

ОБ ИЗМЕРЕНИИ РАДИАЦИИ ПИРАНОМЕТРАМИ ЯНИШЕВСКОГО

Ю. К. РОСС

Задачей настоящей работы является анализ и оценка некоторых ошибок, возникающих при измерениях радиационных потоков при помощи пиранометров Янишевского. Исследование выполнено на опыте работы Тартуской актинометрической лаборатории Института физики и астрономии АН ЭССР в 1952—1956 гг. Полученные результаты позволяют повысить качество тартуских актинометрических данных за 1953—1955 гг.

В первой части работы дается оценка влияния спектральной и зональной чувствительности пиранометра на данные измерений, во второй части* оценивается влияние ряда других погрешностей и даются окончательные поправочные множители для исправления данных тартуских измерений, произведенных пиранометрами Янишевского.

ЧАСТЬ I

1. Спектральная и зональная чувствительность пиранометра Янишевского

Интенсивность измеряемой пиранометром рассеянной радиации D и отраженной радиации R_Q определяется^[1, 2] из соотношений

$$D = L_D F_D a_n N_D \quad (1)$$

$$R_Q = L_R F_R a_n N_R, \quad (2)$$

где N_D и N_R — показания пиранометров при измерении соответственно рассеянной и отраженной радиации,

a_n — нормальный переводный множитель пиранометра, определяемый сравнительными наблюдениями по прямой солнечной радиации методом «солнце-тень»,

L_D и L_R — спектральные поправочные множители соответственно рассеянной и отраженной радиации, учитывающие различия в спектральном распределении рассеянной и отраженной радиации по сравнению с прямой радиацией,

F_D и F_R — зональные поправочные множители соответственно для рассеянной и отраженной радиации, учитывающие влияние пространственного распределения тех же радиаций.

* Вторая часть работы будет опубликована в № 2 «Известий АН ЭССР. Серия технических и физико-математических наук» за 1957 г. (Ред.)

L_D и L_R определяются из формул

$$L_D = \frac{\int_0^{\infty} \bar{S}_{m\lambda} E_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} \bar{D}_{\lambda} E_{\lambda} d\lambda} \quad (3)$$

$$L_R = \frac{\int_0^{\infty} \bar{S}_{m\lambda} E_{\lambda} d\lambda \int_0^{\infty} \bar{Q}_{\lambda} A_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} \bar{Q}_{\lambda} A_{\lambda} E_{\lambda} d\lambda}, \quad (4)$$

где E_{λ} — спектральная чувствительность пиранометра,

$\bar{S}_{m\lambda}$ — монохроматическая яркость солнечного диска и некоторого участка неба вокруг солнца в телесном углу, определяемом защитным экраном пиранометра, при массе атмосферы m ,

\bar{D}_{λ} — функция, характеризующая спектральное распределение рассеянной радиации,

A_{λ} — спектральное альbedo отражающей поверхности

$$\text{и } \bar{Q}_{\lambda} = \frac{\bar{S}_{m\lambda} \sin h_{\odot} + \bar{D}_{\lambda} \frac{D}{S}}{\sin h_{\odot} + \frac{D}{S}}, \quad (5)$$

причем h_{\odot} — высота солнца и $S = \int_0^{\infty} S_{m\lambda} d\lambda$.

Функции $\bar{S}_{m\lambda}$ и \bar{D}_{λ} нормированы так, что

$$\int_0^{\infty} \bar{S}_{m\lambda} d\lambda \equiv \int_0^{\infty} \bar{D}_{\lambda} d\lambda \equiv 1.$$

Тогда и по (5)

$$\int_0^{\infty} \bar{Q}_{\lambda} d\lambda \equiv 1.$$

F_D и F_R определяются формулами

$$F_D = \frac{\int_{2\pi} D''(h, \varphi) \sin h d\Omega}{\int_{2\pi} \frac{D''(h, \varphi)}{F(h)} \sin h d\Omega} \quad (6)$$

$$F_R = \frac{\int_{2\pi} B''(h, \varphi) \sin h d\Omega}{\int_{2\pi} \frac{B''(h, \varphi)}{F(h)} \sin h d\Omega}, \quad (7)$$

где $F(h)$ — зональная чувствительность пиранометра,

$$d\Omega = \cos h \, dh \, d\varphi,$$

$D''(h, \varphi)$ и $B''(h, \varphi)$ — функции, характеризующие пространственное распределение интенсивности соответственно рассеянной и отраженной радиации,

$D_\lambda D''(h, \varphi)$ — монохроматическая яркость неба в направлении (h, φ) ,

$B_\lambda B''(h, \varphi)$ — монохроматический коэффициент яркости, связанный со спектральным альбедо соотношением

$$A_\lambda = \frac{B_\lambda}{\pi} \int_{2\pi} B''(h, \varphi) \sin h \, d\Omega. \quad (8)$$

Если пиранометр неселективный, то $E_\lambda \equiv \text{const}$ и из (3) и (4) получим, что

$$L_D \equiv L_R \equiv 1.$$

Если приемная система пиранометра ортотропная, то $F(h) \equiv 1$ и из (6) и (7) получим

$$F_D \equiv F_R \equiv 1.$$

Вследствие того, что функции $\bar{S}_{m\lambda}$, \bar{D}_λ , $D''(h, \varphi)$, A , \bar{Q}_λ и $B''(h, \varphi)$ меняются в зависимости от времени, погодных условий, высоты солнца и т. д., определенные выше поправочные множители не являются постоянными даже в течение одного и того же дня. Поэтому для практического использования их мы должны определить некоторые средние типичные значения указанных функций и по ним вычислить средние поправочные множители. К сожалению, до настоящего времени как вид этих функций, так и их изменение изучены явно недостаточно, вследствие чего вычисление соответствующих поправок во многих случаях затруднительно.

2. Определение спектральных поправочных множителей пиранометра

Для вычисления L_D и L_R соответственно по (3) и (4) должны быть заданы функции E_λ , $\bar{S}_{m\lambda}$, \bar{D}_λ и A_λ , к рассмотрению которых мы и переходим.

Вид спектральной чувствительности пиранометра E_λ определяется спектральными свойствами стеклянного колпака и приемных поверхностей. При прохождении лучей через стекло происходит некоторое ослабление радиации, величина которого зависит от длины волны λ . Пршедшую через стекло радиацию черные пластинки приемника поглощают на 94—96%, белые в среднем на 20—30%, причем поглощательная способность белых пластинок в большой степени зависит от λ . Поэтому разность поглощаемой радиации черными и белыми пластинками, которая пропорциональна их чувствительности, зависит от λ .

Если обозначить через $P_\lambda = \frac{I_\lambda}{I_{0\lambda}}$ спектральное пропускание стеклянного колпака пиранометра, где $I_{0\lambda}$ и I_λ — интенсивность монохроматической радиации соответственно до и после прохождения через стекло, и через $A_\sigma(\lambda)$ и $A_\chi(\lambda)$ — спектральный коэффициент отражения соответственно белых и черных приемных пластинок, то E_λ в относительных единицах выразится в виде

$$E_{\lambda} = P_{\lambda} [(1 - A_u) - (1 - A_o)] = P_{\lambda} [A_o(\lambda) - A_u(\lambda)]. \quad (9)$$

Впервые E_{λ} была вычислена по этой формуле Янишевским^[1] на основании разных литературных данных, применимость которых для пиранометра Янишевского не совсем оправдана. В настоящей работе делается попытка определить E_{λ} на основании более современных данных, полученных из непосредственных опытов, проведенных над пиранометрами Янишевского.

Значения P_{λ} определялись в Тарту для двух пиранометров: АС 4×4 — 2814 и АП 3×3 — 374. Определения производились при помощи спектрофотометра СФ-4 в спектральном интервале от 0.25 μ до 2 μ , при помощи инфракрасного спектрометра ИКС-11 в интервале от 0.7 μ до 2.2 μ и при помощи спектрофотометра СФ-2 в интервале от 0.40 μ до 0.75 μ . Данные этих измерений для пиранометра АС 4×4 — 2814 приведены на рис. 1а.

Из рассмотрения этого рисунка вытекает, что данные спектрометра ИКС-11 в интервале λ от 0.7 μ до 1.0 μ малонадежны, по-видимому, вследствие недостаточной интенсивности источника света (штифт Нернста). В остальных случаях совпадение отдельных кривых удовлетворительно и P_{λ} определяется с ошибкой 2—4%.

Для пиранометра АП 3×3 — 374 получилась примерно такая же картина. В дальнейших расчетах для P_{λ} были взяты кривые, определенные при помощи спектрометра СФ-4. Мы видим, что в интервале λ от 0.29 до 0.38 μ пропускание P_{λ} увеличивается от 0.01 до 0.90, в интервале 0.38—1.5 μ P_{λ} остается практически постоянным и равно 0.91, а дальше, начиная с 1.5 μ , P_{λ} медленно падает. Для $\lambda > 2.2 \mu$ значение P_{λ} определить, к сожалению, не удалось.

Кроме того, на рис. 1а приведена еще кривая пропускания белого светофильтра БС-5 толщиной 1 мм, взятая из «Каталога цветного стекла» (Обorongиз, 1953). Из рисунка видно, что приведенная кривая хорошо согласуется с нашими данными. В интервале λ 2.0—3.0 μ P_{λ} для пиранометров была экстраполирована по кривой светофильтра и поэтому остается весьма произвольной. Но поскольку на интервал $\lambda > 2 \mu$ приходится не более 5% от падающей радиации, то связанные с этим ошибки при определении L_D и L_R невелики.

$A_o(\lambda)$ и $A_u(\lambda)$ были определены О. Е. Вершининым в Ленинградском электротехническом институте^[3] при помощи специальной, им самим сконструированной установки. Для этой цели мастерскими ГГО были изготовлены специальные образцы покрытий, обычно используемых для пиранометров. По сообщениям Ю. Д. Янишевского, черные клетки пиранометров зачернены сажей в целлулоиде, в то время как состав белого покрытия несколько варьирует. Для пиранометров 4×4, изготовленных мастерскими ГГО, белым покрытием служит MgO на целлулоиде, для радиально-симметричных пиранометров — мел. Для пиранометров 3×3, изготовленных тбилисским заводом «Гидрометприбор», белые клетки покрыты MgO на целлулоиде, пропитанном парафином. Спектральный коэффициент отражения был определен О. Е. Вершининым для всех этих покрытий. Результаты измерений Вершинина приведены на рис. 1б. Мы видим, что черные клетки отражают радиацию неселективно. Область сильного отражения белых поверхностей находится в интервале λ от 0.4 до 2.6 μ ; при $\lambda < 0.4 \mu$ и $\lambda > 2.6 \mu$ коэффициент отражения $A_o(\lambda)$ сильно падает. Максимально отражает мел, примерно одинаково отражают MgO и MgO с парафином. Для сравнения на рис. 1б приведена еще $A(\lambda)$ мела в интервале 0.25—0.90 μ , заимствованная из работы^[4]. Соответственно

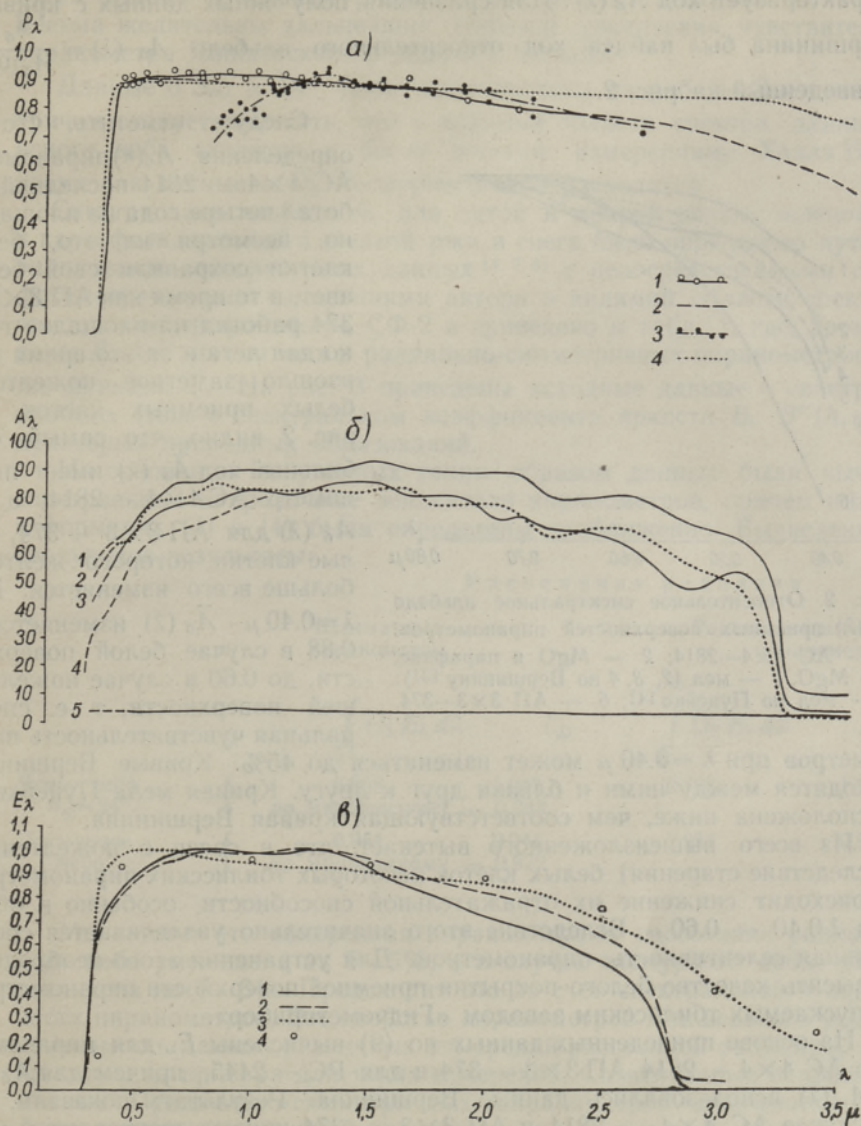


Рис. 1. а) Ход спектрального пропускания P_{λ} стеклянного колпака пиранометра АС 4×4—2814: 1 — по СФ—4; 2 — по СФ—2; 3 — по ИКС—11; 4 — спектральное пропускание P_{λ} белого светофильтра БС—5.

б) Ход спектрального альbedo черных и белых клеток пиранометра по Вершинину [3]: 1 — мел; 2 — MgO в целлулоиде; 3 — MgO в целлулоиде, пропитанном парафином; 4 — мел по Пуцейко [4]; 5 — сажа в целлулоиде.

в) Ход относительной спектральной чувствительности E_{λ} пиранометров Янишевского: 1 — шахматные; 2 — радиально-симметричные; 3 — по Янишевскому [1]; 4 — пиранометр Онгстрема по Гашэ [5].

этой кривой были экстраполированы кривые Вершинина для белых покрытий в интервале λ от 0.28 до 0.35 μ . Кроме того, при помощи СФ-2 нами было измерено спектральное альbedo черных и белых поверхностей вместе, для пиранометров АС 4×4 — 2814 и АП 3×3 — 374 в интервале λ 0.40 — 0.75 μ . Вследствие того, что $A_{\lambda}(\lambda) \cong \text{const}$, полученная кривая

характеризует ход $A_{\sigma}(\lambda)$. Для сравнения полученных данных с кривыми Вершинина был найден ход относительного альбеда $A_{\sigma}(\lambda) = \frac{A_{\sigma}(\lambda)}{A_{\sigma}(0.75)}$, приведенный на рис. 2.

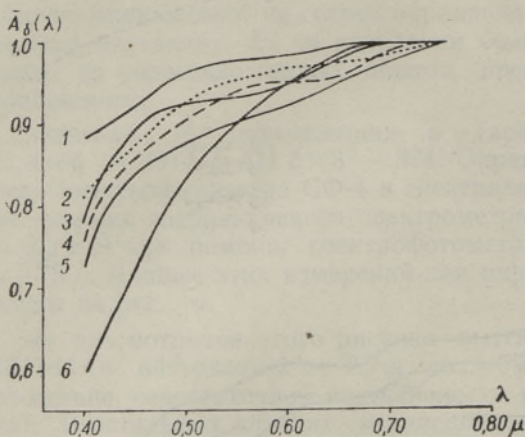


Рис. 2. Относительное спектральное альbedo $\bar{A}_{\sigma}(\lambda)$ приемных поверхностей пиранометров: 1 — АС 4×4—2814; 2 — MgO в парафине, 3 — MgO, 4 — мел (2, 3, 4 по Вершинину [3]); 5 — мел по Пудейко [4]; 6 — АП 3×3—374.

пиранометров при $\lambda = 0.40 \mu$ может измениться до 45%. Кривые Вершинина находятся между ними и близки друг к другу. Кривая мела Пудейко [4] расположена ниже, чем соответствующая кривая Вершинина.

Из всего вышеизложенного вытекает, что в связи с пожелтением (вследствие старения) белых клеток некоторых тбилисских пиранометров, происходит снижение их отражательной способности, особенно в области $\lambda 0.40 - 0.60 \mu$. Вследствие этого значительно увеличивается спектральная селективность пиранометров. Для устранения этого необходимо повысить качество белого покрытия приемной поверхности пиранометров, выпускаемых тбилисским заводом «Гидрометприбор».

На основе приведенных данных по (9) вычислены E_{λ} для пиранометров АС 4×4 — 2814, АП 3×3 — 374 и для РС — 2445, причем для $A_{\sigma}(\lambda)$ и $A_{\eta}(\lambda)$ использовались данные Вершинина. Результаты показали, что в случае АС 4×4 — 2814 и АП 3×3 — 374 кривые спектральной чувствительности E_{λ} совпадают с ошибкой $\pm 3\%$. Поэтому для дальнейших вычислений пользовались их средней величиной для всех пиранометров шахматного типа. На рис. 1в приведены кривые спектральной чувствительности E_{λ} в единицах максимальной чувствительности для шахматных и радиально-симметричных пиранометров. Из рисунка видно, что в видимой области шахматный пиранометр немного чувствительнее радиально-симметричного, а при $\lambda > 1.35 \mu$ радиально-симметричный пиранометр примерно на 10% чувствительнее шахматного.

Для сравнения на рис. 1в приведена кривая E_{λ} , заимствованная из работы Янишевского [1], а также данные Гашэ [5] для спектральной чувствительности пиранометра Онгстрема. Сравнение данных показывает, что в действительности спектральные свойства пиранометров Янишевского хуже, чем это явствует из работы [1]. Особенно вредной является спектральная избирательность в видимой области, что делает трудно сравни-

Следует отметить, что до определения $\bar{A}_{\sigma}(\lambda)$ пиранометра АС 4×4 — 2814 последний работал четыре года на площадке, но, несмотря на это, белые клетки сохранили свой белый цвет, в то время как АП 3×3 — 374 работал на площадке только два года и за это время произошло заметное пожелтение белых приемных клеток. Из рис. 2 видно, что самый стабильный ход $\bar{A}_{\sigma}(\lambda)$ имеет пиранометр АС 4×4 — 2814, а ход $\bar{A}_{\sigma}(\lambda)$ для АП 3×3 — 374, белые клетки которого желтеют, больше всего изменяется. При $\lambda = 0.40 \mu$ $\bar{A}_{\sigma}(\lambda)$ изменяется от 0.88 в случае белой поверхности, до 0.60 в случае пожелтевшей поверхности, т. е. спектральная чувствительность пира-

мыми данные измерений радиации различным спектральным составом. Весьма желательны дальнейшие попытки увеличения чувствительности пиранометра Янишевского в видимой области.

Данные о $S_{m\lambda}$ и \bar{D}_λ были заимствованы из работы Янишевского [1], причем следует отметить, что в видимой области спектра данные о \bar{D}_λ ясного неба сходятся с более новыми измерениями Халла [6], в то время как данные о \bar{D}_λ пасмурного неба расходятся.

Спектральное альbedo A_λ для сухой и мокрой почвы, зеленой травы и картофеля, зеленой и желтой ржи и снега было определено путем комбинирования литературных данных [4, 7, 8] с непосредственными спектрофотометрическими измерениями автора в видимой области спектра при помощи спектрофотометра СФ-2 и приведено в табл. 1, где, кроме того, даны E_λ для шахматных и радиально-симметричных пиранометров, а также функция \bar{Q}_λ . На рис. 3 приведены исходные данные о спектральном альbedo (или о спектральном коэффициенте яркости $B_\lambda = B''(h, \varphi)$) для некоторых природных образований.

На основании полученных таким образом данных были вычислены спектральные поправочные множители пиранометров, причем интегралы в формулах (3) и (4) были определены приближенно. Вычисления дали следующие результаты:

Рассеянная радиация

	Шахматные пиранометры		Радиально-симметричные пиранометры	
	$\int_0^\infty \bar{D}_\lambda E_\lambda d\lambda$	L_D	$\int_0^\infty \bar{D}_\lambda E_\lambda d\lambda$	L_D
Ясное небо $h_0 = 24^\circ$	0.866	1.047	0.856	1.058
		по Янишевскому — 0.988		
Пасмурное небо	0.964	0.941	0.954	0.949
		по Янишевскому — 0.972		

Мы видим, что измеренная пиранометрами рассеянная радиация ясного неба уменьшена на 5—6%, а в случае пасмурного неба, наоборот, увеличена на 5—6%. Происходит это за счет спектральной чувствительности пиранометров. Это свойство пиранометров Янишевского уменьшает сравнимость данных различных измерений рассеянной радиации, а также пригодность прибора для таких измерений. Спектральные поправки шахматных и радиально-симметричных пиранометров отличаются друг от друга в случае рассеянной радиации в пределах одного процента. В случае отраженной радиации вычисления показали, что значения L_R шахматных и радиально-симметричных пиранометров отличаются друг от друга максимально на 4%. Поэтому в дальнейших расчетах для всех пиранометров Янишевского используются средние спектральные поправочные множители отраженной радиации L_R , которые приведены в табл. 2.

Рассмотрение этой таблицы позволяет сделать следующие выводы:

1. При измерении отраженной радиации показания пиранометра завышены за счет различия спектрального состава прямой и отраженной радиации у всех рассматриваемых поверхностей, кроме снежного покрова при ясном небе.

2. Спектральные поправочные множители отраженной радиации L_R зависят от спектрального состава суммарной радиации; L_R ясного неба на 1.8—3.8% больше L_R пасмурного неба (в зависимости от типа отражающей поверхности).

Таблица 1

Спектральное альbedo некоторых природных образований

Интервал λ в μ	\bar{Q}_λ	E_λ		Спектральное альbedo												
		П4×4 П3×3	РС	Трава	Карто- фель	Рожь		Кринов, № 337	Кринов, № 347	Пудейко						
						сухая	мокрая				зеленая	желтая				
0.28—0.30	0.001	0.01	0.01													0.82
0.30—0.32	0.002	0.20	0.19													0.84
0.32—0.34	0.006	0.46	0.51													0.845
0.34—0.36	0.011	0.67	0.65													0.85
0.36—0.38	0.015	0.72	0.70													0.85
0.38—0.40	0.020	0.75	0.74													0.85
0.40—0.45	0.069	0.81	0.80													0.85
0.45—0.50	0.089	0.87	0.86	0.06											0.52	0.85
0.50—0.60	0.180	0.93	0.92	0.06											0.55	0.85
0.60—0.70	0.137	0.98	0.96	0.15											0.58	0.85
0.70—0.80	0.095	1.00	0.99	0.07											0.61	0.85
0.80—0.90	0.077	1.00	0.99	0.56											0.64	0.85
0.90—1.0	0.051	0.99	0.99	0.66											0.69	0.85
1.0—1.1	0.048	0.99	0.99	0.67											(0.705)	0.85
1.1—1.2	0.033	1.00	0.99	(0.67)												
1.2—1.3	0.036	1.00	1.00	(0.64)												
1.3—1.4	0.017	1.00	1.00	(0.59)												
1.4—1.5	0.014	0.95	0.98	(0.50)												
1.5—1.6	0.022	0.91	0.95	(0.28)												
1.6—2.0	0.037	0.80	0.87	(0.32)												
2.0—2.4	0.018	0.66	0.77	(0.25)												
2.4—4.0	0.019	0.02	0.04	(0.13)												
4.0—5.0	0.002	0.00	0.00	(0.02)												
5.0—11.0	0.001	0.00	0.00													

Примечание: В скобках приводятся экстраполированные значения.

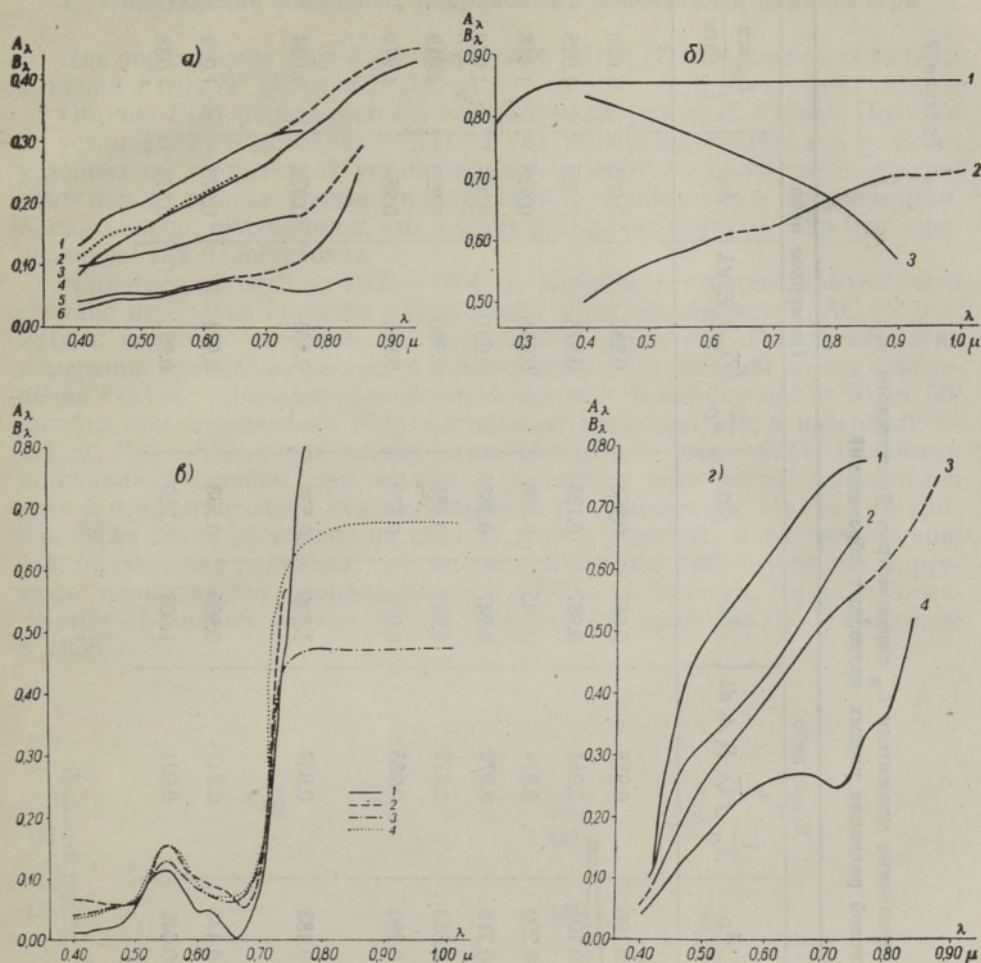


Рис. 3. Ход спектрального альbedo (спектрального коэффициента яркости) некоторых природных образований.

- а) Оголенная почва: 1 — сухая по СФ—2; 2 — Кринов 288 [7]; 3 — мокрая по СФ—2; 4 — пахотная по Пуцейко [4]; 5 — Кринов 272 [7]; 6 — Кринов 290 [7].
 б) Снежный покров: 1 — по Пуцейко [4]; 2 — Кринов 347 [7]; 3 — Кринов 337 [7];
 в) Трава: 1 — Кринов 164 [7]; 2 — осенняя по СФ—2; 3 — по Биллигсу и Моррису [9]; 4 — по Пуцейко [4].
 г) Рожь: 1 — образец № 1 по СФ—2; 2 — образец № 2 по СФ—2; 3 — образец № 3 по СФ—2; 4 — Кринов 219 [7].

3. Влияние спектрального состава на показания пиранометра максимально при зеленом растительном покрове; в случае ясного неба показания пиранометра завышены на 5,5%, в случае пасмурного неба даже на 7%. Влияние спектрального состава минимально в случае снежного покрова, когда показания пиранометра при ясном небе почти не зависят от спектрального состава радиации.

4. Различие в спектральном составе рассеянной и отраженной радиации по сравнению со спектральным составом прямой солнечной радиации оказывает влияние на показания пиранометра за счет спектральной чувствительности последнего, и это влияние настолько велико, что его следует учитывать при обработке данных измерений.

Таблица 2

Спектральные поправочные множители L_R пиранометров Янишевского
для отраженной радиации разных природных образований

	Интервал λ в μ	Ясное небо				Пасмурное небо			
		$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{S}_{m\lambda} E_\lambda d\lambda$	A_Q	$\frac{1}{A_Q} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{Q}_\lambda E_\lambda A_\lambda d\lambda$	L_R	A_D	$\frac{1}{A_D} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{D}_\lambda A_\lambda E_\lambda d\lambda$	L_R	$\frac{L_R \text{ ясн}}{L_R \text{ пасм}}$
Почва сухая	0.4—1.0	0.946	0.190	0.958	0.987	0.265	0.980	0.965	1.023
Почва мокрая	0.4—0.9	0.942	0.101	0.954	0.987	0.135	0.978	0.963	1.025
Трава	0.4—4.0	0.920	0.290	0.974	0.945	0.398	0.981	0.928	1.018
Каргофель	0.4—4.0	0.920	0.210	0.972	0.947	0.288	0.991	0.928	1.020
Рожь зеленая	0.4—4.0	0.920	0.363	0.972	0.947	0.483	0.980	0.929	1.019
Рожь желтая	0.4—0.9	0.942	0.260	0.965	0.976	0.370	0.983	0.958	1.019
Снег (Кринов, № 337)	0.4—0.9	0.942	0.483	0.934	1.009	0.539	0.965	0.976	1.034
Снег (Кринов, № 347)	0.4—1.0	0.946	0.423	0.947	0.999	0.533	0.974	0.971	1.029
Снег (Пудейко)	0.3—1.0	0.933	0.640	0.921	1.008	0.739	0.961	0.971	1.038

3. Определение зональных поправочных множителей пиранометра

Для определения F_D и F_R по формулам (6) и (7) должны быть заданы функции $F(h)$, $D''(h, \varphi)$ и $B''(h, \varphi)$.

Обычно $F(h)$ определяется в лабораторных условиях в Бюро Поверки по установленной методике [10]. Но $F(h)$ можно определить и в полевых условиях на теодолитной установке, аналогично лабораторным измерениям или по данным срочных наблюдений горизонтальным пиранометром. К сожалению, оказывается, что и в тех и в других случаях точность определения $F(h)$ недостаточна.

Например, в течение 1952—1954 гг. автором настоящей работы было сделано несколько попыток определения $F(h)$ пиранометра АС 4×4 — 2814 в полевых условиях на теодолитной установке. Результаты этих измерений приведены на рис. 4 и показывают, что полевой метод определения $F(h)$ на теодолите сравнительно неточен. В интервале h от 90° до 50° ошибки при определении $F(h)$ составляют примерно 1%, в интервале от 50° до 15° — 6%, а при малых углах ($h < 15^\circ$) — уже ~ 50%. Главными источниками ошибок при малых h являются неточности определения угла h и недостаточная чувствительность гальванометра. На рис. 4а кривая через точки проведена на глаз. С другой стороны, и паспортные кривые не особенно надежны, так, например, кривые $F(h)$ некоторых тартуских пиранометров, определенные в 1952 г. в Тбилиси, заметно отличаются от кривых, определенных для тех же приборов в Ленинграде в 1956 г.

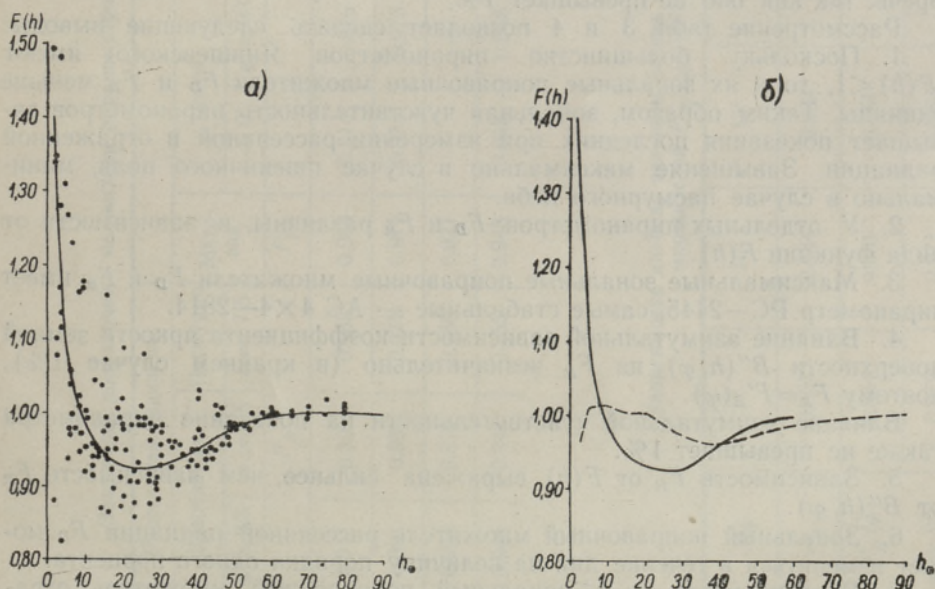


Рис. 4. а) Результаты определения $F(h)$ для АС 4×4—2814 на теодолитной установке в полевых условиях.

б) Функция $F(h)$ для АС 4×4—2814: 1 — по лабораторным данным ЦБП; 2 — по полевым данным.

Для $D''(h, \varphi)$ и $B''(h, \varphi)$ были использованы литературные данные [1, 7].

Кроме F_R , были вычислены величины

$$F'_R(\varphi) = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} B''(h, \varphi) \sin h \cos h dh}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{B''(h, \varphi)}{F(h)} \sin h \cos h dh},$$

т. е. зональные поправки определенного азимута φ , чтобы выяснить, насколько азимутальная зависимость $B''(h, \varphi)$ оказывает влияние на F_R .

Данные F_R , F_D и $F'_R(\varphi)$ для используемых в Тарту пиранометров приведены в табл. 3.

По данным Орловой [111] были вычислены $F'_R(\varphi)$ зеленого посева для $\varphi = 90^\circ$ при разных высотах солнца и ход альбеда прямой радиации A_S в зависимости от h_\odot .

Эти данные помещены в табл. 4 и они показывают, насколько зональный поправочный множитель изменяется в течение дня в зависимости от высоты солнца.

Нами было оценено также влияние азимутальной чувствительности на данные измерений, причем оказалось, что азимутальная чувствительность пиранометров заметна только при $h < 20^\circ$ и значительно меньше зональной чувствительности, благодаря чему ее влиянием можно пренебречь, так как оно не превышает 1%.

Рассмотрение табл. 3 и 4 позволяет сделать следующие выводы:

1. Поскольку большинство пиранометров Янишевского имеют $F(h) < 1$, то и их зональные поправочные множители F_D и F_R меньше единицы. Таким образом, зональная чувствительность пиранометров завышает показания последних при измерении рассеянной и отраженной радиации. Завышение максимально в случае пшеничного поля, минимально в случае пасмурного неба.

2. У отдельных пиранометров F_D и F_R различны, в зависимости от вида функции $F(h)$.

3. Максимальные зональные поправочные множители F_D и F_R имеет пиранометр РС-2445, самые стабильные — АС 4×4—2814.

4. Влияние азимутальной зависимости коэффициента яркости земной поверхности $B''(h, \varphi)$ на F_R незначительно (в крайнем случае 1%), поэтому $F_R \approx F'_R(\varphi)$.

Влияние азимутальной чувствительности на показание пиранометра также не превышает 1%.

5. Зависимость F_R от $F(h)$ выражена сильнее, чем зависимость F_R от $B''(h, \varphi)$.

6. Зональный поправочный множитель рассеянной радиации F_D может измениться в течение дня на величину порядка одного процента.

7. В зависимости от h_\odot зональный поправочный множитель отраженной радиации (F_R) может измениться в течение дня довольно заметно, например, F_R зеленого посева для РС-2445 изменяется от 0.804 при $h_\odot = 5^\circ$ до 0.898 при $h_\odot = 45^\circ$, т. е. на 12%.

8. Значение $F'_R(\varphi)$ при $\varphi = 90^\circ$ и $h_\odot = 45^\circ$, вычисленное по данным Кринова, хорошо согласуется со значением $F'_R(\varphi)$, вычисленным по данным Орловой, несмотря на то, что данные получены в разных местах и разными методами.

Таблица 3

Зональные поправочные множители пиранометров для рассеянной и отраженной радиации

Пиранометр	Рассеянная радиация				Отраженная радиация									
	Безоблачно		Пасмурно		Матовая	Почва		Пшеница		Луг $h_0 = 45^\circ$				
	$m = 2.3$	$m = 3.5$	$m = 7.5$	$m = 3.5$		$m = 7.5$	$\varphi = 0^\circ$	$\varphi = 90^\circ$	$\varphi = 0^\circ$	$\varphi = 180^\circ$	$\varphi = 0^\circ$	$\varphi = 90^\circ$	$\varphi = 180^\circ$	$\varphi = 270^\circ$
	F_D				F_R	$F'_R(\varphi)$								
РС-2445	0.911	0.902	0.935	0.908	0.914	0.916	0.852	0.855	0.906	0.900	0.906	0.906	0.911	0.906
АС 4×4 — 2814	0.961	0.961	0.971	0.971	0.974	0.975	—	—	0.970	0.971	0.970	0.969	0.970	0.970
АП 3×3 — 374	0.924	0.912	0.938	0.921	—	—	—	—	0.915	0.911	0.915	0.915	0.918	0.915
АП 3×3 — 305	0.945	0.944	0.955	0.948	0.948	0.948	0.930	0.930	0.946	0.944	0.946	0.945	0.947	0.945

Таблица 4

Зависимость альbedo зеленого посева и соответствующих поправочных множителей $F'_R(\varphi=90^\circ)$ от высоты солнца

Пиранометр	h_0	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
	A_s	0.431	0.484	0.263	0.204	0.227	0.284	0.236	0.251	0.207
РС-2445	$F'_R(\varphi)$	0.804	0.831	0.851	0.866	0.871	0.884	0.892	0.898	0.897
АС 4×4 — 2814	$\varphi = 90^\circ$	0.972	0.971	0.963	0.971	0.965	0.969	0.972	0.970	0.974

9. Так как влияние F_D и F_R оказывается в пределах 3—15%, то при обработке данных рассеянной и отраженной радиации следует учитывать и зональные поправки.

10. Вследствие того, что характеристики $F(h)$ отдельных пиранометров заметно отличаются друг от друга, необходимо вычислить F_D и F_R отдельно для каждого пиранометра.

11. Необходимо улучшить конструкции пиранометров путем уменьшения отклонения приемника от ортотропного.

Сравнение поправочных множителей L_R и F_R показывает, что влияние зональной чувствительности пиранометра на его показания в общем больше, чем влияние спектральной чувствительности. Кроме того, вышеприведенные данные о спектральной и зональной чувствительности пиранометров подтверждают, что по спектральной чувствительности пиранометры более однородны, чем по зональной чувствительности. Как уже было сказано, в зависимости от вида $F(h)$ зональные поправочные множители F_R отдельных пиранометров могут значительно отличаться. Поэтому при улучшении конструкции пиранометров Янишевского в первую очередь следует уделять внимание на достижение ортотропности приемника ($F(h) \cong 1$).

Наконец, в табл. 5 приведены суммарные поправки пиранометров $K_D = L_D F_D$ и $K_R = L_R F_R$.

Таблица 5

Поправочные множители рассеянной (K_D) и отраженной (K_R) радиации для пиранометров, используемых в Тарту

	РС—2445		АС 4×4—2814		АП 3×3—374		АП 3×3—305	
	Ясно	Пасмурно	Ясно	Пасмурно	Ясно	Пасмурно	Ясно	Пасмурно
Рассеянная радиация								
	0.96	0.885	1.005	0.915	0.96	0.885	0.99	0.90
Отраженная радиация								
Почва	0.905	0.88	0.96	0.94	—	—	0.935	0.915
Рожь зеленая	0.81	0.795	—	—	—	—	0.88	0.865
Пшеница желтая	0.885	0.87	—	—	—	—	0.925	0.91
Трава	0.855	0.84	0.915	0.90	0.865	0.85	0.895	0.875
Картофель								
Снег	0.91	0.885	0.975	0.945	0.925	0.89	0.955	0.92

Из таблицы видно, что при рассеянной радиации ясного неба данные пиранометра Янишевского завышены на 0—4%, а в случае пасмурного неба — на 9—12%. Таким образом, пиранометр Янишевского довольно чувствителен к изменениям спектрального и зонального состава рассеянной радиации. Это, конечно, неблагоприятно и уменьшает ценность и сравнимость данных, полученных при помощи пиранометра Янишевского.

В случае отраженной радиации данные пиранометра Янишевского завышены на 4—20% в зависимости от характеристик пиранометров, от типа отражающей поверхности и от спектральной и пространственной структуры падающей на поверхность радиации. В случае рассеянной, а также отраженной радиации завышение данных пиранометров Янишевского при пасмурном небе больше, чем при ясном небе.

Следует отметить, что вышеизложенные данные немногочисленны и отрывочны и, вследствие малого количества исходных данных, не претендуют на большую точность.

Но даже эти данные показывают, что значения альбеда, полученные путем измерений пиранометрами Янишевского, могут быть завышены до 20%. Также завышаются данные рассеянной радиации.

Как вышеприведенные результаты, так и выводы, полученные во второй части работы, показывают, что пиранометр Янишевского не лишен ряда систематических ошибок, снижающих надежность его работы. Поэтому необходимо дальнейшее улучшение конструкции пиранометра Янишевского, а также исправление полученных до сих пор данных измерений путем введения соответствующих поправочных множителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Д. Янишевский, Вопросы методики измерений пиранометрами и рассеянная радиация в Павловске, Труды ГГО, вып. 26, 1951, 5—45.
2. В. Г. Заводчикова и К. Я. Кондратьев, О пространственном распределении рассеянной и отраженной радиации, Вестник ЛГУ, Серия математики, физики и химии, № 2, 1953, 107—113.
3. О. Е. Вершинин, Исследование отражения и поглощения инфракрасной радиации зачерненными покрытиями, Диссертация, Кафедра физики вакуума ЛЭТИ, Ленинград, 1955.
4. Е. К. Пудейко, Сб. «Оптика в военном деле», т. I, 1945, 287—293.
5. E. Hasche, Gerl. Beitr. z. Geoph., B. 38, 1933, 19—46.
6. J. N. Hull, Transactions of the Illuminating Engineering Society, London, Vol. 19, No. 1, 1954.
7. Е. Л. Кринов, Спектральная отражательная способность природных образований, Изд. АН СССР, М.—Л., 1947.
8. Е. Рабинович, Фотосинтез, т. II, ИЛ, 1953.
9. W. D. Billigs and R. J. Morris, Americ. Journal Botany, 1951, 38, 327.
10. Руководство по поверке актиметрических приборов, Гидрометеониздат, ч. I, 1952; ч. II, 1954.
11. Н. С. Орлова, Изв. АН Каз. ССР, Серия астроботаники, вып. 1—2; 1950, 141—156.

*Институт физики и астрономии
Академии наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию
25 IX 1956

KIIRGUSE MÕOTMISEST JANISEVSKI TÛUPI PÛRANOMEETRITEGA

J. Ross

Resüme

Töös määratakse kindlaks Janiševiski tüüpi püranomeetrite spektraalne ja tsonaalne tundlikkus ning uuritakse sellest tingitud süstemaatiliste vigade mõju hajusa ja peegeldunud kiirguse mõõtmisel ENSV TA Füüsika ja Astronoomia Instituudi Tartu aktinomeetrialaboratooriumi poolt 1952.—1956. aastani teostatud mõõtmiste alusel. Tingituna spektraalsest tundlikkusest näitab püranomeeter selge taeva hajusa kiirguse mõõtmisel 5—6% vähem, pilves taeva hajusa kiirguse puhul, vastupidi, 5—6% enam. Olenevalt maapinna liigist, näitab püranomeeter peegeldunud kiirguse mõõtmisel 0—7% enam, välja arvatud lumikate (0—1% vähem).

Seoses vastuvõtupinna vanamisega võib püranomeetri spektraalne tundlikkus aja jooksul tunduvalt muutuda, olenevalt konkreetse püranomeetri omadustest.

Tingituna püranomeetrite tsonaalsest tundlikkusest näitavad nad hajusa kiirguse mõõtmisel 3—10% ja peegeldunud kiirguse mõõtmisel 3—15% enam. Süstemaatiliste vigade mõju arvestamiseks määratakse vastavad paranduskoeffitsiendid. Kuna üksikute püranomeetrite tsonaalne tundlikkus on väga erinev, siis tuleb tsonaalsed paranduskoeffitsiendid arvutada eraldi iga püranomeetri jaoks.

Spektrofotomeetrilisel teel määrati mõnede maapinna vormide spektraalne albeedo. Tulemused ühtivad üldjoontes kirjanduse andmetega.

*Eesti NSV Teaduste Akadeemia
Füüsika ja Astronoomia Instituut*

Saabus toimetusse
25. IX 1956

STRAHLUNGSMESSUNGEN MIT HILFE DES PYRANOMETERS VON JANISCHEWSKY

J. Ross

Zusammenfassung

Nach Messungen, durchgeführt in den Jahren 1952—1956 im aktinometrischen Laboratorium des Institutes für Physik und Astronomie der Akademie der Wissenschaften der Estnischen SSR, wurden die Spektralempfindlichkeit und die Abweichungen von der Gültigkeit des cos-Gesetzes bei Pyranometern von Janischewsky untersucht, sowie die Berichtigung der durch diese Abweichungen verursachten systematischen Fehler auf die Messergebnisse mit Hilfe von Korrektionskoeffizienten vorgenommen. Aus der Analyse dieser Arbeit erfolgt, dass die mit Pyranometern gemessene diffuse Strahlung bei wolkenlosem Himmel 5—6% zu niedrig, bei bedecktem Himmel, im Gegenteil, 5—6% zu hoch ist.

Durch Abweichungen von der Gültigkeit des cos-Gesetzes werden die pyranometrischen Messwerte folgendermassen vergrössert; bei diffuser Strahlung um 3—10% und bei reflektierter Strahlung um 3—15%. Da die Abweichungen von der Gültigkeit des cos-Gesetzes bei verschiedenen Pyranometern nicht übereinstimmen, sind die Korrektionskoeffiziente für jedes einzelne Pyranometer gesondert zu ermitteln.

Institut für Physik und Astronomie
der Akademie der Wissenschaften der Estnischen SSR

Eingegangen
am 25. Sept. 1956

KIRGUSE MOOTMISTEJ JANISEVSKI TUUPI PYRANOMETRITSEGA

J. Ross

Resümee

Tõde määrataks kindlaks Janisevski tüüpi pyranomeetrite spektriline ja kosinusine tundlikkus ning uuritakse sellest tingitud süstemaatiliste vigade mõju hindamisel ja parandamisel. Mõõtmised tehti ENSV TA Füüsika ja Astronoomia Instituudi füüsika ja astronoomia meetrite laboratooriumis aastatel 1952—1956. uuritud süstemaatilisi mõjutusi algul. Tulemused näitavad, et pyranomeetritega mõõdetud hajutatud kiirguse tihedus on 5—6% vähenenud, kuid katetud taevastel mõõtmistel suurenenud 5—6% võrra. Seepärast tuleb pyranomeetritega mõõdetud kiirguse tihedust korrigeerida. Korrigeerimiskoeffitsiendid tuleb määrata iga eraldi pyranomeetri jaoks.

Спектральная чувствительность и отклонения от закона косинусов для пиранометров типа Янисевски были исследованы в актинометрической лаборатории Института физики и астрономии Академии наук Эстонской ССР в 1952—1956 гг. Исследованы систематические ошибки измерений, вызванные этими отклонениями, и предложены коэффициенты коррекции. Из анализа работы следует, что измеренная пиранометрами диффузная радиация при ясном небе на 5—6% занижена, а при облачном небе, наоборот, на 5—6% завышена. Поэтому пиранометрические измерения диффузной радиации необходимо увеличивать следующим образом: при диффузной радиации на 3—10% и при отраженной радиации на 3—15%. Поскольку отклонения от закона косинусов для различных пиранометров не совпадают, коэффициенты коррекции для каждого пиранометра необходимо определять отдельно.

Ennastatud süstemaatilisi mõjutusi algul. Tulemused näitavad, et pyranomeetritega mõõdetud hajutatud kiirguse tihedus on 5—6% vähenenud, kuid katetud taevastel mõõtmistel suurenenud 5—6% võrra. Seepärast tuleb pyranomeetritega mõõdetud kiirguse tihedust korrigeerida. Korrigeerimiskoeffitsiendid tuleb määrata iga eraldi pyranomeetri jaoks.