

# **Калибровка радиометрического приемника в натурных условиях методом опорного «холодного» источника**

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8).



**Сazonov D.S. .N. Sадovskiy, E.V. Paшинов, A.B. Кузьмин**  
Институт космических исследований (ИКИ РАН)

e-mail: [sazonov\\_33m7@mail.ru](mailto:sazonov_33m7@mail.ru)

## АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Одним из направлений работы сотрудников отдела Исследований Земли из космоса Института космических исследований (ИКИ РАН) является постановка натурных экспериментов по исследованию взаимодействия морской поверхности и атмосферы посредством регистрации собственного микроволнового излучения, формируемого в этой системе.

В экспериментах используются микроволновые радиометры с рабочими длинами волн от 3 до 80 мм, включая два радиометра-поляриметра 8-мм диапазона. Радиометры не имеют системы внутренней калибровки, соответственно, изменение их показаний при смене условий работы (в первую очередь, температурный дрейф параметров) должно быть скомпенсировано в ходе часто реализуемой операции внешней калибровки.

Традиционно применяемый в «полевых условиях» метод калибровки основан на использовании исходящего излучения атмосферы (наклонная, или *tipping* калибровка).

В работе рассмотрен новый метод наклонной калибровки на основе поиска опорного «холодного» источника радиоизлучения. Его преимущества заключаются в многократном снижении необходимой вычислительной мощности, что обеспечивает возможность оценки калибровочной шкалы в on-line режиме.

## ИСПОЛЬЗУЕМАЯ МОДЕЛЬ АТМОСФЕРЫ

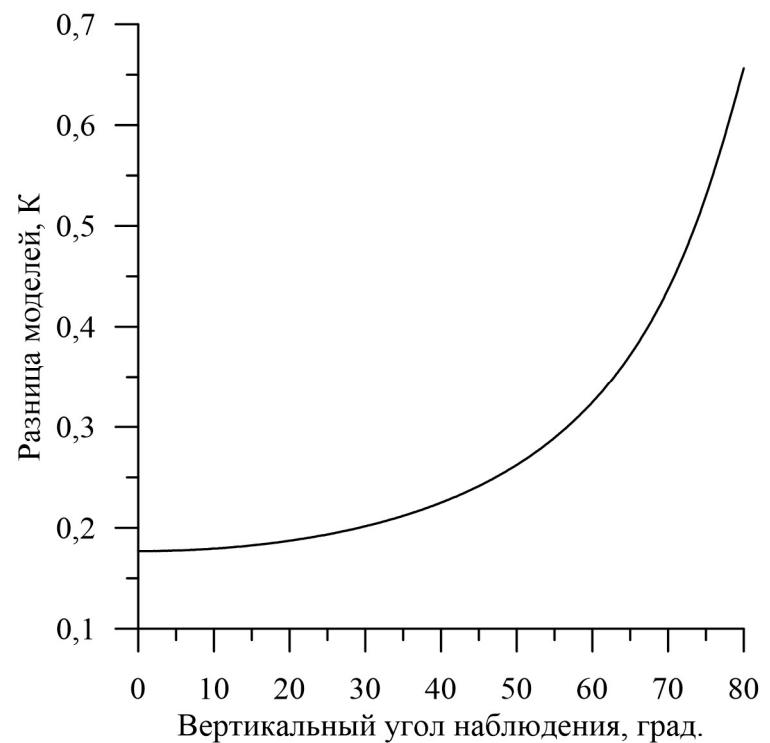
Для решения задачи калибровки радиометрических приемников обычно применяется упрощенная модель однородной плоской атмосферы, в которой исходящее излучение атмосферы является функцией трех параметров: некоторой эффективной температуры атмосферы, ее интегральным поглощением (на выделенной частоте) и угла зондирования  $\theta$ :

$$T_{\text{я.атм}}(\theta) = T_{\mathcal{E}\Phi} \left(1 - \exp(-\tau/\cos \theta)\right) + T_{XK} \cdot \exp(-\tau/\cos \theta)$$

где:  $T_{\mathcal{E}\Phi}$  – эффективная температура атмосферы в Кельвинах  $T_{\mathcal{E}\Phi} = (T_0 - 10) + 273,15$ .  $T_0$  – термодинамическая температура приземного слоя атмосферы в градусах Цельсия;  $\tau$  – интегральное поглощение атмосферы на выделенной частоте;  $T_{XK}$  – яркостная температура излучения холодного космоса, равная 2,73К.

## ИСПОЛЬЗУЕМАЯ МОДЕЛЬ АТМОСФЕРЫ

Результаты анализа показывают, что расчеты радиоизлучения атмосферы, выполненные по представленной выше модели однородной плоской атмосферы сходятся с данными моделирования, проведенными в соответствии с (Rosenkranz, 1998) (при использовании в последней усредненных профилей температуры и влажности). Как показано на рисунке, разница в оценках излучения атмосферы на частоте 36 ГГц в диапазоне углов  $0 - 80^\circ$  не превышает 0,7 К, что для задачи калибровки радиометра является приемлемым.



Rosenkranz P.W. Water vapor microwave continuum absorption: A comparison of measurements and models // Radio Sci. 1998. N. 33(4). P. 919 – 928.

## АЛГОРИТМ ПОИСКА «ХОЛОДНОЙ» ТОЧКИ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ

В уравнении для атмосферы интегральное поглощение  $\tau$  также называют оптической толщиной атмосферы при распространении луча вертикально. Она связана с высотой  $z$  соотношением:

Если атмосфера однородна, то  $\gamma(h) = const$ , а  $\tau$  меняется прямо пропорционально толщине слоя атмосферы. Таким образом, если точку наблюдения поднимать над поверхностью вплоть до верхней границы атмосферы ( $H_{min} \rightarrow H_{max}$ ), то оптическая толщина  $\tau$  будет линейно стремиться к нулю.

При наклонном зондировании атмосферы с поверхности Земли (под углом  $\theta$  к зениту), оптическая толщина возрастает с коэффициентом  $1/\cos(\theta)$  по отношению к ее значению для вертикального луча:

Указанная формула обладает достаточной точностью для значений  $\theta$  менее  $75^\circ$  (угол зондирования атмосферы отсчитывается от зенита), при которых коэффициент  $1/\cos(\theta)$  не превышает значение 4. При больших углах уже необходимо учитывать кривизну Земли.

$$\tau = \int_{H_{min}}^{H_{max}} \gamma(h) dh$$

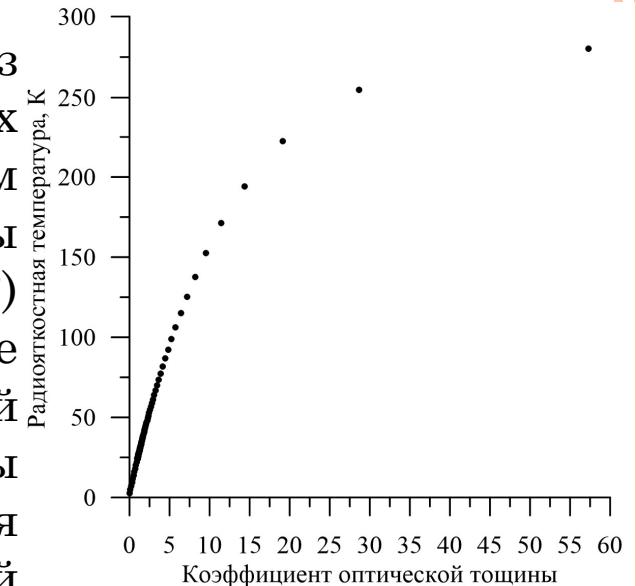
$$\tau_{sl} = \frac{1}{\cos(\theta)} \int_{H_{min}}^{H_{max}} \gamma(h) dh = \frac{1}{\cos(\theta)} \cdot \tau$$

## АЛГОРИТМ ПОИСКА «ХОЛОДНОЙ» ТОЧКИ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ

Вводим понятие коэффициента оптической толщины  $K$ . Определим его как отношение действующего значения оптической толщины, определяемого конкретной геометрией эксперимента, к некоторому «базовому» значению интегрального поглощения атмосферы  $\tau_0$ :

$$K(H_{\min}, \theta) = \frac{1}{\cos(\theta)} \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} \gamma(h) dh \Bigg/ \int_0^{H_{\max}} \gamma(h) dh$$

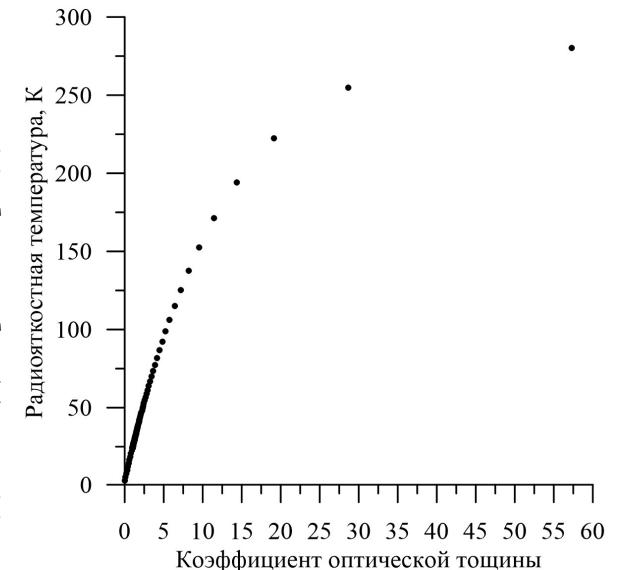
Проведем мысленный эксперимент, состоящий из двух этапов, и основанный на вышеуказанных соотношениях. На первом этапе мы уменьшаем вертикальный угол зондирования атмосферы от некоторого начального значения (пусть  $75^\circ$ ) до нуля (в зенит). Регистрируемые (рассчитываемые в соответствии с выбранной моделью) на этом этапе яркостные температуры (равно как и коды АЦП) будут являться линейной функцией коэффициента оптической толщины, который в данном случае оказывается равным  $1/\cos(\theta)$  (на рисунке участок функции для области определения  $K \geq 1$ ).



## АЛГОРИТМ ПОИСКА «ХОЛОДНОЙ» ТОЧКИ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ

На втором этапе, сохраняя ориентацию радиометра в зенит, мы начинаем поднимать прибор над поверхностью земли (увеличивать  $\theta$ ) вплоть до верхней границы атмосферы. В этой ситуации угловые составляющие исчезают ( $1/\cos(\theta) = 1$ ), а уменьшение слоя атмосферы, в котором формируется излучение, также будет приводить к линейной форме зависимости яркости от коэффициента оптической толщины (на рисунке участок функции для области определения  $0 \leq K < 1$ )).

Достигнув верхнего слоя атмосферы, оптическая толщина становится равна нулю, а экспонента в формуле для яркостной температуры атмосферы становится равна единице. Измеряемая яркостная температура  $T_{\text{Я.АТМ}}$ , в свою очередь, должна стать равной температуре космического излучения  $T_{XK}$ . Как следствие – имеется возможность получить «виртуальную» калибровочную «холодную» точку с известной температурой излучения (недостижимой в обычных условиях на Земле) и соответствующим ей откликом радиометра (коды АЦП).



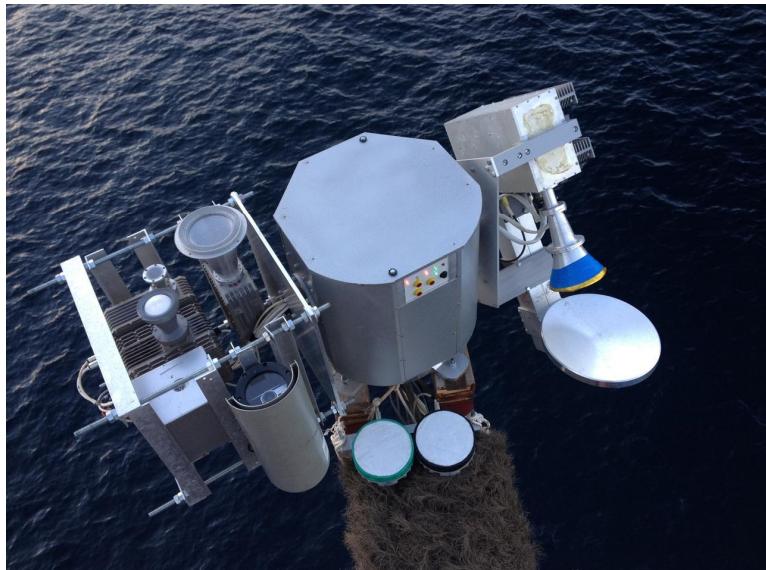
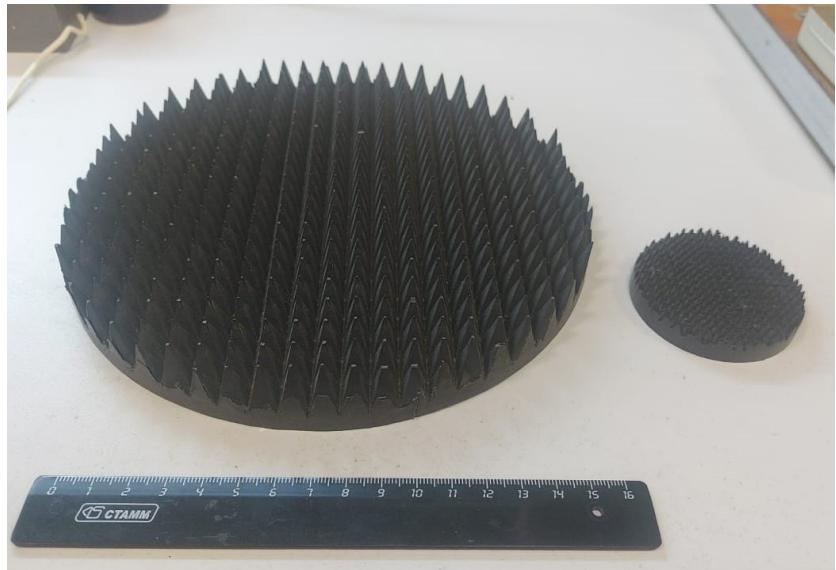
# ЗАМЕЧАНИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МЕТОДА «ХОЛОДНОЙ» ТОЧКИ

Следует отметить несколько важных моментов.

1. Область значений получаемой функции яркости/кодов АЦП обоих этапов описанного эксперимента представляет собой две части одной и той же прямой. Соответственно, определив экспериментально параметры прямой на одном из них – можно распространить их и на второй участок.
2. Динейность сохраняется в достаточно широком диапазоне параметров атмосферы ( $t$  и  $T_{\text{ЭФ}}$ ) и углов наблюдения  $\theta$ .
3. При выходе за пределы допустимости самой модели атмосферы (к которым относятся:  $K < 4$ , горизонтальная однородность, общая малость  $t$  на выделенной длине волны излучения), а также сильная вертикальная неоднородность  $\gamma$ , будут приводить к возникновению существенной нелинейности зависимости  $T_{\text{Я.АТМ}}(K)$  и, как следствие, нарушать логику приведенных рассуждений.
4. Вариации модельных параметров атмосферы (в уже оговоренных пределах) изменяют лишь наклон получаемой прямой, не затрагивая расположение «холодной» точки.

## КАЛИБРОВКА РАДИОМЕТРА В ХОДЕ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

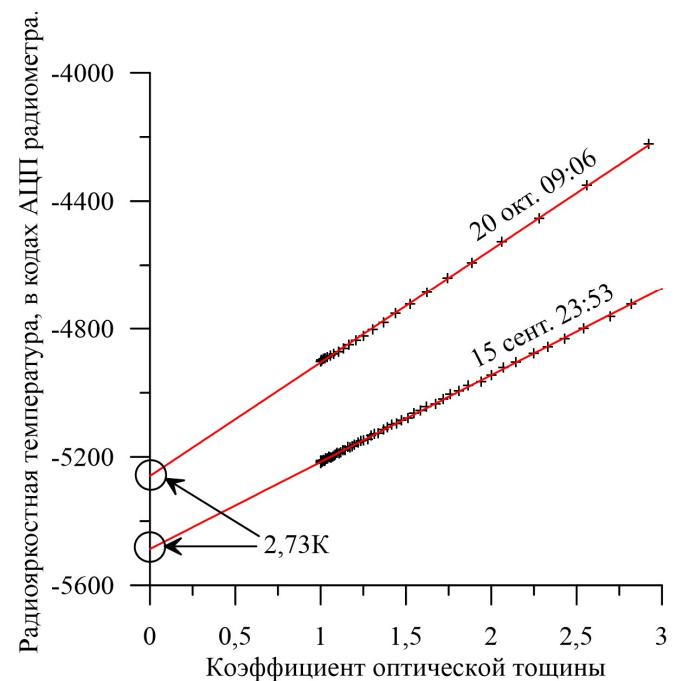
В качестве «горячих» эталонов в натурных экспериментах используются термостабилизированные согласованные нагрузки с температурами 323,0 и 286,5 К, и оптимизированных на длину волны 8 мм.



Внешний вид модельных АЧТ, выполненных в виде набора графитовых пирамидальных элементов, используемых для калибровки радиометрических приемников (слева). Справа представлена автоматическая сканирующая платформа «Траверс-2» в момент проведения калибровочных измерений. Два белых круга в нижней части изображения – термоизоляционные защитные крышки экспедиционных АЧТ.

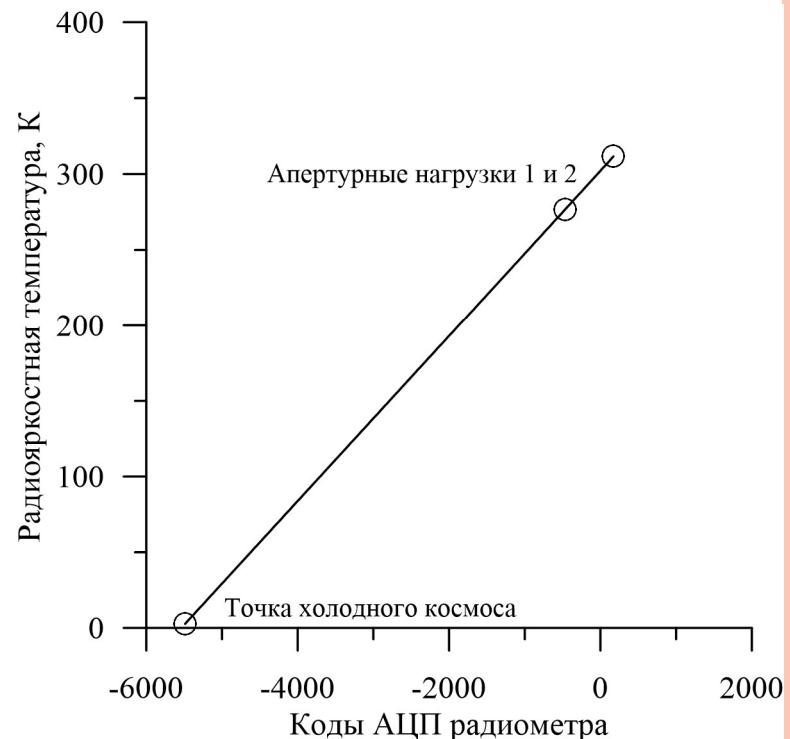
## КАЛИБРОВКА РАДИОМЕТРА В ХОДЕ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В натурном эксперименте измерения проводятся с высоты уровня моря, поэтому минимальный коэффициент оптической толщины, при котором проводятся измерения, будет составлять единицу (измерения в зенит). По предлагаемому методу можно измеренные значения кодов АЦП радиометра (черные крестики на рисунке) экстраполировать в область нулевого значения коэффициента оптической толщины. Место пересечения рассматриваемой прямой с осью ординат даст значение кодов АЦП, которое могло бы быть измерено при отсутствии атмосферы и наблюдении излучения холодного космоса. Таким образом, найденное значение кодов АЦП будет соответствовать радиояркостной температуре в 2,73К, что и является искомой «холодной» точкой для калибровки радиометра. На рисунке приведены два случая выполнения калибровки, один в начале эксперимента и один - в конце. За время измерений (более) месяца, коэффициент усиления радиометра изменился, что и привело к разному уровню наклона калибровочной прямой.

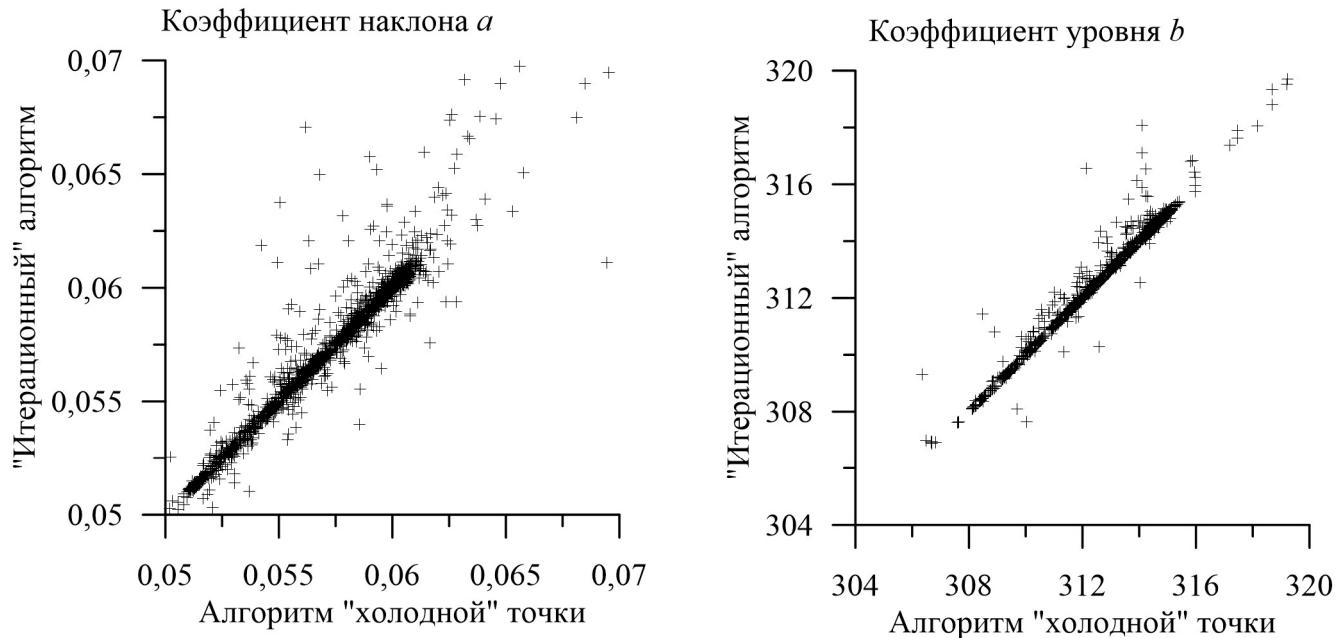


## КАЛИБРОВКА РАДИОМЕТРА В ХОДЕ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты «калибровочных» измерений двух «горячих» нагрузок и «холодной» точки (в виде трех пар координат (яркостная температура; коды АЦП)) наносятся на координатную плоскость. После этого подбирается их оптимальная линейная аппроксимация, являющаяся искомой калибровочной шкалой радиометра. Использование двух «горячих» калибровочных эталонов вместо одного позволяет уменьшить ошибки калибровки, вызванные случайными отклонениями регистрируемых для них значений кодов АЦП, а также возможным запаздыванием реакции их термостабилизирующих элементов на изменяющиеся внешние условия. Помимо этого, при использовании трех опорных точек имеется возможность оценки качества подбора калибровочных коэффициентов через расчет среднеквадратичного отклонения измеренных и подобранных значений.



## СРАВНЕНИЕ С КЛАССИЧЕСКИМ «ИТЕРАЦИОННЫМ» МЕТОДОМ КАЛИБРОВКИ



Сравнение результатов работы двух вариантов реализации метода наклонной калибровки в виде диаграмм разброса соответствующих параметров. Коэффициент корреляции составляет практически 1, следовательно, калибровка по «холодному» эталону идентична «итерационному» варианту наклонной калибровки. Имеющийся разброс точек появляется в результате применения разных алгоритмов в режиме автоматической обработки данных, в которые входят и данные полученные при дождевых условиях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- В докладе описан метод поиска «холодной» точки для проведения внешней калибровки радиометрических приемников.
- Представленные результаты свидетельствуют о возможности нахождения опорного «холодного» эталона с интенсивностью излучения, недостижимого в земных условиях. Показано, как теоретически, так и на основе экспериментальных данных, что при любых сочетаниях физической температуры приземного слоя атмосферы и величины ее интегрального поглощения, прямые линии зависимости интенсивности излучения атмосферы от коэффициента оптической толщины сходятся в одной точке (при  $K = 0$ ). Соответственно, вариант калибровки по «холодному» эталону не требует априорного знания этих величин.
- Ограничения подхода логично вытекают из пределов применимости самой модели плоской однородной атмосферы: значения коэффициента оптической толщины  $K < 4$ , горизонтальная однородность, общая малость  $t$  на выделенной длине волны излучения, вертикальная однородность распределения погонного поглощения.
- Сравнение результатов работы двух вариантов реализации метода наклонной калибровки, показывает практически полное совпадение их результатов. При этом вариант поиска «холодной» точки позволяет многократно снизить вычислительные затраты, что обеспечивает возможность оценки калибровочной шкалы в on-line режиме.

# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ



14