,88030   |
| 9,58  | -3,46900    | 10,22 | -8,99739    | 10,86 | -11,89551   |
| 9,59  | -3,56365    | 10,23 | -9,06861    | 10,87 | -11,90965   |
| 9,60  | -3,65821    | 10,24 | -9,13915    | 10,88 | -11,92271   |
| 9,61  | -3,75570    | 10,25 | -9,20904    | 10,89 | -11,93474   |
| 9,62  | -3,84712    | 10,26 | -9,27821    | 10,90 | -11,94568   |
| 9,63  | -3,94145    | 10,27 | -9,34671    | 10,91 | -11,95555   |
| 9,64  | -4,03566    | 10,28 | -9,41451    | 10,92 | -11,96431   |
| 9,65  | -4,12980    | 10,29 | -9,48161    | 10,93 | -11,97202   |
| 9,66  | -4,22380    | 10,30 | -9,54798    | 10,94 | -11,97866   |
| 9,67  | -4,31765    | 10,31 | -9,61360    | 10,95 | -11,98419   |
| 9,68  | -4,41141    | 10,32 | -9,67851    | 10,96 | -11,98861   |
| 9,69  | -4,50500    | 10,33 | -9,74269    | 10,97 | -11,99198   |
| 9,70  | -4,59841    | 10,34 | -9,80610    | 10,98 | -11,99424   |
| 9,71  | -4,69169    | 10,35 | -9,86876    | 10,99 | -11,99540   |
| 9,72  | -4,78476    | 10,36 | -9,93064    | 11,00 | -11,99545   |
| 9,73  | -4,87766    | 10,37 | -9,99176    | 11,01 | -11,99441   |
| 9,74  | -4,97038    | 10,38 | -10,05209   | 11,02 | -11,99229   |
| 9,75  | -5,06286    | 10,39 | -10,11161   | 11,03 | -11,98904   |
| 9,76  | -5,15516    | 10,40 | -10,17035   | 11,04 | -11,98470   |
| 9,77  | -5,24721    | 10,41 | -10,22831   | 11,05 | -11,97924   |
| 9,78  | -5,33900    | 10,42 | -10,28542   | 11,06 | -11,97266   |
| 9,79  | -5,43059    | 10,43 | -10,34174   | 11,07 | -11,96500   |
| 9,80  | -5,52191    | 10,44 | -10,39720   | 11,08 | -11,95621   |
| 9,81  | -5,61296    | 10,45 | -10,95185   | 11,09 | -11,94631   |
| 9,82  | -5,70371    | 10,46 | -10,50565   | 11,10 | -11,93530   |
| 9,83  | -5,79421    | 10,47 | -10,55861   | 11,11 | -11,92315   |
| 9,84  | -5,88440    | 10,48 | -10,61071   | 11,12 | -11,90991   |
| 9,85  | -5,97428    | 10,49 | -10,66195   | 11,13 | -11,89556   |
| 9,86  | -6,06385    | 10,50 | -10,71232   | 11,14 | -11,88010   |
| 9,87  | -6,15310    | 10,51 | -10,76181   | 11,15 | -11,86351   |
| 9,88  | -6,24201    | 10,52 | -10,81042   | 11,16 | -11,84580   |
| 9,89  | -6,33055    | 10,53 | -10,85816   | 11,17 | -11,82695   |
| 9,90  | -6,41878    | 10,54 | -10,90498   | 11,18 | -11,80701   |
| 9,91  | -6,50661    | 10,55 | -10,95090   | 11,19 | -11,78595   |
| 9,92  | -6,59410    | 10,56 | -10,99592   | 11,20 | -11,76379   |
| 9,93  | -6,68119    | 10,57 | -11,04001   | 11,21 | -11,74050   |
| 9,94  | -6,76789    | 10,58 | -11,08319   | 11,22 | -11,71608   |
| 9,95  | -6,85418    | 10,59 | -11,12542   | 11,23 | -11,69056   |
| 9,96  | -6,94004    | 10,60 | -11,16675   | 11,24 | -11,66391   |
| 9,97  | -7,02550    | 10,61 | -11,20711   | 11,25 | -11,63616   |
| 9,98  | -7,11055    | 10,62 | -11,24656   | 11,26 | -11,60728   |
| 9,99  | -7,19511    | 10,63 | -11,28502   | 11,27 | -11,57730   |
| 10,00 | -7,27925    | 10,64 | -11,32256   | 11,28 | -11,54620   |
| 10,01 | -7,36294    | 10,65 | -11,35912   | 11,29 | -11,51400   |
| 10,02 | -7,44615    | 10,66 | -11,39471   | 11,30 | -11,48068   |
| 10,03 | -7,52886    | 10,67 | -11,42930   | 11,31 | -11,44626   |
| 10,04 | -7,61112    | 10,68 | -11,46294   | 11,32 | -11,41070   |
| 10,05 | -7,69286    | 10,69 | -11,49562   | 11,33 | -11,37409   |
| 10,06 | -7,77409    | 10,70 | -11,52728   | 11,34 | -11,33635   |
| 10,07 | -7,85481    | 10,71 | -11,55795   | 11,35 | -11,29751   |
| 10,08 | -7,93500    | 10,72 | -11,58760   | 11,36 | -11,25755   |
| 10,09 | -8,01466    | 10,73 | -11,61629   | 11,37 | -11,21651   |
| 10,10 | -8,09375    | 10,74 | -11,64394   | 11,38 | -11,17440   |
| 10,11 | -8,17231    | 10,75 | -11,67059   | 11,39 | -11,13116   |
| 10,12 | -8,25031    | 10,76 | -11,69621   | 11,40 | -11,08684   |
| 10,13 | -8,32775    | 10,77 | -11,72081   | 11,41 | -11,04144   |
| 10,14 | -8,40460    | 10,78 | -11,74439   | 11,42 | -10,99496   |
| 10,15 | -8,48085    | 10,79 | -11,76691   | 11,43 | -10,94741   |
| 10,16 | -8,55651    | 10,80 | -11,78842   | 11,44 | -10,89874   |
| 10,17 | -8,63156    | 10,81 | -11,80891   | 11,45 | -10,84904   |
| 10,18 | -8,70599    | 10,82 | -11,82831   | 11,46 | -10,79825   |
| 10,19 | -8,77980    | 10,83 | -11,84670   | 11,47 | -10,74638   |
| 10,20 | -8,85296    | 10,84 | -11,86401   | 11,48 | -10,69345   |

| $y$   | $\omega(y)$ | $y$   | $\omega(y)$ | $y$   | $\omega(y)$ |
|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|
| 11,49 | -10,63946   | 12,13 | -5,22051    | 12,77 | 2,56171     |
| 11,50 | -10,58441   | 12,14 | -5,11026    | 12,78 | 2,68671     |
| 11,51 | -10,52830   | 12,15 | -4,99945    | 12,79 | 2,81151     |
| 11,52 | -10,47114   | 12,16 | -4,88804    | 12,80 | 2,93611     |
| 11,53 | -10,41292   | 12,17 | -4,77604    | 12,81 | 3,06055     |
| 11,54 | -10,35369   | 12,18 | -4,66352    | 12,82 | 3,18474     |
| 11,55 | -10,29340   | 12,19 | -4,55040    | 12,83 | 3,30875     |
| 11,56 | -10,23206   | 12,20 | -4,43678    | 12,84 | 3,43249     |
| 11,57 | -10,16971   | 12,21 | -4,32262    | 12,85 | 3,55599     |
| 11,58 | -10,10635   | 12,22 | -4,20791    | 12,86 | 3,67920     |
| 11,59 | -10,04195   | 12,23 | -4,09272    | 12,87 | 3,80216     |
| 11,60 | -9,97652    | 12,24 | -3,97704    | 12,88 | 3,92484     |
| 11,61 | -9,91011    | 12,25 | -3,86085    | 12,89 | 4,04720     |
| 11,62 | -9,84266    | 12,26 | -3,74421    | 12,90 | 4,16925     |
| 11,63 | -9,77424    | 12,27 | -3,62709    | 12,91 | 4,29096     |
| 11,64 | -9,70481    | 12,28 | -3,50951    | 12,92 | 4,41236     |
| 11,65 | -9,63439    | 12,29 | -3,39149    | 12,93 | 4,53338     |
| 11,66 | -9,56299    | 12,30 | -3,27304    | 12,94 | 4,65404     |
| 11,67 | -9,49060    | 12,31 | -3,15415    | 12,95 | 4,77430     |
| 11,68 | -9,41724    | 12,32 | -3,03489    | 12,96 | 4,89421     |
| 11,69 | -9,34292    | 12,33 | -2,91522    | 12,97 | 5,01370     |
| 11,70 | -9,26761    | 12,34 | -2,79516    | 12,98 | 5,13274     |
| 11,71 | -9,19138    | 12,35 | -2,67472    | 12,99 | 5,25140     |
| 11,72 | -9,11418    | 12,36 | -2,55392    | 13,00 | 5,36959     |
| 11,73 | -9,03604    | 12,37 | -2,43275    | 13,01 | 5,48731     |
| 11,74 | -8,95695    | 12,38 | -2,31126    | 13,02 | 5,60460     |
| 11,75 | -8,87696    | 12,39 | -2,18946    | 13,03 | 5,72139     |
| 11,76 | -8,79600    | 12,40 | -2,06730    | 13,04 | 5,83769     |
| 11,77 | -8,71415    | 12,41 | -1,94489    | 13,05 | 5,95346     |
| 11,78 | -8,63141    | 12,42 | -1,82216    | 13,06 | 6,06875     |
| 11,79 | -8,54774    | 12,43 | -1,69915    | 13,07 | 6,18349     |
| 11,80 | -8,46318    | 12,44 | -1,57585    | 13,08 | 6,29769     |
| 11,81 | -8,37770    | 12,45 | -1,45232    | 13,09 | 6,41131     |
| 11,82 | -8,29139    | 12,46 | -1,32856    | 13,10 | 6,52441     |
| 11,83 | -8,20415    | 12,47 | -1,20455    | 13,11 | 6,63690     |
| 11,84 | -8,11609    | 12,48 | -1,08032    | 13,12 | 6,74880     |
| 11,85 | -8,02715    | 12,49 | -0,95588    | 13,13 | 6,86010     |
| 11,86 | -7,93735    | 12,50 | -0,83125    | 13,14 | 6,97078     |
| 11,87 | -7,84671    | 12,51 | -0,70642    | 13,15 | 7,08081     |
| 11,88 | -7,75520    | 12,52 | -0,58145    | 13,16 | 7,19024     |
| 11,89 | -7,66291    | 12,53 | -0,45631    | 13,17 | 7,29900     |
| 11,90 | -7,56976    | 12,54 | -0,33100    | 13,18 | 7,40709     |
| 11,91 | -7,47581    | 12,55 | -0,20560    | 13,19 | 7,51451     |
| 11,92 | -7,38106    | 12,56 | -0,08004    | 13,20 | 7,62121     |
| 11,93 | -7,28551    | 12,57 | 0,04559     | 13,21 | 7,72726     |
| 11,94 | -7,18918    | 12,58 | 0,17131     | 13,22 | 7,83255     |
| 11,95 | -7,09204    | 12,59 | 0,29714     | 13,23 | 7,93716     |
| 11,96 | -6,99415    | 12,60 | 0,42306     | 13,24 | 8,04101     |
| 11,97 | -6,89551    | 12,61 | 0,54901     | 13,25 | 8,14411     |
| 11,98 | -6,79610    | 12,62 | 0,67501     | 13,26 | 8,24645     |
| 11,99 | -6,69592    | 12,63 | 0,80105     | 13,27 | 8,34801     |
| 12,00 | -6,59504    | 12,64 | 0,92710     | 13,28 | 8,44882     |
| 12,01 | -6,49342    | 12,65 | 1,05316     | 13,29 | 8,54881     |
| 12,02 | -6,39105    | 12,66 | 1,17921     | 13,30 | 8,64801     |
| 12,03 | -6,28802    | 12,67 | 1,30524     | 13,31 | 8,74638     |
| 12,04 | -6,18425    | 12,68 | 1,43125     | 13,32 | 8,84391     |
| 12,05 | -6,07982    | 12,69 | 1,55720     | 13,33 | 8,94064     |
| 12,06 | -5,97469    | 12,70 | 1,68310     | 13,34 | 9,03650     |
| 12,07 | -5,86889    | 12,71 | 1,80892     | 13,35 | 9,13150     |
| 12,08 | -5,76240    | 12,72 | 1,93468     | 13,36 | 9,22561     |
| 12,09 | -5,65531    | 12,73 | 2,06032     | 13,37 | 9,31885     |
| 12,10 | -5,54755    | 12,74 | 2,18588     | 13,38 | 9,40121     |
| 12,11 | -5,43916    | 12,75 | 2,31130     | 13,39 | 9,50266     |
| 12,12 | -5,33012    | 12,76 | 2,43659     | 13,40 | 9,59321     |

| y     | $\omega(y)$ | y     | $\omega(y)$ | y     | $\omega(y)$ |
|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|
| 13,41 | 9,68280     | 14,05 | 13,08371    | 14,69 | 10,97670    |
| 13,42 | 9,77150     | 14,06 | 13,09525    | 14,70 | 10,89891    |
| 13,43 | 9,85920     | 14,07 | 13,10539    | 14,71 | 10,81981    |
| 13,44 | 9,94600     | 14,08 | 13,11412    | 14,72 | 10,73946    |
| 13,45 | 10,03180    | 14,09 | 13,12148    | 14,73 | 10,65780    |
| 13,46 | 10,11662    | 14,10 | 13,12740    | 14,74 | 10,57484    |
| 13,47 | 10,20046    | 14,11 | 13,13196    | 14,75 | 10,49066    |
| 13,48 | 10,28331    | 14,12 | 13,13509    | 14,76 | 10,40518    |
| 13,49 | 10,36515    | 14,13 | 13,13681    | 14,77 | 10,31845    |
| 13,50 | 10,44599    | 14,14 | 13,13711    | 14,78 | 10,23046    |
| 13,51 | 10,52579    | 14,15 | 13,13600    | 14,79 | 10,14126    |
| 13,52 | 10,60456    | 14,16 | 13,13348    | 14,80 | 10,05080    |
| 13,53 | 10,68226    | 14,17 | 13,12952    | 14,81 | 9,95912     |
| 13,54 | 10,75894    | 14,18 | 13,12416    | 14,82 | 9,86621     |
| 13,55 | 10,83455    | 14,19 | 13,11740    | 14,83 | 9,77209     |
| 13,56 | 10,90906    | 14,20 | 13,10919    | 14,84 | 9,67675     |
| 13,57 | 10,98251    | 14,21 | 13,09954    | 14,85 | 9,58025     |
| 13,58 | 11,05488    | 14,22 | 13,08851    | 14,86 | 9,48254     |
| 13,59 | 11,12614    | 14,23 | 13,07601    | 14,87 | 9,38365     |
| 13,60 | 11,19629    | 14,24 | 13,06211    | 14,88 | 9,28359     |
| 13,61 | 11,26530    | 14,25 | 13,04680    | 14,89 | 9,18235     |
| 13,62 | 11,33321    | 14,26 | 13,03004    | 14,90 | 9,07999     |
| 13,63 | 11,40000    | 14,27 | 13,01185    | 14,91 | 8,97644     |
| 13,64 | 11,46561    | 14,28 | 12,99224    | 14,92 | 8,87180     |
| 13,65 | 11,53011    | 14,29 | 12,97120    | 14,93 | 8,76600     |
| 13,66 | 11,59340    | 14,30 | 12,94871    | 14,94 | 8,65909     |
| 13,67 | 11,65556    | 14,31 | 12,92482    | 14,95 | 8,55105     |
| 13,68 | 11,71655    | 14,32 | 12,89951    | 14,96 | 8,44195     |
| 13,69 | 11,77634    | 14,33 | 12,87274    | 14,97 | 8,33174     |
| 13,70 | 11,83494    | 14,34 | 12,84459    | 14,98 | 8,22045     |
| 13,71 | 11,89234    | 14,35 | 12,81499    | 14,99 | 8,10808     |
| 13,72 | 11,94854    | 14,36 | 12,78395    | 15,00 | 7,99466     |
| 13,73 | 12,00350    | 14,37 | 12,75150    | 15,01 | 7,88018     |
| 13,74 | 12,05728    | 14,38 | 12,71766    | 15,02 | 7,76464     |
| 13,75 | 12,10982    | 14,39 | 12,68235    | 15,03 | 7,64811     |
| 13,76 | 12,16111    | 14,40 | 12,64564    | 15,04 | 7,53054     |
| 13,77 | 12,21115    | 14,41 | 12,60754    | 15,05 | 7,41194     |
| 13,78 | 12,25995    | 14,42 | 12,56801    | 15,06 | 7,29239     |
| 13,79 | 12,30750    | 14,43 | 12,52704    | 15,07 | 7,17182     |
| 13,80 | 12,35381    | 14,44 | 12,48470    | 15,08 | 7,05025     |
| 13,81 | 12,39880    | 14,45 | 12,44091    | 15,09 | 6,92776     |
| 13,82 | 12,44254    | 14,46 | 12,39574    | 15,10 | 6,80429     |
| 13,83 | 12,48500    | 14,47 | 12,34918    | 15,11 | 6,67986     |
| 13,84 | 12,52620    | 14,48 | 12,30121    | 15,12 | 6,55451     |
| 13,85 | 12,56605    | 14,49 | 12,25182    | 15,13 | 6,42824     |
| 13,86 | 12,60465    | 14,50 | 12,20105    | 15,14 | 6,30108     |
| 13,87 | 12,64190    | 14,51 | 12,14891    | 15,15 | 6,17301     |
| 13,88 | 12,67788    | 14,52 | 12,09534    | 15,16 | 6,04304     |
| 13,89 | 12,71251    | 14,53 | 12,04041    | 15,17 | 5,91420     |
| 13,90 | 12,74585    | 14,54 | 11,98410    | 15,18 | 5,78350     |
| 13,91 | 12,77784    | 14,55 | 11,92641    | 15,19 | 5,65195     |
| 13,92 | 12,80850    | 14,56 | 11,86735    | 15,20 | 5,51956     |
| 13,93 | 12,83781    | 14,57 | 11,80694    | 15,21 | 5,38632     |
| 13,94 | 12,86581    | 14,58 | 11,74515    | 15,22 | 5,25230     |
| 13,95 | 12,89244    | 14,59 | 11,68199    | 15,23 | 5,11745     |
| 13,96 | 12,91770    | 14,60 | 11,61748    | 15,24 | 4,98184     |
| 13,97 | 12,94165    | 14,61 | 11,55160    | 15,25 | 4,84544     |
| 13,98 | 12,96421    | 14,62 | 11,48442    | 15,26 | 4,70826     |
| 13,99 | 12,98541    | 14,63 | 11,41585    | 15,27 | 4,57034     |
| 14,00 | 13,00522    | 14,64 | 11,34598    | 15,28 | 4,43171     |
| 14,01 | 13,02369    | 14,65 | 11,27474    | 15,29 | 4,29231     |
| 14,02 | 13,04075    | 14,66 | 11,20220    | 15,30 | 4,15222     |
| 14,03 | 13,05645    | 14,67 | 11,12834    | 15,31 | 4,01144     |
| 14,04 | 13,07079    | 14,68 | 11,05319    | 15,32 | 3,86995     |

| y     | $\omega(y)$ | y     | $\omega(y)$ | y     | $\omega(y)$ |
|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|
| 15,33 | 3,72780     | 15,97 | -6,10281    | 16,61 | -14,65205   |
| 15,34 | 3,58501     | 15,98 | -6,25691    | 16,62 | -14,75441   |
| 15,35 | 3,44154     | 15,99 | -6,41065    | 16,63 | -14,85550   |
| 15,36 | 3,29746     | 16,00 | -6,56405    | 16,64 | -14,95534   |
| 15,37 | 3,15276     | 16,01 | -6,71711    | 16,65 | -15,05391   |
| 15,38 | 3,00745     | 16,02 | -6,86975    | 16,66 | -15,15121   |
| 15,39 | 2,86156     | 16,03 | -7,02202    | 16,67 | -15,24720   |
| 15,40 | 2,71511     | 16,04 | -7,17389    | 16,68 | -15,34184   |
| 15,41 | 2,56805     | 16,05 | -7,32531    | 16,69 | -15,43522   |
| 15,42 | 2,42049     | 16,06 | -7,47629    | 16,70 | -15,52721   |
| 15,43 | 2,27236     | 16,07 | -7,62681    | 16,71 | -15,61790   |
| 15,44 | 2,12374     | 16,08 | -7,77685    | 16,72 | -15,70720   |
| 15,45 | 1,97460     | 16,09 | -7,92640    | 16,73 | -15,79516   |
| 15,46 | 1,82495     | 16,10 | -8,07544    | 16,74 | -15,88176   |
| 15,47 | 1,67484     | 16,11 | -8,22395    | 16,75 | -15,96695   |
| 15,48 | 1,52430     | 16,12 | -8,37195    | 16,76 | -16,05075   |
| 15,49 | 1,37326     | 16,13 | -8,51936    | 16,77 | -16,13314   |
| 15,50 | 1,22181     | 16,14 | -8,66622    | 16,78 | -16,21410   |
| 15,51 | 1,06994     | 16,15 | -8,81251    | 16,79 | -16,29365   |
| 15,52 | 0,91769     | 16,16 | -8,95819    | 16,80 | -16,37179   |
| 15,53 | 0,76502     | 16,17 | -9,10325    | 16,81 | -16,44846   |
| 15,54 | 0,61200     | 16,18 | -9,24765    | 16,82 | -16,52365   |
| 15,55 | 0,45862     | 16,19 | -9,39145    | 16,83 | -16,59740   |
| 15,56 | 0,30488     | 16,20 | -9,53455    | 16,84 | -16,66970   |
| 15,57 | 0,15080     | 16,21 | -9,67701    | 16,85 | -16,74050   |
| 15,58 | -0,00355    | 16,22 | -9,81874    | 16,86 | -16,80981   |
| 15,59 | -0,15821    | 16,23 | -9,95980    | 16,87 | -16,87761   |
| 15,60 | -0,31318    | 16,24 | -10,10010   | 16,88 | -16,94391   |
| 15,61 | -0,46840    | 16,25 | -10,23970   | 16,89 | -17,00869   |
| 15,62 | -0,62386    | 16,26 | -10,37851   | 16,90 | -17,07195   |
| 15,63 | -0,77959    | 16,27 | -10,51660   | 16,91 | -17,13365   |
| 15,64 | -0,93550    | 16,28 | -10,65385   | 16,92 | -17,19386   |
| 15,65 | -1,09164    | 16,29 | -10,79036   | 16,93 | -17,25249   |
| 15,66 | -1,24799    | 16,30 | -10,92600   | 16,94 | -17,30954   |
| 15,67 | -1,40450    | 16,31 | -11,06085   | 16,95 | -17,36506   |
| 15,68 | -1,56114    | 16,32 | -11,19485   | 16,96 | -17,41902   |
| 15,69 | -1,71795    | 16,33 | -11,32801   | 16,97 | -17,47136   |
| 15,70 | -1,87491    | 16,34 | -11,46029   | 16,98 | -17,52215   |
| 15,71 | -2,03196    | 16,35 | -11,59168   | 16,99 | -17,57131   |
| 15,72 | -2,18910    | 16,36 | -11,72215   | 17,00 | -17,61811   |
| 15,73 | -2,34631    | 16,37 | -11,85175   | 17,01 | -17,66488   |
| 15,74 | -2,50362    | 16,38 | -11,98040   | 17,02 | -17,70924   |
| 15,75 | -2,66094    | 16,39 | -12,10811   | 17,03 | -17,75198   |
| 15,76 | -2,81832    | 16,40 | -12,23485   | 17,04 | -17,79310   |
| 15,77 | -2,97571    | 16,41 | -12,36065   | 17,05 | -17,83258   |
| 15,78 | -3,13310    | 16,42 | -12,48545   | 17,06 | -17,87041   |
| 15,79 | -3,29050    | 16,43 | -12,60926   | 17,07 | -17,90661   |
| 15,80 | -3,44786    | 16,44 | -12,73205   | 17,08 | -17,94118   |
| 15,81 | -3,60514    | 16,45 | -12,85382   | 17,09 | -17,97406   |
| 15,82 | -3,76241    | 16,46 | -12,97455   | 17,10 | -18,00532   |
| 15,83 | -3,91955    | 16,47 | -13,09421   | 17,11 | -18,03489   |
| 15,84 | -4,07665    | 16,48 | -13,21284   | 17,12 | -18,06279   |
| 15,85 | -4,23361    | 16,49 | -13,33038   | 17,13 | -18,08902   |
| 15,86 | -4,39045    | 16,50 | -13,44681   | 17,14 | -18,11355   |
| 15,87 | -4,54715    | 16,51 | -13,56214   | 17,15 | -18,13641   |
| 15,88 | -4,70369    | 16,52 | -13,67639   | 17,16 | -18,15761   |
| 15,89 | -4,86005    | 16,53 | -13,78949   | 17,17 | -18,17709   |
| 15,90 | -5,01621    | 16,54 | -13,90142   | 17,18 | -18,19488   |
| 15,91 | -5,17220    | 16,55 | -14,01222   | 17,19 | -18,21095   |
| 15,92 | -5,32795    | 16,56 | -14,12184   | 17,20 | -18,22536   |
| 15,93 | -5,48345    | 16,57 | -14,23031   | 17,21 | -18,23802   |
| 15,94 | -5,63871    | 16,58 | -14,33754   | 17,22 | -18,24901   |
| 15,95 | -5,79372    | 16,59 | -14,44362   | 17,23 | -18,25824   |
| 15,96 | -5,94840    | 16,60 | -14,54845   | 17,24 | -18,26580   |

| y     | $\omega(y)$ | y     | $\omega(y)$ | y     | $\omega(y)$ |
|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|
| 17,25 | -18,27160   | 17,89 | -15,07691   | 18,53 | -5,87178    |
| 17,26 | -18,27570   | 17,90 | -14,97350   | 18,54 | -5,69551    |
| 17,27 | -18,27810   | 17,91 | -14,86856   | 18,55 | -5,51861    |
| 17,28 | -18,27875   | 17,92 | -14,76211   | 18,56 | -5,34106    |
| 17,29 | -18,27765   | 17,93 | -14,65415   | 18,57 | -5,16285    |
| 17,30 | -18,27484   | 17,94 | -14,54474   | 18,58 | -4,98408    |
| 17,31 | -18,27030   | 17,95 | -14,43382   | 18,59 | -4,80470    |
| 17,32 | -18,26405   | 17,96 | -14,32144   | 18,60 | -4,62474    |
| 17,33 | -18,25604   | 17,97 | -14,20761   | 18,61 | -4,44421    |
| 17,34 | -18,24630   | 17,98 | -14,09235   | 18,62 | -4,26316    |
| 17,35 | -18,23482   | 17,99 | -13,97562   | 18,63 | -4,08160    |
| 17,36 | -18,22160   | 18,00 | -13,85719   | 18,64 | -3,89951    |
| 17,37 | -18,20664   | 18,01 | -13,73790   | 18,65 | -3,71694    |
| 17,38 | -18,18995   | 18,02 | -13,61695   | 18,66 | -3,53391    |
| 17,39 | -18,17151   | 18,03 | -13,49459   | 18,67 | -3,35046    |
| 17,40 | -18,15132   | 18,04 | -13,37081   | 18,68 | -3,16654    |
| 17,41 | -18,12940   | 18,05 | -13,24570   | 18,69 | -2,98222    |
| 17,42 | -18,10575   | 18,06 | -13,11921   | 18,70 | -2,79750    |
| 17,43 | -18,08038   | 18,07 | -12,99134   | 18,71 | -2,61240    |
| 17,44 | -18,05325   | 18,08 | -12,86216   | 18,72 | -2,42694    |
| 17,45 | -18,02438   | 18,09 | -12,73164   | 18,73 | -2,24114    |
| 17,46 | -17,99378   | 18,10 | -12,59981   | 18,74 | -2,05500    |
| 17,47 | -17,96144   | 18,11 | -12,46668   | 18,75 | -1,86859    |
| 17,48 | -17,92735   | 18,12 | -12,33225   | 18,76 | -1,68188    |
| 17,49 | -17,89154   | 18,13 | -12,19651   | 18,77 | -1,49491    |
| 17,50 | -17,85401   | 18,14 | -12,05954   | 18,78 | -1,30766    |
| 17,51 | -17,81474   | 18,15 | -11,92130   | 18,79 | -1,12020    |
| 17,52 | -17,77375   | 18,16 | -11,78181   | 18,80 | -0,93255    |
| 17,53 | -17,73105   | 18,17 | -11,64108   | 18,81 | -0,74469    |
| 17,54 | -17,68661   | 18,18 | -11,49914   | 18,82 | -0,55665    |
| 17,55 | -17,64045   | 18,19 | -11,35599   | 18,83 | -0,36844    |
| 17,56 | -17,59255   | 18,20 | -11,21165   | 18,84 | -0,18011    |
| 17,57 | -17,54296   | 18,21 | -11,06610   | 18,85 | 0,00832     |
| 17,58 | -17,49165   | 18,22 | -10,91941   | 18,86 | 0,19684     |
| 17,59 | -17,43866   | 18,23 | -10,77159   | 18,87 | 0,38549     |
| 17,60 | -17,38392   | 18,24 | -10,62260   | 18,88 | 0,57416     |
| 17,61 | -17,32752   | 18,25 | -10,47249   | 18,89 | 0,76291     |
| 17,62 | -17,26940   | 18,26 | -10,32125   | 18,90 | 0,95164     |
| 17,63 | -17,20958   | 18,27 | -10,16895   | 18,91 | 1,14040     |
| 17,64 | -17,14808   | 18,28 | -10,01554   | 18,92 | 1,32914     |
| 17,65 | -17,08490   | 18,29 | -9,86105    | 18,93 | 1,51786     |
| 17,66 | -17,02001   | 18,30 | -9,70552    | 18,94 | 1,70651     |
| 17,67 | -16,95348   | 18,31 | -9,54894    | 18,95 | 1,89510     |
| 17,68 | -16,88525   | 18,32 | -9,39134    | 18,96 | 2,08362     |
| 17,69 | -16,81538   | 18,33 | -9,23275    | 18,97 | 2,27200     |
| 17,70 | -16,74382   | 18,34 | -9,07315    | 18,98 | 2,46024     |
| 17,71 | -16,67062   | 18,35 | -8,91256    | 18,99 | 2,64835     |
| 17,72 | -16,59579   | 18,36 | -8,75100    | 19,00 | 2,83632     |
| 17,73 | -16,51929   | 18,37 | -8,58849    | 19,01 | 3,02406     |
| 17,74 | -16,44116   | 18,38 | -8,42505    | 19,02 | 3,21161     |
| 17,75 | -16,36139   | 18,39 | -8,26068    | 19,03 | 3,39896     |
| 17,76 | -16,28000   | 18,40 | -8,09542    | 19,04 | 3,58604     |
| 17,77 | -16,19696   | 18,41 | -7,92926    | 19,05 | 3,77284     |
| 17,78 | -16,11234   | 18,42 | -7,76220    | 19,06 | 3,95941     |
| 17,79 | -16,02611   | 18,43 | -7,59431    | 19,07 | 4,14565     |
| 17,80 | -15,93825   | 18,44 | -7,42560    | 19,08 | 4,33155     |
| 17,81 | -15,84882   | 18,45 | -7,25602    | 19,09 | 4,51716     |
| 17,82 | -15,75780   | 18,46 | -7,08565    | 19,10 | 4,70238     |
| 17,83 | -15,66520   | 18,47 | -6,91450    | 19,11 | 4,88721     |
| 17,84 | -15,57106   | 18,48 | -6,74254    | 19,12 | 5,07169     |
| 17,85 | -15,47531   | 18,49 | -6,56984    | 19,13 | 5,25571     |
| 17,86 | -15,37802   | 18,50 | -6,39642    | 19,14 | 5,43931     |
| 17,87 | -15,27920   | 18,51 | -6,22224    | 19,15 | 5,62240     |
| 17,88 | -15,17881   | 18,52 | -6,04734    | 19,16 | 5,80515     |

| y     | $\omega(y)$ | y     | $\omega(y)$ | y     | $\omega(y)$ |
|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|
| 19,17 | 5,98734     | 19,81 | 15,80635    | 20,45 | 19,41135    |
| 19,18 | 6,16905     | 19,82 | 15,91911    | 20,46 | 19,40429    |
| 19,19 | 6,35020     | 19,83 | 16,03029    | 20,47 | 19,39516    |
| 19,20 | 6,53082     | 19,84 | 16,13986    | 20,48 | 19,38395    |
| 19,21 | 6,71086     | 19,85 | 16,24786    | 20,49 | 19,37074    |
| 19,22 | 6,89009     | 19,86 | 16,35420    | 20,50 | 19,35546    |
| 19,23 | 7,06916     | 19,87 | 16,45894    | 20,51 | 19,33810    |
| 19,24 | 7,24742     | 19,88 | 16,56206    | 20,52 | 19,31871    |
| 19,25 | 7,42501     | 19,89 | 16,66350    | 20,53 | 19,29729    |
| 19,26 | 7,60195     | 19,90 | 16,76326    | 20,54 | 19,27380    |
| 19,27 | 7,77821     | 19,91 | 16,86136    | 20,55 | 19,24824    |
| 19,28 | 7,95377     | 19,92 | 16,95779    | 20,56 | 19,22065    |
| 19,29 | 8,12861     | 19,93 | 17,05260    | 20,57 | 19,19100    |
| 19,30 | 8,30276     | 19,94 | 17,14550    | 20,58 | 19,15931    |
| 19,31 | 8,47611     | 19,95 | 17,23676    | 20,59 | 19,12560    |
| 19,32 | 8,64871     | 19,96 | 17,32630    | 20,60 | 19,08981    |
| 19,33 | 8,82054     | 19,97 | 17,41411    | 20,61 | 19,05196    |
| 19,34 | 8,99156     | 19,98 | 17,50015    | 20,62 | 19,01211    |
| 19,35 | 9,16174     | 19,99 | 17,58446    | 20,63 | 18,97019    |
| 19,36 | 9,33109     | 20,00 | 17,66694    | 20,64 | 18,92624    |
| 19,37 | 9,49958     | 20,01 | 17,74769    | 20,65 | 18,88025    |
| 19,38 | 9,66720     | 20,02 | 17,82662    | 20,66 | 18,83221    |
| 19,39 | 9,83391     | 20,03 | 17,90372    | 20,67 | 18,78216    |
| 19,40 | 9,99970     | 20,04 | 17,97905    | 20,68 | 18,73010    |
| 19,41 | 10,16460    | 20,05 | 18,05251    | 20,69 | 18,67599    |
| 19,42 | 10,32851    | 20,06 | 18,12418    | 20,70 | 18,61984    |
| 19,43 | 10,49149    | 20,07 | 18,19400    | 20,71 | 18,56170    |
| 19,44 | 10,65346    | 20,08 | 18,26196    | 20,72 | 18,50155    |
| 19,45 | 10,81444    | 20,09 | 18,32806    | 20,73 | 18,43940    |
| 19,46 | 10,97441    | 20,10 | 18,39229    | 20,74 | 18,37521    |
| 19,47 | 11,13334    | 20,11 | 18,45464    | 20,75 | 18,30904    |
| 19,48 | 11,29125    | 20,12 | 18,51512    | 20,76 | 18,24089    |
| 19,49 | 11,44805    | 20,13 | 18,57370    | 20,77 | 18,17072    |
| 19,50 | 11,60380    | 20,14 | 18,63036    | 20,78 | 18,09860    |
| 19,51 | 11,75841    | 20,15 | 18,68515    | 20,79 | 18,02445    |
| 19,52 | 11,91194    | 20,16 | 18,73800    | 20,80 | 17,94835    |
| 19,53 | 12,06430    | 20,17 | 18,78892    | 20,81 | 17,87031    |
| 19,54 | 12,21555    | 20,18 | 18,83794    | 20,82 | 17,79026    |
| 19,55 | 12,36561    | 20,19 | 18,88501    | 20,83 | 17,70829    |
| 19,56 | 12,51448    | 20,20 | 18,93012    | 20,84 | 17,62436    |
| 19,57 | 12,66214    | 20,21 | 18,97331    | 20,85 | 17,53846    |
| 19,58 | 12,80860    | 20,22 | 19,01452    | 20,86 | 17,45065    |
| 19,59 | 12,95385    | 20,23 | 19,05380    | 20,87 | 17,36091    |
| 19,60 | 13,09781    | 20,24 | 19,09109    | 20,88 | 17,26924    |
| 19,61 | 13,24055    | 20,25 | 19,12641    | 20,89 | 17,17565    |
| 19,62 | 13,38199    | 20,26 | 19,15975    | 20,90 | 17,08016    |
| 19,63 | 13,52211    | 20,27 | 19,19110    | 20,91 | 16,98274    |
| 19,64 | 13,66095    | 20,28 | 19,22045    | 20,98 | 16,88346    |
| 19,65 | 13,79845    | 20,29 | 19,24784    | 20,93 | 16,78231    |
| 19,66 | 13,93464    | 20,30 | 19,27322    | 20,94 | 16,67926    |
| 19,67 | 14,06946    | 20,31 | 19,29659    | 20,95 | 16,57434    |
| 19,68 | 14,20290    | 20,32 | 19,31795    | 20,96 | 16,46755    |
| 19,69 | 14,33495    | 20,33 | 19,33730    | 20,97 | 16,35895    |
| 19,70 | 14,46561    | 20,34 | 19,35462    | 20,98 | 16,24849    |
| 19,71 | 14,59485    | 20,35 | 19,36995    | 20,99 | 16,13619    |
| 19,72 | 14,72264    | 20,36 | 19,38324    | 21,00 | 16,02206    |
| 19,73 | 14,84900    | 20,37 | 19,39457    | 21,01 | 15,90615    |
| 19,74 | 14,97394    | 20,38 | 19,40375    | 21,02 | 15,78840    |
| 19,75 | 15,09738    | 20,39 | 19,41095    | 21,03 | 15,66890    |
| 19,76 | 15,21932    | 20,40 | 19,41611    | 21,04 | 15,54760    |
| 19,77 | 15,33979    | 20,41 | 19,41923    | 21,05 | 15,42451    |
| 19,78 | 15,45872    | 20,42 | 19,42035    | 21,06 | 15,29970    |
| 19,79 | 15,57615    | 20,43 | 19,41941    | 21,07 | 15,17311    |
| 19,80 | 15,69201    | 20,44 | 19,41641    | 21,08 | 15,04479    |

| $y$   | $\omega(y)$ | $y$   | $\omega(y)$ | $y$   | $\omega(y)$ |
|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|
| 21,09 | 14,91474    | 21,73 | 3,64445     | 22,37 | -10,20265   |
| 21,10 | 14,78298    | 21,74 | 3,43419     | 22,38 | -10,41011   |
| 21,11 | 14,64952    | 21,75 | 3,22330     | 22,39 | -10,61680   |
| 21,12 | 14,51436    | 21,76 | 3,01179     | 22,40 | -10,82276   |
| 21,13 | 14,37752    | 21,77 | 2,79968     | 22,41 | -11,02789   |
| 21,14 | 14,23801    | 21,78 | 2,58700     | 22,42 | -11,23221   |
| 21,15 | 14,09885    | 21,79 | 2,37374     | 22,43 | -11,43568   |
| 21,16 | 13,95702    | 21,80 | 2,15999     | 22,44 | -11,63829   |
| 21,17 | 13,81360    | 21,81 | 1,94571     | 22,45 | -11,84002   |
| 21,18 | 13,66855    | 21,82 | 1,73092     | 22,46 | -12,04084   |
| 21,19 | 13,52189    | 21,83 | 1,51569     | 22,47 | -12,24072   |
| 21,20 | 13,37362    | 21,84 | 1,30000     | 22,48 | -12,43969   |
| 21,21 | 13,22381    | 21,85 | 1,08388     | 22,49 | -12,63765   |
| 21,22 | 13,07242    | 21,86 | 0,86736     | 22,50 | -12,83465   |
| 21,23 | 13,91945    | 21,87 | 0,65044     | 22,51 | -13,03065   |
| 21,24 | 12,76499    | 21,88 | 0,43315     | 22,52 | -13,22561   |
| 21,25 | 12,60899    | 21,89 | 0,21555     | 22,53 | -13,41952   |
| 21,26 | 12,45148    | 21,90 | -0,00239    | 22,54 | -13,61235   |
| 21,27 | 12,29245    | 21,91 | -0,22060    | 22,55 | -13,80410   |
| 21,28 | 12,13199    | 21,92 | -0,43912    | 22,56 | -13,99471   |
| 21,29 | 11,97004    | 21,93 | -0,65791    | 22,57 | -14,18422   |
| 21,30 | 11,80664    | 21,94 | -0,87691    | 22,58 | -14,37259   |
| 21,31 | 11,64181    | 21,95 | -1,09610    | 22,59 | -14,55975   |
| 21,32 | 11,47555    | 21,96 | -1,31551    | 22,60 | -14,74574   |
| 21,33 | 11,30790    | 21,97 | -1,53510    | 22,61 | -14,93055   |
| 21,34 | 11,13885    | 21,98 | -1,75480    | 22,62 | -15,11409   |
| 21,35 | 10,96841    | 21,99 | -1,97465    | 22,63 | -15,29640   |
| 21,36 | 10,79665    | 22,00 | -2,19462    | 22,64 | -15,47741   |
| 21,37 | 10,62352    | 22,01 | -2,41464    | 22,65 | -15,65715   |
| 21,38 | 10,44909    | 22,02 | -2,63471    | 22,66 | -15,83561   |
| 21,39 | 10,27334    | 22,03 | -2,85485    | 22,67 | -16,01272   |
| 21,40 | 10,09630    | 22,04 | -3,07499    | 22,68 | -16,18848   |
| 21,41 | 9,91798     | 22,05 | -3,29510    | 22,69 | -16,36288   |
| 21,42 | 9,73840     | 22,06 | -3,51520    | 22,70 | -16,53589   |
| 21,43 | 9,55758     | 22,07 | -3,73525    | 22,71 | -16,70751   |
| 21,44 | 9,37552     | 22,08 | -3,95524    | 22,72 | -16,87771   |
| 21,45 | 9,19228     | 22,09 | -4,17512    | 22,73 | -17,04644   |
| 21,46 | 9,00784     | 22,10 | -4,39486    | 22,74 | -17,21374   |
| 21,47 | 8,82220     | 22,11 | -4,61450    | 22,75 | -17,37959   |
| 21,48 | 8,63545     | 22,12 | -4,83395    | 22,76 | -17,54392   |
| 21,49 | 8,44754     | 22,13 | -5,05320    | 22,77 | -17,70672   |
| 21,50 | 8,25851     | 22,14 | -5,27228    | 22,78 | -17,86801   |
| 21,51 | 8,06836     | 22,15 | -5,49112    | 22,79 | -18,02776   |
| 21,52 | 7,87716     | 22,16 | -5,70970    | 22,80 | -18,18594   |
| 21,53 | 7,68486     | 22,17 | -5,92801    | 22,81 | -18,34254   |
| 21,54 | 7,49155     | 22,18 | -6,14602    | 22,82 | -18,49755   |
| 21,55 | 7,29719     | 22,19 | -6,36371    | 22,83 | -18,65096   |
| 21,56 | 7,10182     | 22,20 | -6,58105    | 22,84 | -18,80272   |
| 21,57 | 6,90545     | 22,21 | -6,79806    | 22,85 | -18,95281   |
| 21,58 | 6,70812     | 22,22 | -7,01464    | 22,86 | -19,10125   |
| 21,59 | 6,50981     | 22,23 | -7,23084    | 22,87 | -19,24802   |
| 21,60 | 6,31060     | 22,24 | -7,44662    | 22,88 | -19,39311   |
| 21,61 | 6,11044     | 22,25 | -7,66196    | 22,89 | -19,53644   |
| 21,62 | 5,90941     | 22,26 | -7,87680    | 22,90 | -19,67809   |
| 21,63 | 5,70751     | 22,27 | -8,09116    | 22,91 | -19,81795   |
| 21,64 | 5,50474     | 22,28 | -8,30499    | 22,92 | -19,95608   |
| 21,65 | 5,30111     | 22,29 | -8,51822    | 22,93 | -20,09241   |
| 21,66 | 5,09670     | 22,30 | -8,73100    | 22,94 | -20,22699   |
| 21,67 | 4,89145     | 22,31 | -8,94315    | 22,95 | -20,35972   |
| 21,68 | 4,68545     | 22,32 | -9,15471    | 22,96 | -20,49064   |
| 21,69 | 4,47870     | 22,33 | -9,36565    | 22,97 | -20,61975   |
| 21,70 | 4,27120     | 2,234 | -9,57591    | 22,98 | -20,74699   |
| 21,71 | 4,06295     | 22,35 | -9,78551    | 22,99 | -20,87234   |
| 21,72 | 3,85405     | 22,36 | -9,99444    | 23,00 | -20,99584   |

| y     | $\omega(y)$ | y     | $\omega(y)$ | y     | $\omega(y)$ |
|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|
| 23,01 | -21,11745   | 23,65 | -24,47044   | 24,56 | -13,46964   |
| 23,02 | -21,23714   | 23,66 | -24,44844   | 24,60 | -12,63291   |
| 23,03 | -21,35492   | 23,67 | -24,42412   | 24,64 | -11,77481   |
| 23,04 | -21,47078   | 23,68 | -24,39741   | 24,68 | -10,89665   |
| 23,05 | -21,58466   | 23,69 | -24,36832   | 24,72 | -9,99980    |
| 23,06 | -21,69661   | 23,70 | -24,33690   | 24,76 | -9,08561    |
| 23,07 | -21,80655   | 23,71 | -24,30311   | 24,80 | -8,15550    |
| 23,08 | -21,91455   | 23,72 | -24,26696   | 24,84 | -7,21090    |
| 23,09 | -22,02050   | 23,73 | -24,22844   | 24,88 | -6,25334    |
| 23,10 | -22,12448   | 23,74 | -24,18755   | 24,92 | -5,28424    |
| 23,11 | -22,22641   | 23,75 | -24,14435   | 24,96 | -4,30520    |
| 23,12 | -22,32631   | 23,76 | -24,09876   | 25,00 | -3,31738    |
| 23,13 | -22,42419   | 23,77 | -24,05085   | 25,04 | -2,32332    |
| 23,14 | -22,51999   | 23,78 | -24,00058   | 25,08 | -1,32362    |
| 23,15 | -22,61370   | 23,79 | -23,94795   | 25,12 | -0,32074    |
| 23,16 | -22,70535   | 23,80 | -23,89301   | 25,16 | 0,68523     |
| 23,17 | -22,79491   | 23,81 | -23,83570   | 25,20 | 1,69125     |
| 23,18 | -22,88238   | 23,82 | -23,77610   | 25,24 | 2,69615     |
| 23,19 | -22,96770   | 23,83 | -23,71415   | 25,28 | 3,69831     |
| 23,20 | -23,05092   | 23,84 | -23,64985   | 25,32 | 4,69614     |
| 23,21 | -23,13200   | 23,85 | -23,58386   | 25,36 | 5,68798     |
| 23,22 | -23,21096   | 23,86 | -23,51435   | 25,40 | 6,67224     |
| 23,23 | -23,28774   | 23,87 | -23,44314   | 25,44 | 7,64731     |
| 23,24 | -23,36233   | 23,88 | -23,36962   | 25,48 | 8,60564     |
| 23,25 | -23,43481   | 23,89 | -23,29379   | 25,52 | 9,56351     |
| 23,26 | -23,50505   | 23,90 | -23,21565   | 25,56 | 10,50150    |
| 23,27 | -23,57314   | 23,91 | -23,13525   | 25,60 | 11,42399    |
| 23,28 | -23,63900   | 23,92 | -23,05256   | 25,64 | 12,32945    |
| 23,29 | -23,70269   | 23,93 | -22,96761   | 25,68 | 13,21640    |
| 23,30 | -23,76412   | 23,94 | -22,88037   | 25,72 | 14,08334    |
| 23,31 | -23,82334   | 23,95 | -22,79089   | 25,76 | 14,92880    |
| 23,32 | -23,88035   | 23,96 | -22,69912   | 25,80 | 15,75138    |
| 23,33 | -23,93510   | 23,97 | -22,60512   | 25,84 | 16,54494    |
| 23,34 | -23,98761   | 23,98 | -22,50890   | 25,88 | 17,32235    |
| 23,35 | -24,03784   | 23,99 | -22,41041   | 25,92 | 18,06795    |
| 23,36 | -24,08585   | 24,00 | -22,30974   | 25,96 | 18,78550    |
| 23,37 | -24,13155   | 24,01 | -22,20681   | 26,00 | 19,47371    |
| 23,38 | -24,17501   | 24,02 | -22,10172   | 26,04 | 20,13061    |
| 23,39 | -24,21616   | 24,03 | -21,99440   | 26,08 | 20,75606    |
| 23,40 | -24,25505   | 24,04 | -21,88490   | 26,12 | 21,34855    |
| 23,41 | -24,29162   | 24,05 | -21,77321   | 26,16 | 21,90705    |
| 23,42 | -24,32592   | 24,06 | -21,65936   | 26,20 | 22,43056    |
| 23,43 | -24,35790   | 24,07 | -21,54334   | 26,24 | 22,91811    |
| 23,44 | -24,38755   | 24,08 | -21,42515   | 26,28 | 23,36884    |
| 23,45 | -24,41490   | 24,09 | -21,30484   | 26,32 | 23,77966    |
| 23,46 | -24,43994   | 24,10 | -21,18242   | 26,36 | 24,15654    |
| 23,47 | -24,46266   | 24,11 | -21,05786   | 26,40 | 24,49199    |
| 23,48 | -24,48301   | 24,12 | -20,93117   | 26,44 | 24,78762    |
| 23,49 | -24,50111   | 24,13 | -20,80241   | 26,48 | 25,04282    |
| 23,50 | -24,51681   | 24,14 | -20,67155   | 26,52 | 25,25705    |
| 23,51 | -24,53021   | 24,15 | -20,53862   | 26,56 | 25,42989    |
| 23,52 | -24,54125   | 24,16 | -20,40362   | 26,60 | 25,56090    |
| 23,53 | -24,54992   | 24,17 | -20,26654   | 26,64 | 25,64975    |
| 23,54 | -24,55626   | 24,18 | -20,12745   | 26,68 | 25,69615    |
| 23,55 | -24,56025   | 24,19 | -19,98635   | 26,72 | 25,69990    |
| 23,56 | -24,56190   | 24,20 | -19,84990   | 26,76 | 25,66091    |
| 23,57 | -24,56118   | 24,24 | -19,25076   | 26,80 | 25,57915    |
| 23,58 | -24,55811   | 24,28 | -18,62709   | 26,84 | 25,45445    |
| 23,59 | -24,55265   | 24,32 | -17,97311   | 26,88 | 25,28706    |
| 23,60 | -24,54485   | 24,36 | -17,28980   | 26,92 | 25,07705    |
| 23,61 | -24,53472   | 24,40 | -16,57811   | 26,96 | 24,82460    |
| 23,62 | -24,52219   | 24,44 | -15,83914   | 27,00 | 24,53005    |
| 23,63 | -24,50731   | 24,48 | -15,07399   | 27,04 | 24,19375    |
| 23,64 | -24,49006   | 24,52 | -14,28374   | 27,08 | 23,81601    |

| у     | ω (у)     | у     | ω (у)     | у     | ω (у)    |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|----------|
| 27,12 | 23,39744  | 29,68 | -30,44065 | 32,24 | 23,34066 |
| 27,16 | 22,93855  | 29,72 | -30,61245 | 32,28 | 24,19795 |
| 27,20 | 22,43995  | 29,76 | -30,73725 | 32,32 | 25,01706 |
| 27,24 | 21,90235  | 29,80 | -30,81475 | 32,36 | 25,79650 |
| 27,28 | 21,32646  | 29,84 | -30,84475 | 32,40 | 26,53494 |
| 27,32 | 20,71310  | 29,88 | -30,82698 | 32,44 | 27,23111 |
| 27,36 | 20,06316  | 29,92 | -30,76135 | 32,48 | 27,88378 |
| 27,40 | 19,37755  | 29,96 | -30,64894 | 32,52 | 28,49179 |
| 27,44 | 18,65730  | 30,00 | -30,48675 | 32,56 | 29,05404 |
| 27,48 | 17,90048  | 30,04 | -30,27781 | 32,60 | 29,56958 |
| 27,52 | 17,11714  | 30,08 | -30,02145 | 32,64 | 30,03740 |
| 27,56 | 16,29950  | 30,12 | -29,72023 | 32,68 | 30,45665 |
| 27,60 | 15,45179  | 30,16 | -29,36760 | 32,72 | 30,82654 |
| 27,64 | 14,57525  | 30,20 | -28,97088 | 32,76 | 31,14634 |
| 27,68 | 13,67120  | 30,24 | -28,52839 | 32,80 | 31,41546 |
| 27,72 | 12,74102  | 30,28 | -28,04045 | 32,84 | 31,63330 |
| 27,76 | 11,78215  | 30,32 | -27,50852 | 32,88 | 31,79942 |
| 27,80 | 10,80804  | 30,36 | -26,93170 | 32,92 | 31,91341 |
| 27,84 | 9,80822   | 30,40 | -26,31232 | 32,96 | 31,97495 |
| 27,88 | 8,78818   | 30,44 | -25,65076 | 33,00 | 31,98380 |
| 27,92 | 7,74951   | 30,48 | -24,94795 | 33,04 | 31,93988 |
| 27,96 | 6,69389   | 30,52 | -24,20495 | 33,08 | 31,84305 |
| 28,00 | 5,62285   | 30,56 | -23,42285 | 33,12 | 31,69341 |
| 28,04 | 4,53822   | 30,60 | -22,60274 | 33,16 | 31,49196 |
| 28,08 | 3,44155   | 30,64 | -21,74590 | 33,20 | 31,23615 |
| 28,12 | 2,33468   | 30,68 | -20,85361 | 33,24 | 30,92900 |
| 28,16 | 1,21930   | 30,72 | -19,92714 | 33,28 | 30,56995 |
| 28,20 | 0,09715   | 30,76 | -18,96798 | 33,32 | 30,15951 |
| 28,24 | -1,02985  | 30,80 | -17,97750 | 33,36 | 29,69814 |
| 28,28 | -2,16008  | 30,84 | -16,95729 | 33,40 | 29,18651 |
| 28,32 | -3,29161  | 30,88 | -15,90885 | 33,44 | 28,62530 |
| 28,36 | -4,42676  | 30,92 | -14,83380 | 33,48 | 28,01529 |
| 28,40 | -5,55151  | 30,96 | -13,73381 | 33,52 | 27,35735 |
| 28,44 | -6,67619  | 31,00 | -12,61058 | 33,56 | 26,65240 |
| 28,48 | -7,79495  | 31,04 | -11,46585 | 33,60 | 25,90152 |
| 28,52 | -8,90595  | 31,08 | -10,30139 | 33,64 | 25,10571 |
| 28,56 | -10,00745 | 31,12 | -9,11904  | 33,68 | 24,26624 |
| 28,60 | -11,09759 | 31,16 | -7,92062  | 33,72 | 23,38428 |
| 28,64 | -12,17460 | 31,20 | -6,70805  | 33,76 | 22,46116 |
| 28,68 | -13,23670 | 31,24 | -5,48324  | 33,80 | 21,49830 |
| 28,72 | -14,28221 | 31,28 | -4,24810  | 33,84 | 20,49711 |
| 28,76 | -15,30932 | 31,32 | -3,00458  | 33,88 | 19,45912 |
| 28,80 | -16,31640 | 31,36 | -1,75466  | 33,92 | 18,38590 |
| 28,84 | -17,30171 | 31,40 | -0,50035  | 33,96 | 17,27910 |
| 28,88 | -18,26365 | 31,44 | 0,75631   | 34,00 | 16,14042 |
| 28,92 | -19,20061 | 31,48 | 2,01341   | 34,04 | 14,97160 |
| 28,96 | -20,11101 | 31,52 | 3,26889   | 34,08 | 13,77444 |
| 29,00 | -20,99331 | 31,56 | 4,52071   | 34,12 | 12,55081 |
| 29,04 | -21,84604 | 31,60 | 5,76684   | 34,16 | 11,30260 |
| 29,08 | -22,66775 | 31,64 | 7,00532   | 34,20 | 10,03174 |
| 29,12 | -23,45691 | 31,68 | 8,23412   | 34,24 | 8,74021  |
| 29,16 | -24,21234 | 31,72 | 9,45122   | 34,28 | 7,43016  |
| 29,20 | -24,93264 | 31,76 | 10,65465  | 34,32 | 6,10351  |
| 29,24 | -25,61658 | 31,80 | 11,84245  | 34,36 | 4,76235  |
| 29,28 | -26,26294 | 31,84 | 13,01265  | 34,40 | 3,40885  |
| 29,32 | -26,87268 | 31,88 | 14,16339  | 34,44 | 2,04516  |
| 29,36 | -27,43851 | 31,92 | 15,29271  | 34,48 | 0,67340  |
| 29,40 | -27,96560 | 31,96 | 16,39875  | 34,52 | -0,70420 |
| 29,44 | -28,45095 | 32,00 | 17,47975  | 34,56 | -2,08550 |
| 29,48 | -28,89362 | 32,04 | 18,53380  | 34,60 | -3,46826 |
| 29,52 | -29,29285 | 32,08 | 19,55921  | 34,64 | -4,85028 |
| 29,56 | -29,64774 | 32,12 | 20,55425  | 34,68 | -6,22932 |
| 29,60 | -29,95778 | 32,16 | 21,51724  | 34,72 | -7,60314 |
| 29,64 | -30,22225 | 32,20 | 22,44655  | 34,76 | -8,96960 |

| y     | $\omega(y)$ | y     | $\omega(y)$ | y     | $\omega(y)$ |
|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|
| 34,80 | -10,32640   | 37,36 | -12,48496   | 39,92 | 30,17235    |
| 34,84 | -11,67141   | 37,40 | -11,06534   | 39,96 | 29,18022    |
| 34,88 | -13,00241   | 37,44 | -9,62658    | 40,00 | 28,13778    |
| 34,92 | -14,31725   | 37,48 | -8,17091    | 40,04 | 27,04659    |
| 34,96 | -15,61380   | 37,52 | -6,70065    | 40,08 | 25,90830    |
| 35,00 | -16,88989   | 37,56 | -5,21812    | 40,12 | 24,72462    |
| 35,04 | -18,14345   | 37,60 | -3,72565    | 40,16 | 23,49740    |
| 35,08 | -19,37240   | 37,64 | -2,22565    | 40,20 | 22,22851    |
| 35,12 | -20,57473   | 37,68 | -0,72051    | 40,24 | 20,91991    |
| 35,16 | -21,74851   | 37,72 | 0,78735     | 40,28 | 19,57359    |
| 35,20 | -22,89170   | 37,76 | 2,29761     | 40,32 | 18,19164    |
| 35,24 | -24,00242   | 37,80 | 3,80175     | 40,36 | 16,77622    |
| 35,28 | -25,07880   | 37,84 | 5,30341     | 40,40 | 15,32952    |
| 35,32 | -26,11911   | 37,88 | 6,79815     | 40,44 | 13,85380    |
| 35,36 | -27,12150   | 37,92 | 8,28355     | 40,48 | 12,35136    |
| 35,40 | -28,08435   | 37,96 | 9,75725     | 40,52 | 10,82460    |
| 35,44 | -29,00602   | 38,00 | 11,21685    | 40,56 | 9,27585     |
| 35,48 | -29,88490   | 38,04 | 12,65991    | 40,60 | 7,70761     |
| 35,52 | -30,71950   | 38,08 | 14,08415    | 40,64 | 6,12235     |
| 35,56 | -31,50836   | 38,12 | 15,48721    | 40,68 | 4,52252     |
| 35,60 | -32,25015   | 38,16 | 16,86685    | 40,72 | 2,91071     |
| 35,64 | -32,94359   | 38,20 | 18,22075    | 40,76 | 1,28950     |
| 35,68 | -33,58740   | 38,24 | 19,54671    | 40,80 | -0,33859    |
| 35,72 | -34,18045   | 38,38 | 20,84255    | 40,84 | -1,97091    |
| 35,76 | -34,72171   | 38,32 | 22,10611    | 40,88 | -3,60491    |
| 35,80 | -35,21019   | 38,36 | 23,33535    | 40,92 | -5,23791    |
| 35,84 | -35,64495   | 38,40 | 24,52811    | 40,96 | -6,86736    |
| 35,88 | -36,02520   | 38,44 | 25,68251    | 41,00 | -8,49055    |
| 35,92 | -36,35020   | 38,48 | 26,79658    | 41,04 | -10,10494   |
| 35,96 | -36,61932   | 38,52 | 27,86845    | 41,08 | -11,70790   |
| 36,00 | -36,83199   | 38,56 | 28,89632    | 41,12 | -13,29686   |
| 36,04 | -36,98771   | 38,60 | 29,87845    | 41,16 | -14,86920   |
| 36,08 | -37,08619   | 38,64 | 30,81319    | 41,20 | -16,42239   |
| 36,12 | -37,12705   | 38,68 | 31,69890    | 41,24 | -17,95390   |
| 36,16 | -37,11018   | 38,72 | 32,53408    | 41,28 | -19,46124   |
| 36,20 | -37,03545   | 38,76 | 33,31728    | 41,32 | -20,94194   |
| 36,24 | -36,90280   | 38,80 | 34,04715    | 41,36 | -22,39356   |
| 36,28 | -36,71234   | 38,84 | 34,72240    | 41,40 | -23,81374   |
| 36,32 | -36,46431   | 38,88 | 35,34181    | 41,44 | -25,20010   |
| 36,36 | -36,15892   | 38,92 | 35,90432    | 41,46 | -26,55049   |
| 36,40 | -35,79655   | 38,96 | 36,40890    | 41,52 | -27,86251   |
| 36,44 | -35,37766   | 39,00 | 36,85460    | 41,56 | -29,13465   |
| 36,48 | -34,90230   | 39,04 | 37,24058    | 41,60 | -30,36298   |
| 36,52 | -34,37259   | 39,08 | 37,56611    | 41,64 | -31,54724   |
| 36,56 | -33,76775   | 39,12 | 37,83055    | 41,68 | -32,68490   |
| 36,60 | -33,14916   | 39,16 | 38,03336    | 41,72 | -33,77399   |
| 36,64 | -32,45766   | 39,20 | 38,17409    | 41,76 | -34,81269   |
| 36,68 | -31,71425   | 39,24 | 38,25235    | 41,80 | -35,79921   |
| 36,72 | -30,92004   | 39,28 | 38,26792    | 41,84 | -36,73194   |
| 36,76 | -30,07621   | 39,32 | 38,22061    | 41,88 | -37,60922   |
| 36,80 | -29,18395   | 39,36 | 38,11042    | 41,92 | -38,42955   |
| 36,84 | -28,24461   | 39,40 | 37,93739    | 41,96 | -39,19151   |
| 36,88 | -27,25960   | 39,44 | 37,70161    | 42,00 | -39,89275   |
| 36,92 | -26,23039   | 39,48 | 37,40342    | 42,04 | -40,53509   |
| 36,96 | -25,15855   | 39,52 | 37,04310    | 42,08 | -41,11432   |
| 37,00 | -24,04569   | 39,56 | 36,62112    | 42,12 | -41,63041   |
| 37,04 | -22,89351   | 39,60 | 36,13804    | 42,16 | -42,08241   |
| 37,08 | -21,70378   | 39,64 | 35,59455    | 42,20 | -42,46950   |
| 37,12 | -20,47830   | 39,68 | 34,99131    | 42,24 | -42,79094   |
| 37,16 | -19,21901   | 39,72 | 34,32925    | 42,28 | -43,04605   |
| 37,20 | -17,92784   | 39,76 | 33,60925    | 42,32 | -43,23431   |
| 37,24 | -16,60674   | 39,80 | 32,83241    | 42,36 | -43,35530   |
| 37,28 | -15,25785   | 39,84 | 31,99981    | 42,40 | -43,40870   |
| 37,32 | -13,88320   | 39,88 | 31,11269    | 42,44 | -43,39429   |

| $y$   | $\omega(y)$ | $\dot{y}$ | $\omega(y)$ | $y$   | $\omega(y)$ |
|-------|-------------|-----------|-------------|-------|-------------|
| 42,48 | -43,31194   | 44,36     | 16,28854    | 46,24 | 34,11940    |
| 42,52 | -43,16171   | 44,40     | 17,92509    | 46,28 | 32,91768    |
| 42,56 | -42,94370   | 44,44     | 19,53426    | 46,32 | 31,65956    |
| 42,60 | -42,65809   | 44,48     | 21,11849    | 46,36 | 30,94700    |
| 42,64 | -42,30524   | 44,52     | 22,66012    | 46,40 | 28,98195    |
| 42,68 | -41,88559   | 44,56     | 24,17168    | 46,44 | 27,56656    |
| 42,72 | -41,39968   | 44,60     | 25,64562    | 46,48 | 26,10380    |
| 42,76 | -40,84815   | 44,64     | 27,07955    | 46,52 | 24,59361    |
| 42,80 | -40,23182   | 44,68     | 28,47112    | 46,56 | 23,04044    |
| 42,84 | -39,55149   | 44,72     | 29,81795    | 46,60 | 21,44625    |
| 42,88 | -38,80814   | 44,76     | 31,11788    | 46,64 | 19,81330    |
| 42,92 | -38,00290   | 44,80     | 32,36869    | 46,68 | 18,14426    |
| 42,96 | -37,13687   | 44,84     | 33,56831    | 46,72 | 16,44170    |
| 43,00 | -36,21139   | 44,88     | 34,71472    | 46,76 | 14,70830    |
| 43,04 | -35,22779   | 44,92     | 35,80599    | 46,80 | 12,94678    |
| 43,08 | -34,18755   | 44,96     | 36,84024    | 46,84 | 11,15992    |
| 43,12 | -33,09224   | 45,00     | 37,81579    | 46,88 | 9,35051     |
| 43,16 | -31,94350   | 45,04     | 38,73091    | 46,92 | 7,52145     |
| 43,20 | -30,74309   | 45,08     | 39,58401    | 46,96 | 5,67565     |
| 43,24 | -29,49280   | 45,12     | 40,37368    | 47,00 | 3,81600     |
| 43,28 | -28,19461   | 45,16     | 41,09849    | 47,04 | 1,94545     |
| 43,32 | -26,85046   | 45,20     | 41,75716    | 47,08 | 0,06705     |
| 43,36 | -25,46224   | 45,24     | 42,34855    | 47,12 | -1,81631    |
| 43,40 | -24,03266   | 45,28     | 42,87159    | 47,16 | -3,70151    |
| 43,44 | -22,56335   | 45,32     | 43,32530    | 47,20 | -5,58501    |
| 43,48 | -21,05685   | 45,36     | 43,70881    | 47,24 | -7,46559    |
| 43,52 | -19,51541   | 45,40     | 44,02145    | 47,28 | -9,33835    |
| 43,56 | -17,94151   | 45,44     | 44,26252    | 47,32 | -11,20100   |
| 43,60 | -16,33761   | 45,48     | 44,43155    | 47,36 | -13,05041   |
| 43,64 | -14,70619   | 45,52     | 44,52816    | 47,40 | -14,88369   |
| 43,68 | -13,04980   | 45,56     | 44,55201    | 47,44 | -16,69780   |
| 43,72 | -11,37111   | 45,60     | 44,50298    | 47,48 | -18,48988   |
| 43,76 | -9,67275    | 45,64     | 44,38100    | 47,52 | -20,25696   |
| 43,80 | -7,95736    | 45,68     | 44,18612    | 47,56 | -21,99658   |
| 43,84 | -6,22771    | 45,72     | 43,91859    | 47,60 | -23,70475   |
| 43,88 | -4,48655    | 45,76     | 43,57864    | 47,64 | -25,37974   |
| 43,92 | -2,73661    | 45,80     | 43,16670    | 47,68 | -27,01855   |
| 43,96 | -0,98070    | 45,84     | 42,68334    | 47,72 | -28,61850   |
| 44,00 | 0,77836     | 45,88     | 42,12920    | 47,76 | -30,17669   |
| 44,04 | 2,53781     | 45,92     | 41,49950    | 47,80 | -31,69120   |
| 44,08 | 4,29475     | 45,96     | 40,81171    | 47,84 | -33,15886   |
| 44,12 | 6,04645     | 46,00     | 40,05066    | 47,88 | -34,57750   |
| 44,16 | 7,79001     | 46,04     | 39,22171    | 47,92 | -35,94478   |
| 44,20 | 9,52269     | 46,08     | 38,32734    | 47,96 | -37,25835   |
| 44,24 | 11,24162    | 46,12     | 37,36845    | 48,00 | -38,51610   |
| 44,28 | 12,94410    | 46,16     | 36,34645    |       |             |
| 44,32 | 14,62731    | 46,20     | 35,26291    |       |             |

*Д. Л. ГРИЩЕНКО, Е. П. НОВОСЕЛЬЦЕВ, Н. Е. ТЕР-МАРКАРЯНЦ*

## **О МЕТОДИКЕ АКТИНОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В МОРЕ**

Излагается предлагаемая авторами методика измерений прямой солнечной, суммарной, отраженной радиации и радиационного баланса в морских условиях. Дается оценка точности актинометрических измерений с судов.

Хотя моря и океаны занимают большую часть поверхности земного шара, их радиационный режим изучен совершенно недостаточно. Одна из причин этого заключается в трудности измерения радиационного баланса и его составляющих в судовых условиях.

Эпизодические актинометрические наблюдения производятся с различных судов уже в течение 30—40 лет, однако до сих пор нет единой методики морских актинометрических измерений.

Различные наблюдатели измеряют по-разному: одни устанавливают стрелу с носа корабля, другие — с борта, а некоторые — даже с кормы.

В целом ряде случаев результаты измерений обесцениваются существенными погрешностями методики (большие затенения или подсветки приборов надстройками корабля, недостаточная длина стрелы по отношению к высоте борта судна над водой и др.).

Цель нашей работы — на основании имеющегося опыта актинометрических измерений в море, а также на основании проведенных нами экспериментальных и методических исследований создать единую методику морских актинометрических измерений на судах.

Основой для разработки методических указаний по проведению актинометрических наблюдений в море послужили результаты методических исследований, проведенных в 1960—1961 гг. на экспедиционных судах «Ю. М. Шокальский» и «А. И. Воейков» и в 1962 г. на экспедиционном судне «Гидрозонд», многолетний опыт актинометрических измерений с лодки, а также целый ряд дополнительных экспериментальных и теоретических исследований, проведенных нами.

В результате произведенных исследований рекомендуем производить на судах следующие актинометрические измерения:

- 1) измерение прямой солнечной радиации,
- 2) измерение суммарной радиации,
- 3) измерение отраженной радиации,
- 4) измерение радиационного баланса.

От измерений рассеянной радиации с помощью пиранометра, затененного от прямой солнечной радиации, мы решили отказаться в связи с недостаточной точностью таких измерений в условиях качки.

Рассеянная радиация определяется как разность суммарной и прямой солнечной радиации, вычисленной на горизонтальную поверхность:

$$D = Q - S'.$$

Прямая солнечная радиация измеряется с помощью термоэлектрического актинометра, установленного на кардановом столике на верхнем мостике. Наводка актинометра на солнце производится вручную.

### Суммарная радиация

Суммарная радиация является основной составляющей радиационного баланса, поэтому при проведении морских актинометрических наблюдений чрезвычайно важно уметь достаточно точно измерить величину суммарной радиации не только при штиле, но и при волнении.

Как известно, при измерении суммарной радиации в условиях суши пользуются следующей методикой: с помощью пиранометра, затененного от прямой солнечной радиации, измеряется рассеянная радиация  $D$ ; с помощью актинометра измеряется прямая солнечная радиация  $S$  на перпендикулярную поверхность.

Суммарная радиация вычисляется с учетом высоты солнца над горизонтом следующим образом:

$$Q = S \sin h_{\odot} + D.$$

Поскольку при проведении актинометрических измерений в море измерение рассеянной радиации становится затруднительным и не слишком точным, нами был исследован вопрос о том, насколько надежно может быть измерена величина суммарной радиации с помощью одного незатененного пиранометра.

Параллельные измерения суммарной радиации по «сухопутной» методике и с помощью одного незатененного пиранометра дали следующие результаты: при наличии качки ошибки в измерении суммарной радиации при использовании одного пиранометра составляют в среднем 4%, однако в ряде случаев (при небольших  $h_{\odot}$ ) они достигают 8—9%.

Результаты аналогичных сравнений в Карадагской обсерватории показали, что в случае отсутствия качки эти ошибки в измерении несколько меньше и не превышают при малых  $h_{\odot}$  5—6%.

Учитывая изложенное, считаем возможным измерять суммарную радиацию на судах с помощью одного пиранометра, не затеняя его от прямой солнечной радиации.

Перейдем к рассмотрению вопроса о том, в каком месте судна следует размещать пиранометр для того, чтобы ошибки измерений были минимальными.

На э/с «Гидрозонд» в 1962 г. нами проводились одновременные измерения суммарной радиации в различных точках корабля: на верхнем конце фок-мачты ( $Q_1$ ), на верхнем конце бизань-мачты ( $Q_2$ ) и на верхнем мостике ( $Q_3$ ). В табл. 1 представлены результаты таких измерений.

Таблица 1

|                                        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $h_{\odot}$ град. . . . .              | 33,2 | 38,8 | 39,9 | 41,3 | 37,0 | 11,0 | 28,4 | 43,0 | 37,2 | 21,0 | 15,2 | 12,8 |
| $Q_1$ кал/см <sup>2</sup> мин. . . . . | 0,71 | 0,58 | 0,72 | 0,68 | 0,79 | 0,03 | 0,05 | 0,51 | 0,84 | 0,60 | 0,27 | 0,06 |
| $Q_2$ кал/см <sup>2</sup> мин. . . . . | 0,70 | 0,58 | 0,71 | 0,70 | 0,80 | 0,03 | 0,05 | 0,51 | 0,87 | 0,60 | 0,30 | 0,06 |
| $Q_3$ кал/см <sup>2</sup> мин. . . . . | 0,72 | 0,52 | 0,60 | 0,66 | 0,70 | 0,03 | 0,05 | 0,52 | 0,78 | 0,58 | 0,28 | 0,05 |

Из таблицы видно, что величины суммарной радиации, полученные с помощью пиранометров, размещенных наверху фок-мачты и бизань-мачты, довольно близки между собой (расхождение не превышает 3—4%).

Величины суммарной радиации  $Q_3$  в ряде случаев, в основном при  $h_{\odot} > 30^\circ$ , заметно отличаются от величин  $Q_1$  и  $Q_2$ , что объясняется тем, что при указанных высотах солнца имело место затенение пиранометра различными частями мачты.

Все изложенное свидетельствует о том, что наиболее целесообразно размещать пиранометр на верхнем конце мачты, где на его показания не будут влиять никакие затенения. При этом рекомендуется использовать специальное приспособление, так называемый подъемник, с помощью которого можно в любой момент опустить и снова поднять пиранометр. Подъемник состоит из двух основных частей: кронштейна 1,

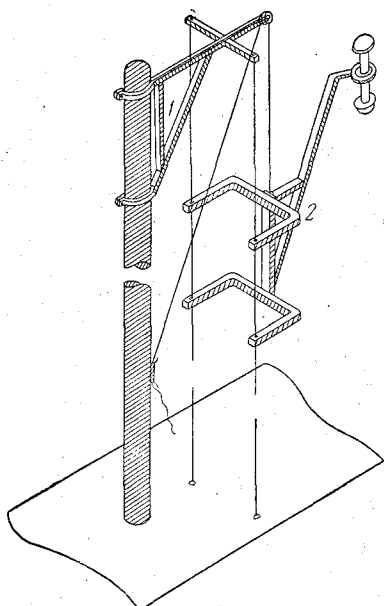


Рис. 1. «Подъемник» для пиранометра.

укрепленного на вершине мачты, и подвижной каретки 2 с прибором (рис. 1). Каретка с прибором передвигается вверх и вниз с помощью блока, укрепленного на кронштейне.

Общий вид пиранометра, укрепленного с помощью подъемника наверху мачты э/с «Гидрозонд», дан на рис. 2.

Поскольку пиранометр с обычным кардановым подвесом сохраняет горизонтальность приемной поверхности довольно надежно только до скоростей ветра 10—15 м/сек., а при больших скоростях ветра наблюдается отклонение пиранометра от горизонтальности, то целесообразно использовать для исключения влияния ветра кардановый подвес с дополнительной насадкой, которая по форме и величине соответствует пиранометру (рис. 3).

Испытания пиранометра с таким кардановым подвесом показали, что даже при ветре 35—40 м/сек. не наблюдается заметное отклонение пиранометра от горизонтальности. Необходимо при этом отметить, что в результате экспериментальных исследований было установлено, что период колебаний карданового подвеса с такой насадкой остается меньше 1 сек., т. е. значительно меньше периода колебаний корабля.

При проведении актинометрических наблюдений в море необходимо следить за строгой горизонтальностью пиранометра, так как отклонение его от горизонтальности может привести при малых  $h_{\odot}$  к заметным ошибкам измерений.

В табл. 2 представлены рассчитанные нами ошибки (в процентах) в измерении  $Q$  при различных  $h_{\odot}$  и при отклонениях пиранометра от горизонтальности на  $0,5-3^{\circ}$ . Следует заметить при этом, что при наличии качки кардановые подвесы не обеспечивают строгой горизонталь-

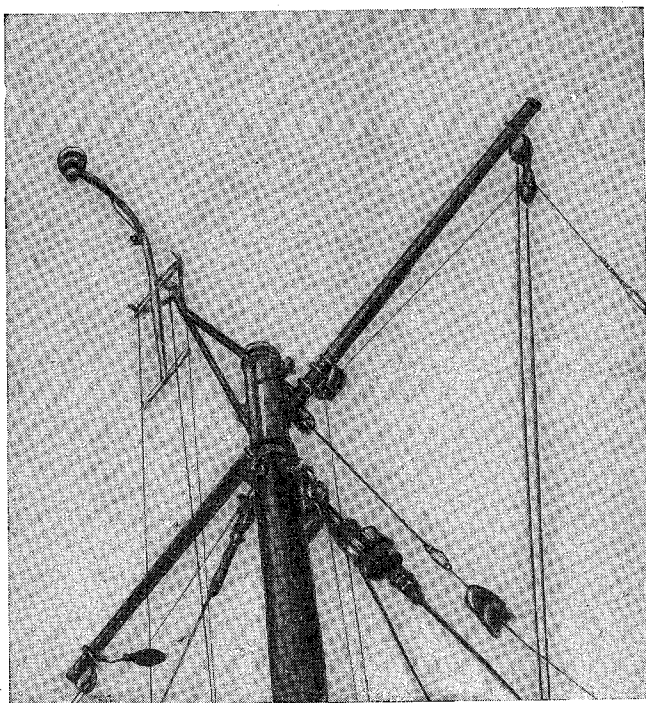


Рис. 2. Общий вид пиранометра, установленного на мачте э/с «Гидрозонд».

ности, поэтому для проведения актинометрических измерений в морских условиях необходимо следить за работой кардановых подвесов и систематически их смазывать.

В связи с тем что пиранометр в судовых условиях не может быть всегда установлен определенной стороной к солнцу, защитные стекла пиранометров должны подбираться с особой тщательностью, с более или менее одинаковым по всем азимутам и при этом малым поправочным множителем  $F_h$ .

Таблица 2

| $\alpha^{\circ}$ | $h_{\odot}^{\circ}$ |    |    |    |     |     |
|------------------|---------------------|----|----|----|-----|-----|
|                  | 5                   | 10 | 20 | 30 | 50  | 70  |
| 0,5              | 5                   | 4  | 2  | 1  | 0,6 | 0,5 |
| 1                | 10                  | 8  | 4  | 2  | 1   | 1   |
| 3                | 29                  | 20 | 11 | 8  | 4   | 3   |

Необходимо следить за чистотой стеклянного колпака. При попадании на стекло пиранометра брызг морской воды, а также капель дождя или росы его показания уменьшаются в основном на 1—2%, но при малых  $h_{\odot}$  может наблюдаться уменьшение радиации на 5—6%.

При измерении суммарной радиации на судах целесообразно использовать гальванометр М-91 или потенциометр ЭПП-09, отличающиеся большой устойчивостью по отношению к качке. При использовании ГСА-1 (что крайне нежелательно) необходимо при малых  $h_{\odot}$  переключать гальванометр на клеммы +р, обеспечивающие большую чувствительность гальванометра.

Для обеспечения максимальной точности измерения суммарной радиации при штиле или небольшом волнении необходимо делать не менее шести отсчетов по гальванометру, при наличии же сильной качки —

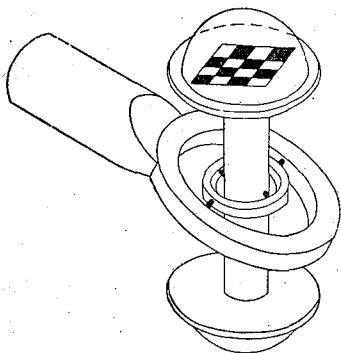


Рис. 3. Карданный подвес с дополнительной насадкой.

10 отсчетов по гальванометру. Необходимость такого большого числа отсчетов объясняется тем, что при наличии качки может раскачиваться сам пиранометр, укрепленный на кардановом подвесе. Как показали специальные исследования,  $\frac{dQ}{Q}$  вследствие этого может составлять 7—8%, причем зависимость  $\frac{dQ}{Q}$  от  $h_{\odot}$  проследить не удается.

При выполнении указанных нами практических рекомендаций суммарная радиация в морских условиях может быть измерена при использовании гальванометра М-91 с ошибками, не превышающими при больших  $h_{\odot}$  5—7%, при малых  $h_{\odot}$  10—15%.

### Отраженная радиация и альbedo моря

Для исследования теплового режима моря существенное значение имеет определение величины радиации, отраженной от морской поверхности. Как известно, различные наблюдатели устанавливают стрелу с альбедометром по-разному: на носу, на корме, с борта. При этом оказывается, что в ряде случаев результаты измерений обесцениваются значительными погрешностями измерений (затенение или подсветки от корпуса судна, влияние бурунов, пены и др.).

Исследование возможных систематических и случайных ошибок в измерении отраженной радиации и альbedo моря, выполненное нами ранее [1], а также ряд дополнительных исследований на э/с «Гидрозонд» в 1962 г. позволяют сделать следующие выводы относительно измерений отраженной радиации: альбедометр должен быть установлен на кардановом подвесе на конце выносной стрелы, которая укрепляется на носу судна и должна быть всегда обращена к солнцу.

Измерения альbedo моря с кормы, как будет показано ниже, возможны только во время стоянки судна. Производить измерения альbedo с борта судна нельзя ни на ходу, ни во время стоянки судна. Длина стрелы, на которой укрепляется альбедометр, должна быть не меньше высоты носовой части судна над водой. В этом случае ошибка за счет затенения кораблем части рассеянной радиации не будет превышать при малых  $h_{\odot}$  3—4%, при больших  $h_{\odot}$  6—7% [1].

При оценке этой ошибки предполагалось, что альбедометр всегда обращен к солнцу и что прямая радиация ничем не затеняется.

На экспедиционных судах «А. И. Воейков» и «Гидрозонд» нами были проведены измерения альбедо на различном расстоянии от борта судна. Длина стрелы на э/с «А. И. Воейков» составляла 12 м, высота носовой части судна над водой — 10 м. С помощью специального приспособления альбедометр протягивался вдоль всей стрелы до борта и обратно, при этом на каждом метре стрелы производилось измерение величин альбедо.

Результаты этих измерений на э/с «А. И. Воейков» показали, что даже при малых высотах солнца величины альбедо изменялись только при

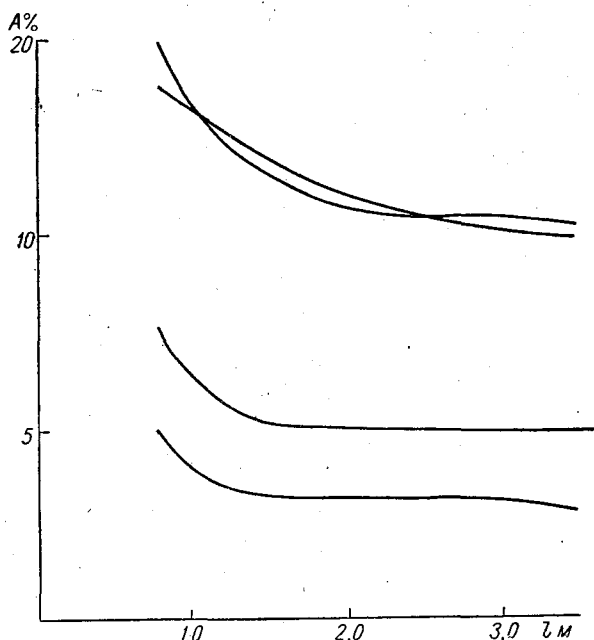


Рис. 4. Величины альбедо, измеренные на различных расстояниях от борта судна.

передвижении альбедометра по стреле от борта до 10 м. При дальнейшем передвижении альбедометра по стреле величины альбедо практически не изменялись.

На рис. 4 представлены величины альбедо моря, измеренные на э/с «Гидрозонд» также на различных расстояниях от борта судна. Длина стрелы на э/с «Гидрозонд» составляла 3,5 м, высота носовой части судна над водой составляла 2,0 м. Стрела постепенно выдвигалась наблюдателем так, что при этом альбедометр удалялся от борта судна. Измерения производились через каждые 0,5 м.

Как видно из рисунка, величины альбедо изменялись при удалении альбедометра от борта судна в основном до 1,5—2,0 м, при дальнейшем удалении альбедометра от борта судна величины альбедо, как правило, оставались постоянными.

Следовательно, при проведении актинометрических измерений в море можно использовать стрелу, длина которой может быть равна высоте носовой части судна над водой.

На э/с «Гидрозонд» нами были произведены специальные измерения во время стоянки и на ходу судна, при этом стрела с альбедометром переносилась с носа на оба борта и на корму. Таким образом,

производились почти одновременные измерения величин альbedo с носа судна, с бортов и с кормы.

Таблица 3

26 IX  
13 ч. 00 м.  
 $h_{\odot}=42,0^{\circ}$   
 $0/0 \odot^2$   
Волн. 2—3 б.  
Солнце с правого борта

| А с носа,<br>%         | А с правого<br>борта, % | А с левого<br>борта, % | А с кормы,<br>%        |
|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| $\frac{2,3}{56,0}=4,1$ | $\frac{2,4}{57,2}=4,2$  | $\frac{2,2}{57,8}=3,8$ | $\frac{2,5}{58,5}=4,3$ |

Таблица 4

27 IX  
16 ч. 37 м.  
 $h_{\odot}=15,2^{\circ}$   
 $5/0 \text{ Cl } \odot^0$   
Волн. 3—4 б.

| А с носа,<br>%         | А с правого<br>борта, % | А с левого<br>борта, %  | А с кормы,<br>%        |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| $\frac{5,0}{4,6}=11,0$ | $\frac{6,2}{4,7}=13,2$  | $\frac{7,0}{4,65}=15,1$ | $\frac{8,1}{4,8}=16,9$ |

Результаты измерений во время стоянки судна, представленные в табл. 3—4, говорят о том, что при проведении измерений стрела с альбедометром должна быть расположена над водной поверхностью, освещенной солнцем. В противном случае могут иметь место значительные ошибки в измеренных величинах альbedo, например в таких случаях, когда солнце светит с кормы, а измерение производится с носа судна и водная поверхность, отражение от которой измеряется, частично затенена.

Следует отметить, что если измерение величин альbedo производится только во время стоянки судна, то стрелу с альбедометром можно устанавливать и на носу судна, и на корме, но при этом необходимо при измерениях разворачивать судно таким образом, чтобы стрела была обращена к солнцу.

В табл. 5—8 представлены результаты измерений альbedo на ходу э/с «Гидрозонд», на основании которых можно сделать следующий вывод: во время движения судна измерения отраженной радиации и альbedo можно производить только с носа судна, так как у бортов судна и особенно около кормы значительная площадь водной поверхности возмущена движением судна и покрыта белой пеной, заметно увеличивающей величину альbedo воды.

Таблица 5

28 IX  
9 ч. 25 м.  
 $h_{\odot}=33,9^{\circ}$   
10/10 Ас, С1, Сн  
Волн. 5—6 б.

| А с носа,<br>%         | А с правого<br>борта, %<br>(буруны, пена) | А с кормы, %            |                         |
|------------------------|-------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                        |                                           | над белой<br>пенной     | над бурунами            |
| $\frac{2,9}{34,3}=8,4$ | $\frac{8}{34,0}=11,7\%$                   | $\frac{5,7}{34,2}=16,8$ | $\frac{4,6}{34,2}=13,5$ |

Таблица 6

28 IX  
9 ч. 00 м.  
 $h_{\odot}=29,3$   
 $\frac{10}{10}$  Ас, С1, Сн,  $\odot^0$   
Волн. 26.

| А с носа, %            | А с правого борта, %<br>(буруны, пена) |
|------------------------|----------------------------------------|
| $\frac{3,2}{39,3}=8,2$ | $\frac{4,1}{38,9}=10,5$                |

Таблица 7

27 IX  
11 ч. 28 м.  
 $h_{\odot}=43,4^{\circ}$   
10/10 П С1, Ас, Сн  
Волн. 3—4 б.

| А с носа, %            | А с правого борта, %    |                         |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                        | за пределами<br>пены    | в пене                  |
| $\frac{2,7}{28,2}=9,6$ | $\frac{3,3}{28,0}=11,8$ | $\frac{6,5}{28,0}=23,2$ |

Таблица 8

27 IX  
12 ч. 15 м.  
 $h_{\odot}=44,5^{\circ}$   
 $\frac{10}{10}$  С1, Ас, Сн,  $\odot^0$   
Волн. 4 б.

| А с носа, %            | А с правого<br>борта, % | А с кормы, %            |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $\frac{2,9}{46,3}=6,2$ | $\frac{3,4}{46,5}=7,3$  | $\frac{5,2}{46,7}=11,1$ |

Поскольку при больших скоростях ветра возможно отклонение карданового подвеса от вертикального положения, при измерении отраженной радиации также следует использовать «ветрозащиту», аналогичную «ветрозащите» к пиранометру, укрепленному на мачте судна и измеряющему суммарную радиацию. Но в данном случае насадка к кардановому подвесу изготавливается из очень легкого материала (пробки, пенопласта) и помещается на верхней части трубки кардана.

При измерении отраженной радиации в море при большом волнении возможно попадание брызг морской воды на стекло альбедометра, а также возможно запотевание стекла изнутри. В связи с этим нами было проведено специальное исследование изменений показаний альбедометра при его забрызгивании (табл. 9).

Из табл. 9 видно, что при попадании водяных капель на стекло альбедометра, обращенного приемной поверхностью вниз, величины отраженной радиации и альbedo увеличиваются в среднем на 10—15%.

Таблица 9

| Дата | Время,<br>час. мин. | $h_{\odot}$ град. | Облачность                              | $Q$<br>кал/см <sup>2</sup> мин. | $R$<br>кал/см <sup>2</sup> мин. | $R_1$<br>кал/см <sup>2</sup> мин. | $A$ % | $A_1$ % | $\frac{A - A_1}{A}$ % |
|------|---------------------|-------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------|---------|-----------------------|
| 4 X  | 10 29               | 36,8              | 4/4 Си                                  | 0,603                           | 0,039                           | 0,046                             | 6,4   | 7,6     | 19                    |
| 4 X  | 10 35               | 37,3              | 4/4 Си, $\odot^0$                       | 0,600                           | 0,037                           | 0,040                             | 6,2   | 6,7     | 8                     |
| 4 X  | 12 17               | 40,8              | 3/3 Си, $\odot^2$                       | 1,070                           | 0,062                           | 0,069                             | 5,7   | 6,4     | 12                    |
| 4 X  | 12 47               | 39,6              | 10/10 Си, Си                            | 0,238                           | 0,025                           | 0,026                             | 10,4  | 11,1    | 7                     |
| 4 X  | 16 13               | 14,8              | 9/9 Си, $\odot^0$                       | 0,331                           | 0,032                           | 0,037                             | 9,6   | 11,2    | 17                    |
| 4 X  | 16 47               | 10,7              | 6/6 Си, $\odot^0$                       | 0,178                           | 0,012                           | 0,014                             | 6,8   | 7,8     | 15                    |
| 4 X  | 16 53               | 9,1               | 6/6 Си.<br>Солнце<br>в туче<br>за горой | 0,109                           | 0,0053                          | 0,0070                            | 4,9   | 6,4     | 30                    |
| 5 X  | 11 10               | 38,7              | 0/0 $\odot^2$                           | 1,2                             | 0,068                           | 0,072                             | 5,7   | 6,0     | 5                     |
| 6 X  | 7 15                | 18,4              | 0/0 $\odot^2$                           | 0,385                           | 0,075                           | 0,079                             | 19,5  | 20,6    | 6                     |

Примечание.  $A$  — величина альbedo, измеренная сухим альбедометром;  $A_1$  — величина альbedo, измеренная после забрызгивания альбедометра.

Следовательно, при измерении отраженной радиации в морских условиях необходимо систематически проверять состояние стеклянного колпака альбедометра и при его забрызгивании насухо вытирать мягкой тряпочкой.

Необходимо следить за строгой горизонтальностью альбедометра, так как отклонение альбедометра от горизонтальности приводит к значительным погрешностям в измеренных величинах альbedo [1.]

В связи с тем что при использовании гальванометра ГСА-1 ошибки отсчета в измерении альbedo очень велики и при наличии качки могут достигать 40—50%, рекомендуем использовать гальванометр М-91 или электронный потенциометр ЭПП-09. При этом для обеспечения максимальной точности измерений следует делать не менее шести отсчетов по гальванометру.

При соблюдении указанных нами рекомендаций величины альbedo моря могут быть измерены с ошибкой, не превышающей при больших  $h_{\odot}$  10%, при малых  $h_{\odot}$  20—25%.

## Радиационный баланс

Радиационный баланс является основным климатообразующим фактором, поэтому его изучение имеет очень большое значение. Между тем измерение радиационного баланса моря с судов осложняется влиянием корпуса судна, горизонтальным и вертикальным обдуванием балансомера, забрызгиванием приемных поверхностей водой и др.

Вопросы измерения радиационного баланса в морских условиях подробно обсуждаются в статье Н. Е. Тер-Маркарянц и Д. Л. Грищенко [2] (см. настоящий сборник). В связи с этим ограничимся здесь лишь изложением основных практических рекомендаций, необходимых при измерении радиационного баланса в море.

1. Радиационный баланс измеряется с помощью термоэлектрического балансомера, установленного на той же стреле, что и альбедометр.

2. Для устранения влияния ветра приемные поверхности балансомера покрываются полиэтиленовой пленкой с зазором между приемной поверхностью и пленкой 2 мм.

Пленка натягивается между двумя кольцами, которые действуют как пальцы (для одного балансомера нужно 4 кольца). Кольца с полиэтиленовыми пленками крепятся на балансомере специальными пластинчатыми зажимами.

Наиболее целесообразным является использование плоского фильтра ввиду простоты его изготовления и лучшего сохранения в естественных условиях по сравнению с другими видами фильтров.

3. При измерении радиационного баланса в морских условиях балансомер не затеняется от прямой солнечной радиации.

4. К показаниям балансомера вводится поправка, учитывающая зависимость чувствительности балансомера от угла падения радиации. Особенно важно вводить угловую поправку при высотах солнца над горизонтом, меньших  $40^\circ$ .

5. Для измерения длинноволнового баланса следует использовать балансомеры, градуированные не по прямой солнечной радиации, а по длинноволновой радиации, в противном случае следует вводить к показаниям балансомера соответствующую поправку.

6. При забрызгивании балансомера морской водой или при попадании на приемные поверхности балансомера капель дождя или росы измерения радиационного баланса следует прекратить, приемные поверхности балансомера, покрытые полиэтиленовой пленкой, насухо протереть, а в случае запотевания пленки изнутри просушить балансомер, после чего следует продолжать измерения.

7. Для измерения радиационного баланса в морских условиях следует использовать гальванометр М-91 или электронный потенциометр ЭПП-09.

8. Необходимо следить за строгой горизонтальностью балансомера, а также за чистотой полиэтиленовых фильтров.

При выполнении указанных нами рекомендаций радиационный баланс в морских условиях может быть измерен с ошибкой, не превышающей при больших  $h_\odot$  10—15%, при малых  $h_\odot$  30%.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Тер-Маркарянц Н. Е. Об ошибках измерений альбедо водных поверхностей. Труды ГГО, вып. 109, 1961.
2. Тер-Маркарянц Н. Е. и Грищенко Д. Л. Об измерении радиационного баланса в морских условиях. См. настоящий сборник.
3. Янишевский Ю. Д. Актинометрические приборы и методы наблюдений. Гидрометеиздат, Л., 1957.

# СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                    | Стр. |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| К. С. Шифрин и В. И. Голиков. Измерения микроструктуры методом малых углов                                                         | 3    |
| В. К. Каган и Е. П. Рябова. К расчету спектрального распределения яркости безоблачного неба в двухпараметрической модели атмосферы | 16   |
| М. А. Брамсон, И. Л. Зельманович, Г. И. Кулешова. Излучательная способность воды в инфракрасной области спектра                    | 31   |
| Е. П. Барашкова. К методике расчета длинноволновых потоков в тропосфере при безоблачном небе                                       | 68   |
| Ю. А. Скляр. Расчет некоторых ошибок болометрического пиргелиометра                                                                | 81   |
| Е. П. Новосельцев. Ослабление суммарной радиации облаками верхнего яруса                                                           | 90   |
| Б. М. Гальперин и Л. П. Серякова. Рассеянная и суммарная солнечная радиация при различных условиях                                 | 96   |
| Н. Е. Тер-Маркарянц и Д. Л. Грищенко. Об измерении радиационного баланса в морских условиях                                        | 110  |
| Л. Н. Дьяченко. Распределение эффективного излучения по территории СССР                                                            | 126  |
| В. И. Голиков. Прибор для измерения микроструктуры облаков и туманов методом малых углов                                           | 142  |
| Т. Д. Войткова. Расчет полусферического излучателя для градуировки пиргеометров                                                    | 160  |
| Л. Б. Красильщиков и Г. П. Семенова. О спектральных характеристиках материалов, применяемых в актинометрическом приборостроении    | 168  |
| В. С. Александров. Электронный терморегулятор                                                                                      | 172  |
| О. И. Голикова. Кювета для нефелометрических измерений с высоким угловым разрешением в области углов 5—175°                        | 176  |
| Е. П. Новосельцев. Спектральная отражательная способность облаков                                                                  | 186  |
| К. С. Шифрин, А. Я. Перельман, Л. К. Потехина. Таблицы для расчета спектра частиц дисперсной системы по ее прозрачности            | 192  |
| Д. Л. Грищенко, Е. П. Новосельцев, Н. Е. Тер-Маркарянц. О методике актинометрических наблюдений в море                             | 212  |

