

К обоснованию возможности прямого измерения радиационного притока тепла в атмосфере

А.А. Елисеев, Д.В. Румянцев, В.А. Фролькис*

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова
188685, Ленинградская обл., пос. Воейково, филиал ГГО НИЦДЗА

Поступила в редакцию 13.11.2008 г.

Для оценки возможности применения оптико-акустического прибора для измерения радиационного притока тепла (РПТ) на основе полинейных расчетов проведены численные эксперименты, имитирующие измерения идеальным (линейным) и реальным приборами. Величина погрешности реального прибора оценивается относительно идеального. Для этого рассчитывается длинноволновый РПТ в лучеприемниках различного размера с концентрациями водяного пара и углекислого газа и спектральным составом падающего излучения, характерными для приземного слоя атмосферы. Также рассматриваются некоторые гипотетические ситуации, позволяющие смоделировать широкий диапазон условий в приземном слое атмосферы и оценить зависимость от них погрешности измерения. Полинейный расчет поглощения выполнялся с использованием базы данных HITRAN.

Показано, как связаны между собой относительная погрешность, обусловленная нелинейностью поглощения, с размером лучеприемника и условиями измерения. В особенности эта связь важна, когда в точке измерения наблюдаются большие вертикальные градиенты температуры. При размере лучеприемника не более 2 см и при нормальных условиях в приземном слое атмосферы погрешность не превышает 10–20%. Расчет подтверждает допустимость использования оптико-акустических приборов для прямого измерения радиационного притока тепла в атмосфере.

Ключевые слова: полинейный расчет поглощенной радиации, радиационный приток тепла (РПТ), оптико-акустический приемник (спектрофон), радиационный баланс объема воздуха, парниковые газы.

Введение

Известно, что радиационный приток тепла (РПТ) — один из важнейших факторов, формирующих термический режим атмосферы, однако, несмотря на его важность, учет РПТ в моделях циркуляции атмосферы является источником значительных погрешностей. Это связано с тем, что РПТ обычно определяется косвенно, по разности потоков на границах исследуемого слоя. Такой подход обеспечивает необходимую точность только при больших толщинах исследуемого слоя, которые характерны при изучении свободной атмосферы. Однако при рассмотрении приземного слоя атмосферы (ПСА) для определения РПТ необходимо иметь более высокое пространственное разрешение. Так как в приземном слое приток тепла вычисляется по малой разности потоков на границах тонких слоев, то погрешность вычисления может многократно превосходить искомое значение притока. Заметим, что даже определение знака РПТ в этом случае является большой проблемой, поэтому предлагаемый метод прямого измерения наиболее эффективен именно в ПСА.

В этой связи неоднократно предпринимались попытки, например [1], осуществить прямое измерение РПТ прибором типа «черного шара» непосредственно в точке измерения.

Для точного измерения интегрального РПТ необходимо, чтобы чувствительный элемент прибора и окружающий его воздух имели подобные спектры поглощения, а прибор, обладающий такими свойствами, был бы идеальным. Как показано в ряде работ, например в [2, 3], у идеального приемника РПТ отношение спектральной функции поглощения A_v к объемному спектральному коэффициенту поглощения воздуха k_v должно быть постоянным во всем оптическом диапазоне, т.е. должно удовлетворять соотношению

$$A_v = \text{const } k_v, \quad (1)$$

где v — волновое число, см^{-1} ; const — константа приемника.

Следовательно, наилучшим рабочим телом может быть слой воздуха, для которого $A_v = 1 - \exp(-k_v h)$, где h — толщина чувствительного элемента прибора — лучеприемника, заполненного воздухом.

В работе [4] было показано, что приемник типа «черного шара», как правило, не удовлетворяет требованию (1). За исключением бесконечно малого

* Анатолий Алексеевич Елисеев (Oznet@peterlink.ru);
Дмитрий Владимирович Румянцев (DVR@B10.vniim.ru);
Виктор Абрамович Фролькис (VFrolkis@vf13868.spb.edu).

($h \rightarrow 0$) слоя воздуха, этому соотношению не удовлетворяет ни один из известных материалов [2]. Так как нельзя сконструировать приемник бесконечно малого размера, то нельзя создать идеальный приемник РПТ.

Тем не менее на основе оптико-акустического (ОА) метода, используя технические решения, применяемые при газоаналитических ОА-измерениях [5, 6], удалось создать селективный приемник (спектрофон) для измерения РПТ, достаточно близкий к идеальному. Для увеличения отношения сигнал-шум слой воздуха в лучеприемнике прибора, ограниченный окнами, увеличивается до нескольких сантиметров. С помощью рассматриваемого прибора выполнены прямые измерения в приземном слое атмосферы длинноволнового [7] и коротковолнового [8] РПТ.

Отдельный интерес вызывает возможность измерения РПТ, обусловленного содержанием какого-либо парникового газа, прежде всего углекислого газа.

Заметим, что спектрофон позволяет обнаружить минимальный уровень поглощенной радиации порядка 10^{-8} Вт при толщине слоя газа 1 см [6]. Такая величина поглощения заведомо меньше значений, с которыми приходится сталкиваться при метеорологических исследованиях РПТ [4]. Это позволяет использовать спектрофон во всем реальном диапазоне значений РПТ.

Несмотря на то что чувствительность спектрофона достаточно высока, его погрешность при измерении РПТ мало исследована, так как экспериментально определить некоторые существенные компоненты погрешности прибора достаточно сложно. Предлагаемое исследование посвящено проведению специальных расчетов для получения оценок погрешности прибора. На основании полинейных расчетов длинноволновой радиации сделаны оценки компонент погрешности, обусловленных различием в спектральной чувствительности идеального и реального приборов. Численные эксперименты проведены так, что они охватывают широкий диапазон возможных условий, характерных для ПСА. Это позволило оценить систематические компоненты погрешности прямого измерения длинноволнового РПТ рассматриваемым прибором.

Постановка задачи

Погрешность ОА-метода прямого измерения РПТ, а в некоторых условиях даже сама возможность его использования [2–4], зависят от того, насколько спектральное поглощение приемника и бесконечного тонкого слоя окружающего воздуха подобны во всем длинноволновом диапазоне, т.е. фактически определяются выполнением условия (1). Идеальным приемником РПТ может быть только прибор, лучеприемником которого является бесконечно тонкий слой воздуха, но поглощение такого слоя не может быть измерено. Для обеспечения необходимой чувствительности при измерении РПТ в современных ОА-приборах размер лучеприемника может достигать десятков сантиметров

[8], причем отклонение от линейности растет с увеличением толщины поглощающего слоя и приводит к нарушению условия (1). При таких размерах отклонение от линейности заметно вблизи центров сильных линий водяного пара и углекислого газа. Этот эффект особенно важен при сверхадиабатических и инверсионных стратификациях, характерных для ПСА, где спектральные интервалы с сильным поглощением в значительной степени определяют интегральный РПТ.

Так как предметом изучения является измерение интегрального РПТ, а условие подобия (1) выполняется только для монохроматического излучения, то оно должно быть заменено интегральным условием подобия, которое определяется исходя из следующего принципа [9]. Интегральные РПТ, измеренные идеальным приемником R_{ideal} и реальным прибором R_r , должны быть подобны в реальном диапазоне изменения температур и концентраций:

$$R_r \approx \eta R_{ideal}.$$

Это соотношение представим в виде

$$H^{-1} \int A_v (J_v - B_v(T)) dv = \eta \int k_v (J_v - B_v(T)) dv, \quad (2)$$

где H — толщина слоя воздуха в лучеприемнике; η — «постоянный» безразмерный множитель, введенный для того, чтобы сопоставить результаты измерений РПТ в одинаковых условиях реальным (левая часть) и идеальным (правая часть) приемниками; J_v и B_v — спектральная плотность монохроматического потока, падающего на приемник и излучаемого черным телом соответственно; T — температура приемника, равная температуре окружающего воздуха.

Очевидно, что чем меньше величина H , тем ближе поглощение в приемнике A_v к линейному поглощению и, следовательно, тем ближе величина η к единице. Соотношение (2) позволяет определить погрешность приемника, которая равна $100(\eta - 1)\%$ и существенно зависит от условий измерения и размера лучеприемника H .

При измерениях на различных высотах в приземном слое в условиях различной стратификации диапазон (в %) возможных значений РПТ более чем на порядок превышает диапазон изменения эффективного длинноволнового излучения при безоблачном небе [10, 11]. Так, например, величина интегрального объемного коэффициента поглощения, оцениваемая как отношение РПТ к эффективному излучению, может, согласно измерениям [12], увеличиваться в десятки раз при изменении стратификации от нейтральной до сильно неустойчивой (или сверхустойчивой). При нейтральной стратификации влияние на величину РПТ радиации, излучаемой близлежащими слоями, невелико, так как их температура близка к температуре в точке измерения. Когда на уровне измерений наблюдаются большие вертикальные градиенты температуры, РПТ в основном определяется поглощением излучения от близлежащих слоев. Это означает относительное увеличение влияния на РПТ излучения от

смежных слоев, т.е. излучения в спектральных интервалах сильного поглощения.

В результате полагаем, что условия в ПСА, от которых зависит амплитуда вариации значения η в (2), определяются, в основном, относительной ролью прилегающих и удаленных слоев атмосферы. Этот подход позволяет оценить погрешность существующего приемника, относительно идеального, по величине изменения η при изменении спектрального состава поглощаемой радиации.

Возможность использования селективного ОА-приемника для прямого измерения РПТ и оценка его погрешности были определены с помощью серии численных экспериментов на основе полинейных расчетов.

Так как нельзя рассчитать поглощение в идеальном приемнике (толщина лучеприемника $h \rightarrow 0$), то в расчетах использовалось некоторое приближение к идеальному приемнику, т.е. приемник с конечной, но малой толщиной h . Эта величина h определялась исходя из задаваемой 0,1% погрешности поглощения, рассчитываемой для идеального приемника:

$$\frac{A_v^{ideal} - A_v}{A_v} = \frac{k_v h - (1 - \exp(-k_v h))}{1 - \exp(-k_v h)} \leq 0,001,$$

где $A_v^{ideal} \cong k_v h$ – приближенное поглощение идеального приемника; $A_v = 1 - \exp(-k_v h)$ – спектральная функция поглощения; k_v – объемный коэффициент поглощения в центре ν сильной линии вращательной полосы водяного пара.

Задавая $k_v = 1 \text{ см}^{-1}$ [13], получаем, что при заданной погрешности толщина $h = 10^{-3}$ см. Это значение определяет вертикальный размер лучеприемника, который принимается как квазиидеальный приемник. Заметим, что здесь используется погрешность поглощения в 0,1%, обусловленная исключительно допускаемой нелинейностью квазиидеального приемника при заданном фактическом поглощении. Реальная погрешность поглощения (более 0,1%) практически не искажает селективность приемника.

Расчет η проводился в рамках специального численного эксперимента: излучение черного тела после прохождения трассы (слоя атмосферы) падает на реальный (толщиной H) и квазиидеальный (толщиной h) приемники, в которых содержатся, как и в атмосфере, поглощающие компоненты, и вычисляется РПТ в каждом приемнике.

Выражения РПТ, определяемые левой и правой частями (2), после замены интеграла конечной суммой вычислялись для каждого квазимонохроматического интервала i :

$$l^{-1} \sum_{i=1}^M \tau_i^{TP} (B_i(T_{изл}) - B_i(T_{пр})) \tau_i^{OK} (1 - \tau_i^{PP}),$$

где τ_i^{OK} , τ_i^{TP} , τ_i^{PP} – спектральные функции пропускания окна, трассы и лучеприемника спектрофона соответственно; B_i – спектральная плотность ква-

зимонохроматического потока, излучаемого черным телом при температуре излучателя $T_{изл}$ и приемника $T_{пр}$, причем температура приемника полагалась равной температуре воздуха на трассе; M – количество интервалов; $l = H$ для реального и $l = h$ для квазиидеального приемников.

Расчет спектральных характеристик поглощения выполнялся согласно [14]. Функции спектрального пропускания слоя воздуха в лучеприемнике и на трассе рассчитывались на основе следующих соотношений:

$$\tau_i^{PP} = \exp(-K_i \rho l), \quad \tau_i^{TP} = \exp(-K_i \rho L),$$

где L – протяженность трассы; K_i – спектральный массовый коэффициент поглощения; ρ – плотность поглощающего газа.

Величина K_i определялась суммированием по всем линиям, дающим вклад в поглощение в спектральном интервале i :

$$K_i = \sum_{j=1}^N K_{ij},$$

где K_{ij} – массовый коэффициент поглощения в спектральном интервале i , обусловленный вкладом j -й линии; N – количество рассматриваемых линий.

Величина K_{ij} находилась для лоренцевского контура

$$K_{ij} = S_j \alpha_j / \pi (\alpha_j^2 + (\nu_i - \nu_j)^2),$$

где S_j , α_j и ν_j – интенсивность, полуширина и волновое число центра j -й линии соответственно; ν_i – волновое число рассматриваемого i -го спектрального интервала.

Зависимость интенсивности S_j и полуширины α_j линии от температуры и давления принималась в виде

$$S_j = S_{j0} (T_0/T)^Q 1,442 E_j (T - T_0) / (T T_0),$$

$$\alpha_j = \alpha_{j0} (P/P_0) (T_0/T)^n,$$

где T , P – температура воздуха и атмосферное давление соответственно; S_{j0} и α_{j0} – интенсивность и полуширина j -й линии при температуре $T_0 = 296$ К, $P_0 = 1013$ гПа; E_j – энергия соответствующего нижнего уровня; Q – температурный коэффициент, $Q(\text{H}_2\text{O}) = 1,5$; $Q(\text{CO}_2) = 1,0$; $n(\text{H}_2\text{O}) = 0,62$; $n(\text{CO}_2) = 0,5$.

Далее, используя (2), находим η . Для того чтобы оценить уровень изменчивости η , варьировались значения H и рассматривались различные спектральные распределения падающего излучения. Изменение спектра падающего излучения достигалось путем изменения содержания поглощающих компонент на трассе, имеющей для упрощения расчета те же температуру и давление, что и приемник. Так как η определяется как отношение, то это упрощение практически не влияет на результаты расчетов.

Расчеты проводились для следующих условий: $T = 273$ К, $T_{изл} = 283$ К, $P = 1013$ гПа. Такая раз-

ность ($T_{\text{изл}} - T$) соответствует ситуации, характерной для ПСА, когда РПТ определяется близкорасположенными слоями. Относительная влажность воздуха на трассе и в приемнике 70% при $T = 293$ К, объемная концентрация CO_2 370 ppm. Значения содержания водяного пара и углекислого газа в слое l лучеприемника задавались от 0,001 до 100 атм·см. Оценки показывают, что при сильной устойчивой и неустойчивой стратификациях, часто наблюдаемых в ПСА, радиационный приток тепла в рассматриваемой точке определяется излучением слоя (трассы), длина которого, как правило, не превышает 100 м, поэтому протяженность трассы L варьировалась от 0 до 100 м.

Использовались характеристики всех спектральных линий пара H_2O и CO_2 , содержащихся в базе данных HITRAN-96 [13] для спектрального диапазона 100–5000 cm^{-1} . Шаг интегрирования по частоте был выбран по результатам численных экспериментов и составлял 0,01 cm^{-1} .

Принцип работы прибора

ОА-приемник для измерения РПТ схематически показан на рис. 1.

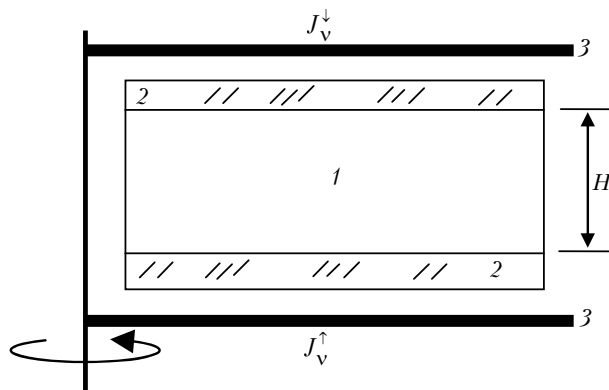


Рис. 1. Схема ОА-приемника для измерения радиационного притока тепла

Лучеприемник (рабочий объем) толщины H заполнен окружающим воздухом 1 и ограничен прозрачными для радиации окнами 2. Перед окнами расположены вращающиеся зачерненные заслонки (обтюраторы) 3, находящиеся при температуре окружающей среды T . Обтюраторы в течение половины периода открывают окна и пропускают в лучеприемник атмосферное излучение J_v^{\uparrow} и J_v^{\downarrow} , а в течение второй половины периода они закрывают окна и становятся источниками теплового излучения $2E_v(T)$, где $E_v(T)$ — излучение черного тела.

При вращении обтюраторов в лучеприемнике возникают периодические колебания температуры и давления воздуха, обусловленные поглощением падающего излучения. Колебания давления измеряются микрофоном. В результате определяется разность поглощенных потоков Δ , которая с точностью до константы приемника может быть выражена в виде

$$\Delta = \int_{\nu_1}^{\nu_2} A_\nu [(J_v^{\uparrow} + J_v^{\downarrow}) - 2E_v(T)] d\nu,$$

где ν_1, ν_2 — спектральный диапазон пропускания радиации окнами лучеприемника.

При соблюдении ряда условий (подобие спектрального поглощения, равенство температур обтюраторов и окружающего воздуха, отсутствие угловых искажений) величина Δ будет пропорциональна величине РПТ в точке нахождения приемника, т.е. $\Delta \sim \text{РПТ}$.

Результаты расчетов

Выполнены численные эксперименты по определению погрешности прямого измерения РПТ, обусловленной отличием спектрального поглощения реального приемника и приемника, задаваемого как квазиидеальный. Для оценки влияния нелинейности прибора на результаты измерений рассмотрено отношение η чувствительности реального и квазиидеального приемников РПТ в зависимости от толщины H лучеприемника (и как следствие, от содержания поглощающего газа) и от протяженности L трассы (влияющей на спектральный состав проходящего излучения). Результаты численных экспериментов для водяного пара и для углекислого газа приведены на рис. 2. Заметим, что для идеального приемника РПТ независимо от размера лучеприемника $\eta = 1$ при любом спектральном составе падающей радиации.

Из рис. 2, а видно, что при малых, не более 0,005 атм·см, значениях содержания водяного пара в лучеприемнике ($H < 1$ см) и при любой длине L трассы имеем $\eta \sim 1$. Это факт говорит о том, что при любом спектральном составе проходящей радиации реальный приемник можно считать квазиидеальным, даже когда излучение приходит от источника, расположенного вблизи ($L = 1$ см), например от подстилающей поверхности. При увеличении содержания водяного пара в лучеприемнике до величины, например, 0,05 атм·см (чему соответствует толщина слоя воздуха $H \sim 2,5$ см) значение η уменьшается приблизительно до 0,80 на малой трассе ($L = 1$ см), когда проходящая радиация близка к черной.

Такая ситуация является типичной в условиях ПСА при сильно неустойчивой и инверсионной стратификациях. Следовательно, когда приток тепла определяется сильным поглощением, нелинейность реального приемника становится заметной, что приводит к уменьшению его относительной чувствительности η . Такой размер лучеприемника можно считать максимальным для измерений в ПСА при умеренных значениях влажности. При дальнейшем увеличении толщины H лучеприемника величина η уменьшается многократно, что может вызвать погрешность, превышающую 100%. Вместе с тем, если падающее излучение имеет «разреженный» спектральный состав ($L > 100$ м), что характерно

для условий измерения выше приземного слоя, то в этом случае чувствительность приемника остается достаточно высокой и его можно считать квазиидеальным.

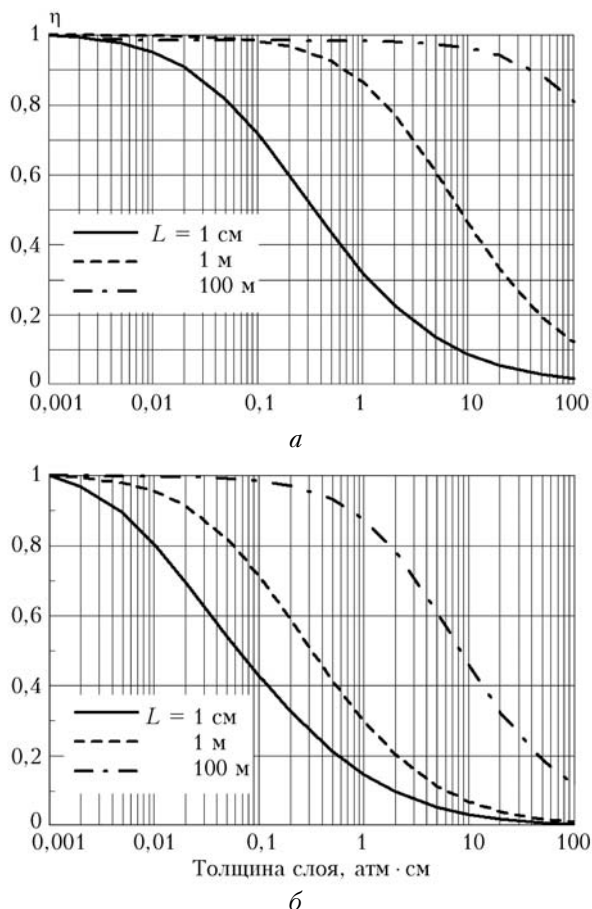


Рис. 2. Влияние нелинейности поглощения на уменьшение чувствительности приемника РПТ относительно идеального в зависимости от толщины слоя водяного пара (а) и углекислого газа (б) в лучеприемнике и от длины трассы (спектрального состава). На оси абсцисс указана толщина слоя поглощающего газа в лучеприемнике ($\text{атм} \cdot \text{см}$). На оси ординат приведены значения относительной чувствительности η приемника (в долях единицы). Сплошная, пунктирная и штрихпунктирная линии указывают расстояние L (длину трассы) от источника радиации до лучеприемника

Аналогично рассчитывалась относительная чувствительность η реального приемника при измерении РПТ, обусловленного поглощением углекислым газом. Численные эксперименты проводились в предположении, что лучеприемник заполнен смесью углекислого газа и азота (объемная концентрация CO_2 370 ppm, азот — уширяющий газ). Рис. 2, б показывает, что при содержании углекислого газа в лучеприемнике, не превышающем $0,002 \text{ атм} \cdot \text{см}$ ($H \leq 5 \text{ см}$), реальный приемник фактически является квазиидеальным ($\eta \sim 0,98$). Когда приходится измерение близко к черному ($L \leq 1 \text{ м}$), то дальнейшее увеличение толщины H лучеприемника будет существенно уменьшать η . Если приходиться ра-

диация имеет «разреженный» спектральный состав ($L > 100 \text{ м}$), то приемник остается квазиидеальным при содержании CO_2 даже до $0,1 \text{ атм} \cdot \text{см}$ ($H \leq 1 \text{ м}$). Таким образом, из-за того что атмосферная концентрация CO_2 существенно меньше, чем концентрация водяного пара, допустимый размер H лучеприемника РПТ для CO_2 может быть увеличен.

Численные эксперименты показали необходимость ограничения толщины H лучеприемника, которое наиболее важно вблизи подстилающей поверхности, а также при высоких значениях влажности воздуха.

При измерениях выше ПСА значения РПТ обычно во много раз меньше, в основном из-за резкого уменьшения влияния близлежащих слоев воздуха, находящихся при близких температурах. В этом случае для повышения чувствительности прибора размер лучеприемника может быть значительно увеличен. Это не вызовет увеличения погрешности приемника, обусловленной нелинейностью.

Была рассчитана оценка дополнительной погрешности, связанная с тем, что температуры излучателя и лучеприемника могут находиться при другой температуре, например на 30° ниже, но при сохранении разности между ними, например $T_{\text{изл}} - T = 10$. Для этого были выполнены полинейные расчеты с использованием соотношений (2) и (3). Вычислялись значения η при температурах $T_{\text{изл}} = 253 \text{ К}$ и $T = 243 \text{ К}$ и относительной влажности 70%. Как показали результаты, зависимость η от содержания водяного пара и углекислого газа изменилась незначительно. Заметим, что при понижении температуры концентрация водяного пара уменьшается и, следовательно, значение η (при тех же размерах лучеприемника) становится ближе к единице и погрешность прибора уменьшается.

Еще одна погрешность связана с тем, что при полевых измерениях температуры воздуха в лучеприемнике спектрофона и окружающего воздуха могут различаться (например, из-за перегрева приемника солнечной радиацией). При различии температур на 5 К изменение η составило, согласно расчету, около 2%, что пренебрежимо мало при измерениях РПТ.

Наличие многократных отражений от окон, а также диффузности приходящего излучения увеличивают, согласно оценкам, эффективную толщину слоя газа в лучеприемнике практически в 2 раза. При размере лучеприемника, не превышающем 2 см, увеличение толщины слоя приводит к незначительному уменьшению η (см. рис. 2 и 3) и соответствующему увеличению погрешности.

Был выполнен расчет амплитуды вариаций величины η , обусловленных селективностью пропускания окон лучеприемника. Соответствующая случайная погрешность (относительно лучеприемника с идеальным окном, пропускание которого равно единице) при использовании наиболее часто применяемых материалов [15] составила не более 6% для окна из германия, 3% для окна из иодиодистого таллия (KRS-5).

Заключение

Расчеты показывают возможность использования ОА-приемника для измерений РПТ в нижней тропосфере.

В условиях приземного слоя атмосферы погрешность реального ОА-приемника длинноволнового РПТ, вызванная уменьшением интегральной чувствительности за счет H_2O и CO_2 , может достигать 20% при увеличении размера лучеприемника до нескольких сантиметров.

Погрешность, определяемая нелинейностью, практически не увеличивается при изменении температуры среды и при перегреве приемника.

Селективность применяемых окон практически не вносит значительной погрешности.

Совершенствование конструкции ОА-приемника для измерений РПТ в ПСА должно происходить прежде всего путем уменьшения толщины слоя воздуха в лучеприемнике. Однако при измерениях выше ПСА погрешность за счет нелинейности значительно меньше, поэтому в этом случае можно увеличивать размер лучеприемника для увеличения его чувствительности.

Работа выполнена в Филиале Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова — центре дистанционного зондирования атмосферы (Филиал ГГО НИЦДЗА) при поддержке РФФИ (грант № 07-05-01110).

1. *Gergen J.L.* Black ball observations and the radiation chart // *J. Meteorol.* 1958. V. 15. N 4. P. 350–368.
2. *Funk J.P.* Behaviour of freely exposed absorbers in radiation fields // *J. Opt. Soc. Amer.* 1960. V. 50. N 10. P. 986–991.
3. *Костяной Г.Н.* О связи радиационной температуры радиационно непрозрачного тела с радиационным изменением температуры среды // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана.* 1966. Т. 2. № 5. С. 501–507.
4. *Кондратьев К.Я.* О возможности прямых измерений лучистого притока тепла // *Проблемы физики атмосферы.* Сб. 1. Л.: Изд-во ЛГУ, 1963. С. 3–16.

5. *Жаров В.П., Летохов В.С.* Лазерная оптико-акустическая спектроскопия. М.: Наука, 1984. 317 с.
6. *Макушкин Ю.С.* (отв. ред.). Оптико-акустический метод в лазерной спектроскопии атмосферных газов. Новосибирск: Наука, 1984. 128 с.
7. *Елисейев А.А.* Оптико-акустический метод прямого измерения радиационного притока тепла в атмосфере // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана.* 1977. Т. 13. № 10. С. 1018–1024.
8. *Foot J.S.* Spectrophone measurements of the absorption of solar radiation by aerosol // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1979. V.105. N 443. P. 275–283.
9. *Eliseyev A.A., Rumyantsev D.V.* An actual and an ideal radiation heat flux divergence detectors, a line-by-line calculation of longwave radiation absorption in measurements by spectrophone // *Current problems in atmospheric radiation: Int. Sympos. Abstracts.* St.-Petersburg: St.-Petersburg State University, 2000. P. 232.
10. *Каждан Р.М., Шехтер Ф.Н.* Некоторые результаты расчета радиационного изменения температуры в пограничном слое атмосферы // *Тр. ГГО им. А.И. Воейкова.* 1962. Вып. 127. С. 26–34.
11. *Кондратьев К.Я.* Актинометрия. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 690 с.
12. *Елисейев А.А., Привалов В.И., Парамонова Н.Н., Утина З.М.* Экспериментальное исследование притоков тепла в приземном слое атмосферы // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2002. Т. 38. № 5. С. 649–657.
13. *Rothman L.S., Rinsland C.P., Goldman A., Massie S.T., Edwards D.P., Flaud J.-M., Perrin A., Camy-Peyret C., Dana V., Mandin J.-Y., Schroeder J., Mcann A., Gamache R.R., Wattson R.B., Yoshino K., Chance K.V., Jucks K.W., Brown L.R., Nemtchinov V., Varanasi P.* The HITRAN molecular spectroscopic database and hawks (HITRAN atmospheric workstation): 1996 edition // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 1998. V. 60. N 5. P. 665–710.
14. *Фролов А.Д., Шашков А.А.* О применении прямого расчета поглощения ИК-радиации к задаче определения общего содержания CO_2 в вертикальном столбе атмосферы // *Тр. ГГО им. А.И. Воейкова.* 1976. Вып. 369. С. 41–47.
15. *Воронкова Е.М., Гречушников Б.Н., Дистлер Г.И., Петров И.П.* Оптические материалы для инфракрасной техники. М.: Наука, 1965. 180 с.

A.A. Eliseyev, D.V. Rumyantsev, V.A. Frolkis. To verification of possible direct measurement of radiative flux in the atmosphere.

The numerical experiments carried out by means of line-by-line calculations for verification of direct measurement radiative flux divergence capability in the atmosphere. These calculations are imitations RFD measurements by means of ideal and real devices. The real device error evaluates relative to ideal one. The longwave RFD is calculates for different size beamreceivers. The water vapour and carbon dioxide concentrations, as well as incoming radiation spectral distribution have been typical for atmosphere surface layer. Some hypothetic situations are considered, what permits to imitate wide diapason of surface layer conditions and to evaluate proper measurement errors. The HITRAN database was used in line-by-line calculations.

The relation between error, result from nonlinearity, beamreceiver size and measurements conditions are shown. This relation is significant especially under conditions, where are large temperature gradients near measurement point. The error does not exceed 10–20% under normal conditions in the surface layer, if beam-receiver size does not exceed 2 cm. The calculations confirm the capability OA devices to measure directly RFD in atmosphere.