

УДК 681.2

DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-55-65

**ОСОБЕННОСТИ КАЛИБРОВКИ ИК-РАДИОМЕТРОВ,
РАБОТАЮЩИХ В ОКНЕ ПРОЗРАЧНОСТИ
АТМОСФЕРЫ 8–14 МКМ**

А.П. Величко

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

@Автор для переписки, e-mail: velap57@yandex.ru

В статье рассмотрена возможность применения в инфракрасной радиометрии дополнительных компенсаторов, «прозрачных» в рабочем спектральном диапазоне 8–14 мкм. Они обладают контролируемыми, с высокой точностью излучающими параметрами, которые позволяют более простым способом осуществлять регистрацию радиационных потоков атмосферы под различными зенитными углами без учета аппаратной функции радиометра. Постоянный контроль указанной функции представляет достаточно сложную техническую задачу. В качестве компенсатора предлагается использовать полиэтиленовую пленку толщиной 10 мкм. В зависимости от величины радиационного потока в измерительный канал перед радиометром вводится определенное количество слоев такой пленки с постоянно контролируемыми параметрами, которая будет своеобразным «опорным излучателем». Выполнены расчеты, основанные на законах распространения инфракрасного излучения в земной атмосфере, а также приведены экспериментальные данные, подтверждающие целесообразность применения предлагаемой методики при дистанционном зондировании атмосферы в «окне прозрачности». Разработанная методика позволит расширить динамический диапазон радиометра в области низких (ниже 223 К) температур, что у большинства радиометров составляет порог чувствительности, а температура «чистой» атмосферы в зените бывает значительно ниже.

Ключевые слова: атмосфера, окно прозрачности, ИК-радиометр, аэрозоль, водяной пар, длина волны.

**FEATURES OF CALIBRATION OF INFRARED RADIOMETERS
WORKING IN WINDOW OF TRANSPARENCY
OF THE ATMOSPHERE 8–14 MICRONS**

A.P. Velichko

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author e-mail: velap57@yandex.ru

This article considers the possibility of using additional infrared radiometry compensators "transparent" in the operating spectral range of 8–14 μm and having radiating parameters controlled with high accuracy. This will allow a simpler way to register the radiation fluxes of the atmosphere at different zenithal angles without taking into account the hardware function of the radiometer. The constant monitoring of this function is quite a difficult technical task. It is proposed to use a polyethylene film with a thickness of 10 μm as a compensator. Depending on the value of the radiation flow, a certain number of layers of such a film with constantly controlled parameters, which will be a kind of a "reference radiator", are introduced into the measuring channel in front of the radiometer. The article presents theoretical calculations based on the laws of infrared radiation propagation in the Earth's atmosphere, as well as experimental data confirming the expediency of this technique in remote sensing of the atmosphere in the "transparency window". This technique extends the dynamic range of the radiometer in the low temperature range (below 223 K), which is the sensitivity threshold of most radiometers. The temperature of the "clean" atmosphere at the zenith is much lower.

Keywords: atmosphere, transparency window, IR radiometer, aerosol, water vapor, wavelength.

На кафедре «Приборы и информационно-измерительные системы» РТУ МИРЭА разработана аппаратура, обеспечивающая исследования оптических параметров атмосферы одновременно в видимом и ИК-диапазоне длин волн [1]. Особый интерес представляет применение ИК-радиометрии для изучения влияния содержащегося в атмосфере водяного пара и аэрозоля на уровень нисходящего теплового излучения атмосферы в окне прозрачности 8–14 мкм [2, 3].

Обратим внимание на то, что излучение атмосферы даже в окне прозрачности 8–14 мкм по спектральному диапазону распределено неравномерно (рис. 1).

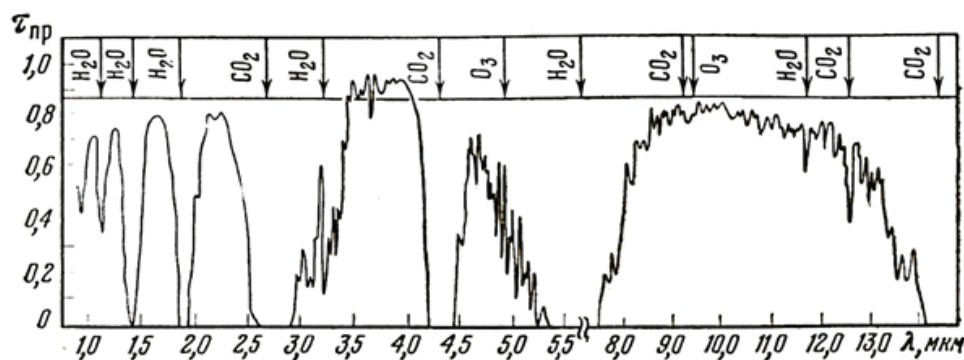


Рис. 1. Пропускание атмосферы в ИК-диапазоне на горизонтальной трассе протяженностью 1.8 км на уровне моря при толщине слоя осажденной воды 17 мм.

Коэффициент ε_a , определяющий излучающую способность водяного пара, углекислого газа и аэрозоля, является величиной переменной, зависящей от сезона года, метеоусловий и состояния атмосферы. Для городских условий особенно велико влияние аэрозоля на перенос ИК-излучения в окне прозрачности 8–14 мкм при повышенной влажности воздуха, когда в атмосфере образуется смог, мгла или дымка. Уровень спектральной мощности излучения, обусловленный аэрозолем, зависит не только от количества аэрозоля, содержащегося в атмосфере, но и от его высотного распределения. Влияние же водяного

пара, углекислого газа и озона на различных спектральных участках в полосе 8–14 мкм различно. Так, в области 8–10 мкм в летний, весенний и осенний сезоны водяной пар вносит значительный вклад в принимаемое ИК-радиометром излучение по сравнению с тем, которое фиксируется в области 12–14 мкм [4, 5].

Поэтому при использовании стандартных калибровочных графиков, полученных по заводским или лабораторным «черным» или «серым» телам, возникают сложности для тех случаев, когда ИК-радиометр применяется для исследования излучающих свойств атмосферы и, тем более, когда предпринимаются попытки сопоставить показания радиометра с термодинамическим состоянием атмосферы и содержанием в ней водяного пара и аэрозоля.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы выполнить расчеты, которые позволили бы облегчить интерпретацию радиометрических данных, когда объектом исследования является реальная атмосфера.

Следует отметить, что создать калибровочные тела, при помощи которых можно было бы имитировать излучающие свойства атмосферы, невозможно, вследствие изменчивости коэффициента излучения $\varepsilon_a(\lambda)$, а изменение температуры и высотного распределения поглощающих веществ в реальной атмосфере заранее неизвестно [6]. Поэтому приходится искать иные пути, которые позволили бы подойти к решению этой сложной проблемы – перехода от радиационных температур $r(\lambda)d\lambda$ [К], где $d\lambda$ – спектральные диапазоны, в которых регистрируются радиационные потоки, к плотности радиационных потоков $R(\lambda)d\lambda$ [Вт/см²].

Первоначально получим некоторые исходные соотношения, которые позволят в дальнейшем произвести расчеты, облегчающие интерпретацию экспериментальных данных по излучению свободной атмосферы [5, 7, 8].

Воспользовавшись формулами, вытекающими из закона Планка, приведем некоторые соотношения и рассчитанные по ним значения потоков, привязанные к длине волны и величинам радиационных температур. Обратим внимание, что значение радиационных потоков безоблачной атмосферы, которые соответствуют радиационным температурам ниже 220 К, характерны для околозенитной области неба. При этом известные ИК-радиометры способны зарегистрировать температуру не ниже 223 К. Чтобы появилась возможность оценить радиационную температуру в зените, приходится проводить измерения при углах места, меньших 90°, а затем, интерполируя околозенитные температурные значения, определять температуру в зените. Это влечет за собой значительную погрешность: так, например, при угле места 30° уровень радиационного потока при его малых значениях удваивается.

Получение необходимого уровня теплового излучения атмосферы возможно при установлении взаимосвязи между радиационной T_p и кинетической температурой T_k . Решение этой задачи потребовало проведения расчетов, для которых использовали функцию Планка, представленную в обобщенных координатах x – y , а также таблицы и методики, подробно изложенные в [9, 10].

Лучистость атмосферы определяется выражением:

$$B(\theta) = \int_0^\infty p_a(\lambda) \int r(\lambda, T(H)) dF(\lambda, w) d\lambda$$

где $F(\lambda, w)$ – спектральная функция пропускания в направлении угла визирования β ;

$$w = \frac{1}{\cos \beta} \int_0^H p_i(\beta) \left[\frac{P(H)}{P(0)} \right]^{N_i} dh \quad - \text{приведенная масса вещества на пути распространения:}$$

$P(H), P(0)$ – давление, соответственно, на высоте H и на уровне Земли;

$p_i(\beta)$ – пропускание атмосферного слоя толщиной dH_i при угле визирования β ;

N_i – коэффициент, равный для $H_2O - 0.3$; $CO_2 - 1$; $O_3 - 0.2$ [9].

Вклад в суммарный радиационный поток различных участков спектра в полосе 8–14 мкм различен. Если обратиться к анализу данных о спектральной прозрачности атмосферы в различных участках спектра 8–14 мкм (рис. 1), то нетрудно заметить, что в диапазоне от 8 до 9 мкм вклад водяного пара в радиационный поток – в зависимости от его содержания в атмосфере – может изменяться практически от нуля (зимой) до 100% (летом, при очень высокой влажности атмосферы). Следовательно, в зависимости от погодных условий и сезона происходит перераспределение вклада различных участков спектра в суммарное нисходящее излучение атмосферы.

Вклад содержащегося в атмосфере углекислого газа более предсказуем: он проявляется в основном в области 13–14 мкм. Значение $\varepsilon_{\lambda(CO_2)}$ – более консервативно, и его можно учитывать в виде отдельной добавки.

В первом приближении будем считать, что роль обводненного аэрозоля (а возможно, и сухого), а также жидкокапельной облачности в формировании нисходящего излучения сводится к тому, что их вклады пропорциональны содержанию и зависят также от термодинамической температуры, при которой находятся облачность или аэрозоль. Таким образом, ярко выраженной зависимости коэффициента ε от длины волны λ нет, а, значит, излучающие (поглощающие) свойства неселективны [11].

Для расчетов радиационных потоков воспользуемся функцией Планка, представленной в обобщенных координатах x, y, z , где

$$x = \frac{\lambda}{\lambda_m}, \quad y = \frac{r_\lambda}{r_{\lambda_{\max}}}, \quad z = \frac{\int_0^x y(x) dx}{\int_0^\infty y(x) dx}.$$

Функция Планка в обобщенных координатах записывается в виде $y(x)$:

$$y(x) = 142,3x \cdot 5 / (\exp(4,96x) - 1).$$

Значение λ_m (для абсолютно черного тела (АЧТ) $\varepsilon = 1$) определяется из закона смещения Вина, где T – термодинамическая температура объекта в градусах Кельвина:

$$\lambda_m T = 2898 [K \cdot \text{мкм}],$$

максимальные значения спектральной мощности излучения этого тела находятся, как

$$r_{\lambda,m} = 1,286 \cdot 10^{-15} T^5 \left[\frac{Bm}{\text{см}^2 \cdot \text{мкм}} \right],$$

а суммарный поток (плотность потока) равен $R_\Sigma = \sigma T^4$,

где σ – постоянная Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12} \left[\frac{Bm}{\text{см}^2 \cdot K^4} \right]$.

Табулированные значения y и z для различных значений x приведены в пособии по основам ИК-техники [5] и в монографии [9].

Расчеты спектральных потоков проводили по методике, изложенной в [9], исходя из допущения, что узкополосный ИК-радиометр работает в диапазоне длин волн, «приводимом к длинам волн» 8, 10, 12 и 14 мкм. Методика [9] использует функцию Планка, представленную в обобщенных координатах $x-y$ и $x-y-z$, где

$$z_a = \frac{\int_0^{\lambda_a} y(x) dx}{\int_0^{\infty} y(x) dx}, \quad z_b = \frac{\int_0^{\lambda_b} y(x) dx}{\int_0^{\infty} y(x) dx}.$$

Обобщенную координату Δz в полосе длин волн $\lambda_b - \lambda_a$ можно представить в виде следующего соотношения:

$$\Delta z = z_b - z_a,$$

а лучистый поток в полосе $\lambda_b - \lambda_a$:

$$R_{\lambda_a - \lambda_b} = \int_0^{\infty} y(x) dx \cdot \Delta z.$$

Учитывая, что мощность излучения, падающая на единицу поверхности σT^4 , получим

$$R_{\lambda_a - \lambda_b} = \sigma T^4 \cdot \Delta z.$$

Значения σT^4 для АЧТ при различных температурах представлены ниже в таблице (см. стр. 62).

Как указывалось выше, при «ясном» небе и «чистой» (почти не загрязненной аэрозолями) атмосфере ее радиационная температура при вертикальном зондировании в полосе 8–14 мкм может быть ниже 220 К. Тогда радиационный поток лежит ниже пороговых значений, которые регистрируются применяемой ИК-радиометрической аппаратурой. Чтобы зарегистрировать столь малые потоки, целесообразно воспользоваться известными методами, описанными в [2]. Согласно одному из них, например, ИК-радиометр устанавливается на платформе, которая позволяет регистрировать излучение атмосферы при различных углах визирования. При этом используется долготный метод Бугера: спектральная мощность излучения r_λ возрастает при малых значениях поглощения в атмосфере пропорционально $r_{\lambda_{90^\circ}} / \sin \beta$ ($r_{\lambda_{90^\circ}}$ – излучение атмосферы на длине волны λ при вертикальном зондировании, а β – угол места, при котором проведены измерения). Однако долготный метод Бугера, ввиду определенной и ограниченной степени точности, дает значительные погрешности.

Воспользовавшись измерениями при различных углах β , можно попытаться перейти от радиационных значений температур к радиационным потокам. Этот процесс достаточно сложен, тем более, если неизвестна аппаратная функция ИК-радиометра. Отсюда возникает необходимость поиска иных путей решения данной проблемы.

Один из таких путей состоит в том, чтобы использовать специальные насадки, пропускающие которых $\tau(\lambda)$ заранее известно и, следовательно, известна их излучающая способность.

Такой насадкой может являться тонкая полиэтиленовая пленка. Ее излучающая способность определяется из соотношения

$$\varepsilon_{\text{пленки}}(\lambda) = 1 - \tau_{\text{пленки}}(\lambda)$$

Пленка добавляет к измеряемому потоку некоторую величину, изменяя тем самым радиационную температуру $\Delta T = \varepsilon(\lambda)r(\lambda, T)\Delta\lambda$.

Пропускание полиэтиленовой пленки $\tau(\lambda)$ в диапазоне длин волн 1–15 мкм представлено на рис. 2.



Рис. 2. Спектральный коэффициент пропускания полиэтилена толщиной 0,1 мм.

Величина $r(\lambda, T)$ для известной температуры пленки T , которая равна температуре окружающей ее среды, рассчитывается по формуле Планка.

Основное соотношение, из которого определяется спектральная мощность R_λ в полосе $\Delta\lambda$ на длине волны λ , соответствующей максимальному значению r_λ ($r_{\lambda\max}$), можно записать в виде:

$$R_{\lambda\max} = r_{\lambda\max}\Delta\lambda = 1,28(T^5) \cdot 10^{-15} \frac{Вт}{м^2 \cdot мкм} \cdot \Delta\lambda = 1,28(T^5) \cdot 10^{-11} \frac{Вт}{см^2 \cdot мкм} \cdot \Delta\lambda,$$

где $\Delta\lambda$ выражается в мкм.

Выражение для R_λ при любой другой длине волны может быть записано в виде следующего соотношения:

$$R_\lambda = r_\lambda\Delta\lambda = \varepsilon_\lambda 1,28(T^5) \cdot 10^{-11} \frac{Вт}{см^2 \cdot мкм} \cdot y \cdot \Delta\lambda,$$

где ε_λ — излучающая способность объекта исследования;

$y = \frac{r_\lambda}{r_{\lambda\max}}$ — безразмерная величина, отношение излучающей способности АЧТ на длине волны λ к излучающей способности того же тела на длине волны, на которой регистрируется максимальное значение по излучению.

Выполнены расчеты R_λ для длин волн, в которых предположительно может работать ИК-радиометр, т. е. 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 мкм и температур $T = 150, 175, 200, 225, 250, 273, 300, 325$ и 373 К. Результаты расчетов приведены на рис. 3, 4. Поскольку аппаратная функция используемого в наших работах фильтра в диапазоне длин волн $\lambda_a - \lambda_b$ неизвестна, то расчет выполнен для полос пропускания фильтров 8–10, 8–12, 8–14, 10–12, 10–14, 12–14 мкм, которые расположены перед приемником ИК-излучения. Считаем, что термоэлектрический приемник неселективен [11].

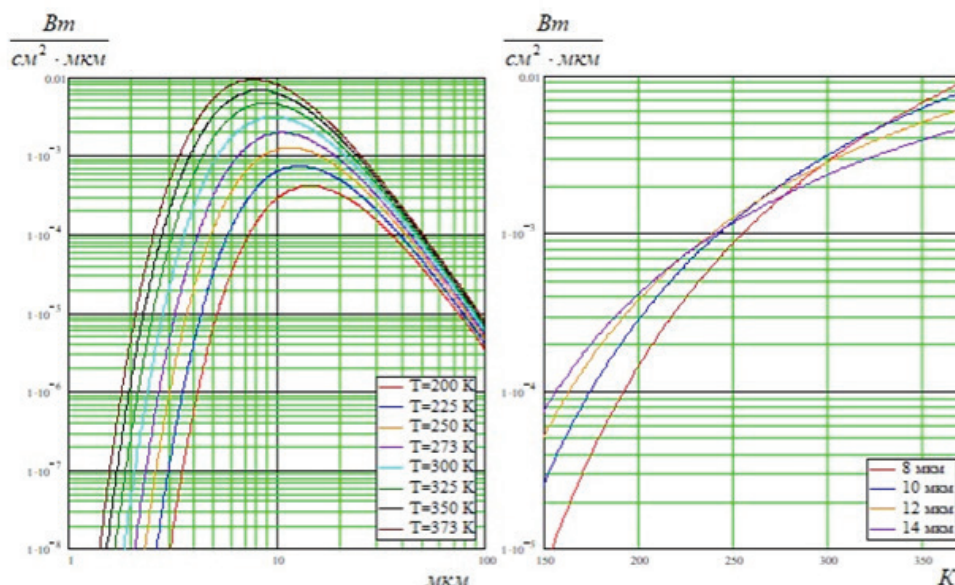


Рис. 3. Кривые Планка.

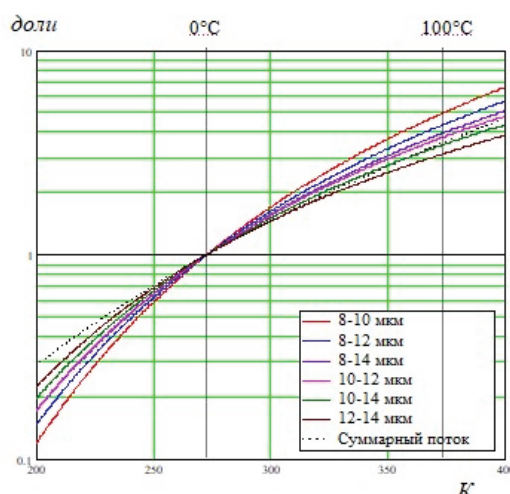


Рис. 4. Относительная спектральная плотность излучения в полосах длин волн в диапазоне 8–14 мкм.

Анализ полученных данных показывает, что разница между плотностью излучения в различных поддиапазонах длин волн может изменяться качественно в зависимости от температуры измеряемого объекта. Так, например, при температуре объекта 200 К в диапазоне длин волн 8–10 мкм плотность излучения ниже, чем в диапазоне 10–12 мкм, которая, в свою очередь, ниже, чем в диапазоне 12–14 мкм. При температуре объекта 300 К наблюдается противоположная картина.

На рис. 5 приведены результаты расчетов спектральной плотности излучения при разных температурах, если ИК-радиометр работает в полосе 8–14 мкм.

Очевидно, что вклад, вносимый пленкой в излучение, поступающее на радиометр, различается на разных длинах волн внутри диапазона 8–14 мкм. Так, спектральная плотность излучения на длине волны 8 мкм при температуре измеряемого объекта 200 К при наличии насадки с пленкой на радиометре в 2.6 раза больше, чем без нее. На длине волны

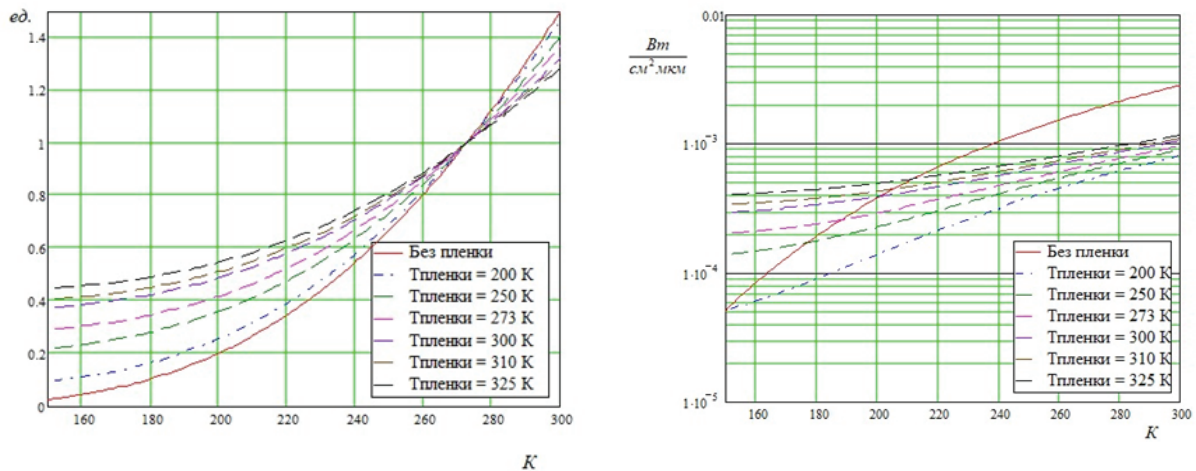


Рис. 5. Спектральная плотность излучения (в относительном и абсолютном представлении) на длине волны 12 мкм при использовании пленки различной температуры.

10 мкм это отношение уже равно 1.3, а на 13 мкм – 1.0. Такая разница обусловлена различными спектральными характеристиками атмосферы и водяного пара внутри указанного диапазона [12].

Проведенный расчет показывает, что применение описанной выше методики будет полезно при температуре пленки 300 К и выше. В этом случае постоянное увеличение излучения может компенсировать ограничение снизу на величину измеряемого радиометром сигнала.

В таблице приведены ожидаемые значения спектральной плотности излучения для различных длин волн 8–14 мкм и термодинамических температур 200–350 К, полученные в предположении, что измеряемый объект излучает как АЧТ.

Результаты расчета величин потоков для различных длин волн и температур

T, K	$T, K^4 \cdot 10^8$	$T, K^5 \cdot 10^{10}$	$\lambda_m, \text{мкм}$	$R_{\lambda_{\max}}, \frac{Вт}{\text{см}^2}$	$\sigma T^4, \frac{Вт}{\text{см}^2}$
200	16	32	14.49	0.000412	0.009
225	25.629	57.665	12.88	0.000742	0.015
250	39.063	97.656	11.592	0.00126	0.022
275	57.191	157.276	10.538	0.00202	0.032
280	61.466	172.104	10.35	0.00221	0.035
290	70.728	205.111	9.993	0.00264	0.04
300	81	243	9.66	0.00313	0.046
310	92.352	286.292	9.348	0.00368	0.052
325	111.566	362.591	8.917	0.00466	0.063
350	150.063	525.219	8.28	0.00675	0.085

Если перед ИК-радиометром установлено дополнительное устройство, которое имеет свой коэффициент излучения ε , температура которого совпадает с температурой окружающей среды T , то необходимо величины, приведенные в таблице и на рис. 3–5, умножить

на значение ε . Если температура фильтра T много больше, чем температура излучающего тела (например, радиационная температура измеряемого объекта равна 220 К, а окружающей среды – 290 К), то к потоку, соответствующему 220 К, необходимо добавить поток, который поступает непосредственно от фильтра, т.е. ε среды при температуре $T = 290$ К. При фиксации излучения от высокотемпературного источника $T_{\text{объекта}} \gg T_{\text{среды}}$ идущий от фильтра поток при $\varepsilon \ll 1$ практически не скажется на показаниях прибора. Однако при этом уровень излучения, зафиксированного ИК-радиометром, существенно упадет, так как его показания будут соответствовать изменению суммарного потока на величину ΔR объекта, где $\tau(\lambda)$ – пропускание фильтра ($\tau = 1 - \varepsilon_\lambda$).

Уменьшение потока на ΔR может восприниматься как изменение радиационной температуры объекта на величину ΔT . Таким образом, ΔR и ΔT – функционально связанные величины. Чтобы устанавливать количественно эти связи, воспользуемся результатами расчетов (см. таблицу). Фильтром может служить тонкая полиэтиленовая пленка, а для высокотемпературных источников – даже тонкий слой бумаги.

При использовании ИК-терморadiометра, работающего в окне прозрачности 8–14 мкм, для определения влагосодержания атмосферы и содержания аэрозоля, внимание обращено на то, что поглощение, а, следовательно, и излучение атмосферы при радиометре, направленном в зенит, в указанном диапазоне невелико, и редко для безоблачной атмосферы ее излучающая способность ε превышает 0.5. Поэтому угловую зависимость потока излучения, приходящего из атмосферы на вход ИК-радиометра с малым углом поля зрения, до углов 20° вполне удовлетворительно можно описать при помощи следующего простого соотношения:

$$R = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} R(\lambda, T) \left[1 - e^{-\tau / \sin \beta} \right] d\lambda$$

где β – угол визирования, отсчитанный от горизонта;

τ_λ – оптическая толщина атмосферы при $\beta = 90^\circ$.

Из последней формулы следует, что оптическая толщина атмосферы при уменьшении угла визирования до 30° возрастает в два раза. Это соотношение позволяет рассчитать при известной температурной стратификации атмосферы содержание в ней водяного пара и значение R . Если известно пропускание фильтра (т. е. его избирательная способность) или угол β , то можно добиться совпадения расчетного значения R с измеренным. Одновременно фиксируется радиационная температура T_p , что открывает возможность определения R . Методика расчета R для атмосферы по данным радиозондирования достаточно подробно изложена в [4].

В дальнейшем представляет интерес получить данные о величине радиационного потока и оптической толщине атмосферы.

Литература:

1. Величко А.П. Разработка наземных средств дистанционного контроля атмосферы // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 5. С. 116–123.
2. Величко А.П., Пчелкина Н.В., Шишков П.О. Дистанционные исследования основных характеристик облаков различных типов в ИК и видимом диапазонах спектра //

Вестник МГУПИ. Серия: Приборостроение и информационные технологии. 2009. № 21. С. 3–12.

3. Ходунков В.П. Термометрия и инфракрасная радиометрия многофазных и много-объектных систем. СПб.: Политехника, 2013. 258 с.

4. Новокрещенова А.С., Щукин Г.Г. К методике определения содержания водяного пара в атмосфере по совместным ИК и СВЧ радиометрическим измерениям // Труды ГГО (Главной геофизической обсерватории). 1982. Вып. 451. С. 40–49.

5. Михеев С.В. Основы инфракрасной техники. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 127 с.

6. Пономаренко В., Филачев А. Инфракрасная техника и электронная оптика. Становление научных направлений. 1946–2016. М.: Физматкнига, 2016. 448 с.

7. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль: 2-е изд., доп. М.: Издательский дом «Спектр», 2013. 544 с.

8. Волф У., Цисис Г. (ред.) Справочник по инфракрасной технике в 4-х томах. Т. 4. Проектирование инфракрасных систем: Пер. с англ. М.: Мир, 1999. 472 с.

9. Величко А.П., Гарипов В.К., Слепцов В.В., Шишков П.О. Системы дистанционного контроля параметров окружающей среды (атмосферы) на основе ИК-радиометрии. Концепция проектирования. М.: Машиностроение-1, 2007.

10. Скворцов Л.А. Основы фототермической радиометрии и лазерной термографии. М.: Техносфера, 2017. 218 с.

11. Шрайбер Г. Инфракрасное излучение в электронике: Пер. с франц. М.: ДМК Пресс, 2009. 240 с.

12. Коротаев В.В., Мельников Г.С., Михеев С.В., Самков В.М., Солдатов Ю.И. Основы тепловидения. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 122 с.

References:

1. Velichko A.P. Development of ground-based means of remote monitoring of the atmosphere. Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta (Aerospace MAI Journal). 2014; 5: 116-123. (in Russ.)

2. Velichko A.P., Pchelkina N.V., Shishkov P.O. Remote researches of main clouds characteristics in IR and visible regions of spectrum. Vestnik MGUPI. Seriya: Priborostroyeniye i informatsionnyye tekhnologii (Bulletin of MGUPI. Series: Instrumentation and Information Technology). 2009; 21: 3-12. (in Russ.)

3. Khodunkov V.P. Thermometry and infrared radiometry of multiphase and multi-object systems. Saint-Petersburg: Politehnika Publ., 2013. 258 p. (in Russ.)

4. Novokreschenova A.S., Shchukin G.G. To the method for determining the content of water vapor in the atmosphere by combined IR and microwave radiometric measurements. Trudy GGO (Proceed. of the Main Geophysical Observatory). 1982; 451: 40-49. (in Russ.)

5. Mikheev S.V. Fundamentals of infrared technology. Saint-Petersburg: Universitet ITMO Publ. (Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics), 2017. 127 p. (in Russ.)

6. Ponomarenko V., Filachev A. Infrared technology and electronic optics. Formation of scientific directions. 1946–2016. Moscow: Fizmatkniga Publ., 2016. 448 p. (in Russ.)

7. Vavilov V.P. Infrared thermography and thermal control. Moscow: Publishing House

"Spektr", 2013. 544 p. (in Russ.)

8. Volf U., Tsisis G. (ed.) Handbook of infrared technology in 4 volumes. V. 4. Design of infrared systems: transl. from Engl. Moscow: Mir Publ., 1999. 472 p. (in Russ.)

9. Velichko A.P., Garipov V.K., Sleptsov V.V., Shishkov P.O. Remote monitoring systems for environmental parameters (atmosphere) based on IR-radiometry. The concept of design. Moscow: Mashinostroenie-1 Publ., 2007. (in Russ.)

10. Skvortsov L.A. Fundamentals of photothermal radiometry and laser thermography. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2017. 218 p. (in Russ.)

11. Schreiber G. Infrared radiation in electronics: transl. from French. Moscow: DML Press Publ., 2009. 240 p. (in Russ.)

12. Korotaev V.V., Melnikov G.S., Mikheev S.V., Samkov V.M., Soldatov J.I. Fundamentals of thermal imaging. Saint-Petersburg: NIU ITMO Publ., 2012. 122 p. (in Russ.)

Об авторе:

Величко Александр Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the author:

Alexander P. Velichko, Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the Chair "Devices and Information-Measuring Systems" of the Institute of Complex Security and Special Instrumentation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

Для цитирования: Величко А.П. Особенности калибровки ИК-радиометров, работающих в окне прозрачности атмосферы 8–14 мкм // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 6. С. 55–65. DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-55-65

For citation: Velichko A.P. Features of calibration of infrared radiometers working in window of transparency of the atmosphere 8–14 microns. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2018; 6(6): 55–65. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-55-65