

УДК 551.510.5

## ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ РАТОСФЕРЫ<sup>1</sup>

© 2022 г. Е. Н. Кадыгров<sup>а, \*</sup>, А. К. Князев<sup>а</sup>, А. Н. Шапошников<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Центральная аэрологическая обсерватория,  
ул. Первомайская, 3, г. Долгопрудный, Московская область, 141700 Россия

\*e-mail: enkadygrov@gmail.com

Поступила в редакцию 12.01.2021 г.

После доработки 01.02.2022 г.

Принята к публикации 09.02.2022 г.

Рассматриваются особенности использования метода микроволновой радиометрии для зондирования термической стратификации высоких слоев атмосферы—стратосферы и нижней мезосферы по сравнению с другими высотными слоями — тропосферой и атмосферным пограничным слоем. Такими особенностями являются специальный выбор спектральных каналов, полос пропускания, использование в спутниковых приборах наряду с надирной также и лимбовой геометрии измерений, а также учет влияния эффекта Зеемана. Даются характеристики спутниковых микроволновых зондировщиков первого поколения, обеспечивающих измерение профилей температуры до высоты 30 км, а также более современных наземных и спутниковых приборов, высота зондирования которых достигает 50 км при надирной геометрии измерений и 100 км при лимбовой. Приводятся полученные авторами результаты в экспериментах с высотными аэростатами и на экспериментальных установках для измерения коэффициента поглощения молекулярного кислорода на частотах вблизи 60 ГГц. Анализируются также возможности наземных приборов для микроволнового зондирования температуры стратосферы и результаты комплексных сравнений.

**Ключевые слова:** стратосфера, мезосфера, термическая стратификация, метод микроволновой радиометрии

**DOI:** 10.31857/S0002351522030075

### ВВЕДЕНИЕ

Термическая стратификация является ключевым параметром для описания целого ряда процессов, происходящих в стратосфере: термический режим, циркуляция, волны, стратосферные потепления, анализ температурно зависимых характеристик фотохимических процессов, протекающих в озоновом слое стратосферы, оценка воздействия извержения вулканов на климат нашей планеты [1, 2]. Не случайно наиболее распространенной является стратификация атмосферы по особенностям термического режима: тропосфера (0–16 км), стратосфера (16–55 км), мезосфера (55–85 км), термосфера (85–400 км), экзосфера (выше 400 км). Традиционно термическая стратификация нижней стратосферы измерялась с помощью радиозондов (максимальная высота подъема — 30–40 км), а верхней страто-

сферы и мезосферы — с помощью метеорологических ракет (максимальная высота подъема 100 км) [1]. Однако количество выпускаемых в нашей стране радиозондов в последние годы резко сократилась, а метеорокеты уже 5 лет как перестали использоваться. Это дало толчок развитию дистанционных методов мониторинга термической стратификации стратосферы с использованием измерений в оптическом (лидары), инфракрасном (ИК радиометры) и радио (микроволновые радиометры) диапазонах волн [3, 4]. В радиодиапазоне используются два основных метода измерений термической стратификации атмосферы—микроволновая радиометрия и радиозатменный метод. В радиозатменном методе восстановление термической стратификации атмосферы возможно по измерениям фазы и амплитуды радиосигналов, излучаемых высокостабильным передатчиком, расположенном на одном спутнике, и принимаемом приемником, расположенном на другом спутнике [5]. В методе микроволновой радиометрии имеются специфические требования к зондированию термической стратификации раз-

<sup>1</sup> Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на Всероссийской конференции “Собственное излучение, структура и динамика средней и верхней атмосферы” (Москва, 22–23 ноября 2021 г.).

личных слоев атмосферы [4, 6, 7]. Так, в наземных приборах для измерения профилей температуры атмосферного пограничного слоя используются в основном одноканальные приборы со сканированием по углу места [3, 8]. При этом можно использовать широкую полосу пропускания – до 2 ГГц и частоту вблизи центра поглощения молекулярного кислорода (60 ГГц) [7–10]. В тропосфере в основном используются многоканальные микроволновые радиометры, т.к. необходимо учитывать излучение водяного пара и жидкой воды в облаках [3, 4, 11, 12]. Данная статья посвящена особенностям построения наземных и спутниковых микроволновых радиометров для измерения профилей температуры стратосферы и нижней мезосферы по сравнению с приборами для других высотных слоев атмосферы (тропосферы, атмосферного пограничного слоя) [3, 6, 13–15]. Такими особенностями являются специальный выбор спектральных каналов, полос пропускания и учет влияния эффекта Зеемана, использование предложенной нами так называемой “свертки” линий, что обеспечивает измерение профилей температуры от тропопаузы до стратопаузы. Влияет на высотный диапазон измерений и точность измерения или расчета коэффициента поглощения молекулярного кислорода на спектральных линиях вблизи частоты ГГц (длина волны 5 мм) [16–18]. Приводится краткая история эволюции микроволновых приборов с точки зрения повышения высоты зондирования до стратосферы и мезосферы.

#### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СТРАТОСФЕРЫ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТА ЗЕЕМАНА

Под микроволновым (или СВЧ) диапазоном понимают диапазон радиоволн в диапазоне от 3 до 300 ГГц, или длин волн от 100 до 1 мм или 10 до  $0.1 \text{ см}^{-1}$ . Приборы, измеряющие это излучение, называются микроволновыми радиометрами или СВЧ радиометрами [4, 19]. Возможность измерения профилей температуры атмосферы радиофизическими методами основана на особенностях распространения радиоволн миллиметрового и сантиметрового диапазонов в атмосфере Земли. Методы, позволяющие использовать эти особенности, получили название пассивной радиолокации, или радиотеплолокации, или микроволновой радиометрии, или СВЧ радиометрии, или радиотепловидение [3, 4]. Особенностью микроволнового излучения земной атмосферы является чувствительность его характеристик к большому числу физико-химических параметров – температуре, влажности, водности облаков, давлению, газовому составу, параметрам турбулентности [4]. По сравнению с видимым и ИК-диапазоном в зада-

чах дистанционного зондирования термической стратификации атмосферы микроволновый метод обладает рядом преимуществ: имеется возможность осуществлять зондирование и при наличии облачности; практически отсутствует влияние аэрозоля; зондирование можно осуществлять как ночью, так и днем. Хотя интенсивность излучения атмосферы в микроволновом диапазоне в  $10^5$  раз ниже, чем в ИК, но микроволновая аппаратура обладает гораздо более высоким спектральным разрешением (примерно в 5000 раз) [4]. Зондирование основано на приеме излучения молекулярного кислорода, имеющего высокую концентрацию в атмосфере (21%) и наиболее высокую стабильность процентного отношения  $O_2$  вплоть до верхней границы мезосферы. Впервые такая возможность была обоснована в [6]. Поглощение молекулярным кислородом в микроволновом диапазоне проявляется в виде отдельных линий или полос простой структуры, поэтому расчет функций поглощения получается более простым, чем в ИК-диапазоне. Молекула кислорода не обладает электрическим дипольным моментом (в отличие от молекулы водяного пара), но имеет постоянный магнитный момент. Изменение ориентации электронного спина молекулы  $O_2$  по отношению к вектору момента вращения молекулы образует ряд спектральных линий (48) в районе частоты 60 ГГц (длина волны 5 мм) и одиночную линию на частоте 118.7505 ГГц (2.53 мм) [3, 6]. Наличие такого большого количества спектральных линий позволяет подобрать наиболее оптимальные частоты для измерений термической стратификации стратосферы. Выбрав соответствующие частоты измерения микроволновой радиации, можно измерять интенсивность излучения, генерируемого различными слоями атмосферы. К сожалению, нет прямой связи между излучением и температурой на какой-то фиксированной высоте, т.к. для данной частоты излучение генерируется в достаточно протяженном слое атмосферы. В связи с этим дистанционные методы уступают контактному (радиозонд, метеорокета) в вертикальном разрешении. Чем более высокие слои надо измерять, тем уже должны быть полосы пропускания соответствующих каналов радиометра [6]. Так, в микроволновых профиломерах для измерения профилей температуры атмосферного пограничного слоя используются сканирующие по углу места одноканальные микроволновые радиометры с полосой пропускания до единиц ГГц, для зондирования термической стратификации тропосферы используются многоканальные радиометры с полосой пропускания в сотни МГц, а для стратосферы – единицы МГц и даже меньше [3]. Важным параметром для повышения высоты зондирования до стратосферных высот является также точность расчета коэффициента поглощения  $O_2$  для соответствующих частот [3, 6]. В отли-

чие от ИК-диапазона, в радиодиапазоне можно при расчете излучения использовать не формулу Планка, а ее длинноволновое приближение (формулу Рэлея-Джинса), что упрощает расчеты [4]:

$$I(\nu, T) = 2kT \left( \frac{\nu}{c} \right)^2, \quad (1)$$

где  $I(\nu, T)$  – интенсивность излучения,  $\nu$  – частота излучения,  $T$  – термодинамическая температура;  $k$  – постоянная Больцмана ( $k = 1.38066 \times 10^{-23}$  Дж/К);  $c$  – скорость света.

Следовательно, интенсивность излучения абсолютно черного тела в микроволновом диапазоне прямо пропорциональна температуре. При этом вводится понятие радиояркой (радиационной) температуры  $T_{я}$ , определяемой как температура такого абсолютного черного тела, интенсивность излучения которого равна  $I$  на частоте  $\nu$  [4]. В основе расчетов, используемых при обработке данных, лежит известное уравнение переноса микроволнового излучения в атмосфере, из которого получают уравнения для радиоярких температур, измеряемых как с поверхности Земли так и со спутников [4]. Обычно выделяют так называемые прямую и обратную задачи [3, 4]. Вычисление интенсивности излучения или других количественных характеристик поля излучения по заданным функциям поглощения и известным распределениям параметров состояния атмосферы называют прямой задачей. Под обратной задачей понимают цикл задач, состоящих в определении по заданным характеристикам поглощения атмосферных газов и измеренным характеристикам излучения распределений метеорологических параметров атмосферы, например температуры [18].

Уравнение для радиояркой температуры в случае измерения нисходящего микроволнового излучения молекулярного кислорода атмосферы (с поверхности Земли) можно записать в виде [4]:

$$T_{я} = \frac{1}{\cos \theta} \int_0^{\infty} T(h) \gamma_{\nu}(h) \times \exp \left( - \frac{1}{\cos \theta} \int_0^h \gamma_{\nu}(h') dh' \right) dh + T_{\phi} \exp \left( - \frac{\tau_0}{\cos \theta} \right), \quad (2)$$

где  $\gamma(h)$  – коэффициент поглощения на соответствующей частоте,  $h$  – высота,  $\theta$  – угол отклонения от надира,  $T(h)$  – искомый профиль термодинамической температуры,  $T_{\phi}$  – температура реликтового излучения космоса (2.7 К). В случае измерения восходящего излучения стратосферы со спутника выражение имеет вид [4, 6]:

$$T_{я}(\nu, \theta) = \varepsilon T_p \exp \left( - \frac{2\tau_0}{\cos \theta} \right) + (1 - \varepsilon) T_{\Pi} \exp \left( - \frac{\tau_0}{\cos \theta} \right) + \left[ \varepsilon \exp \left( - \frac{\tau_0}{\cos \theta} \right) \right] \times \frac{1}{\cos \theta} \int_0^{\infty} T(h) \gamma(h) \exp \left[ - \frac{1}{\cos \theta} \int_0^h \gamma(h') dh' \right] dh + \frac{1}{\cos \theta} \int_0^{\infty} T(h) \gamma(h) \exp \left[ - \frac{1}{\cos \theta} \int_h^{\infty} \gamma(h') dh' \right] dh, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – излучательная способность поверхности;  $T_{\Pi}$  – температура поверхности;  $\tau_0 = \int_0^{\infty} \gamma(h) dh$  – оптическая толщина атмосферы,  $\varepsilon T_p$  – отраженное от Земли излучение

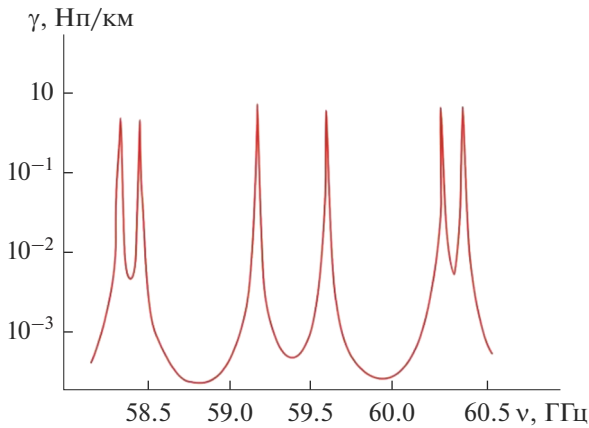
Первые три члена этого уравнения весьма незначительны [4]. Четвертый член уравнения (3) характеризует восходящее излучение атмосферы, которое и будет регистрироваться спутниковым прибором. Следовательно, с минимальными допущениями для измерения со спутника уравнение (3) можно записать в виде: [3, 4, 6]:

$$T_{я}(\nu, \theta) = \frac{1}{\cos \theta} \times \int_0^{\infty} T(h) \gamma(h) \left[ \exp \left( - \frac{1}{\cos \theta} \int_h^{\infty} \gamma(h') dh' \right) \right] dh. \quad (4)$$

Микроволновый радиометр реально измеряет не радиояркую, а так называемую антенную температуру, которая измеряется в единицах напряжения [19]. Радиояркая температура в градусах Кельвина получается за счет калибровки. В упрощенном объяснении – в случае измерения термической стратификации стратосферы со спутника антенна радиометра наводится в открытый космос (“холодная” точка, 2.7 К), и на микроволновую мишень (“горячая точка”, обычно 300 К). Соединив эти две точки, получаем прямую линию, по которой происходит пересчет антенных температур в радиояркие. На самом деле калибровка – один из самых сложных и ответственных моментов радиометрических измерений [19]. Если пренебречь потерями в антенно-фидерном тракте, то чувствительность микроволнового радиометра, которая является одной из основных его характеристик, обычно выражается в градусах Кельвина и записывается в виде [19]:

$$\Delta T = k \frac{T_{ш} + T_{АТМ}}{\sqrt{\Delta f \tau}}, \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от типа схемы радиометра ( $k = 0.7 - 1.0$ );  $T_{ш}$  – собственная шумовая температура радиометра;  $T_{АТМ}$  – температура окружающей среды ( $T \approx 300$  К);  $\Delta f$  – ширина



**Рис. 1.** Частотная зависимость коэффициента поглощения молекулярного кислорода, рассчитанная нами по методике Розенкранца при  $H = 40$  км для модели верхней атмосферы для  $15^\circ$  с.ш.

полосы пропускания радиометра;  $\tau$  — постоянная времени.

Из этой с виду простой формулы видны пути улучшения качества измерений-совершенствование схемы радиометра (появились малошумящие СВЧ усилители вплоть до частот 100 ГГц, что позволяет для измерений в стратосфере использовать приемники прямого усиления с максимально низкими шумовыми характеристиками, порядка 200 К), но при этом полоса пропускания должна быть порядка всего 1 МГц и даже меньше, что обеспечивают современные многоканальные СВЧ фильтры с минимальными потерями. Для наземных измерений температуры стратосферы увеличивают время интегрирование вплоть до 1–2 ч (что невозможно для стратосферных спутниковых измерений, там это 1–2 с [6, 15]). Кроме того, нами был предложен еще один путь, связанный с учетом особенностей поглощения в стратосфере, где отдельные спектральные линии фактически не перекрываются [20]. В этом случае возможно сложение двух близко расположенных линий поглощения примерно равной амплитуды и формы. Имеется несколько таких дуплетов линий поглощения в спектре молекулярного кислорода в районе частоты 60 ГГц, например линии с номерами переходов  $7^+$  и  $9^+$ ,  $15^+$  и  $17^+$  (рис. 1). При зондировании профилей температуры атмосферы в микроволновых полосах поглощения кислорода функция (5) имеет вид интегрального уравнения Фредгольма I-го рода и в общем виде записывается как [6]:

$$T_{\text{я}}(\Theta, \nu) = \int_0^H K(h, \nu) T(h) dh + \Delta(\Theta, \nu), \quad (6)$$

где  $K(h, \nu)$  — ядро интегрального уравнения,  $T(h)$  — искомое решение.

Как видим, искомый параметр стоит под интегралом, это классическая обратная задача, имеющая только приближенные решения. Существует несколько методов решения этого рода задач: статистической регуляризации, использования базисных функций, использование регрессии наименьших квадратов, регуляризации Тихонова, нелинейный итеративный, метод Шахина, регрессионный метод, метод нейронных сетей, и др. [3, 4]. Мы в основном используем метод статистической регуляризации, метод нейронных сетей в идеале хорош при наличии текущих данных ракетного зондирования стратосферы и мезосферы, но сейчас их практически нет и можно использовать только данные радиозондов (нижняя стратосфера). Существуют также различные модели расчета коэффициента поглощения  $O_2$  в микроволновом диапазоне: Ван Флека–Вейскопфа, Лорентца, Гросса, Гордона, Жевакина–Наумова), Калмыкова–Титова, Блио–Конста, Бхатнагара–Гросса–Кукка, Либбе, Лама, Розенкранца [3]. Имеются и экспериментальные данные, однако в связи с задачей повышения точности определения температуры на стратосферных и мезосферных высотах в настоящее время усовершенствованию моделей расчета и получению более точных экспериментальных данных уделяется большое внимание. Наиболее широко в настоящее время используется формула Розенкранца [16, 17]. Привлекательна она своей относительной простотой и достаточно высокой степенью согласования с результатами экспериментальных измерений. В модели Розенкранца рассматривается приближение первого порядка, в котором учитываются связи только между соседними вращательными состояниями, что соответствует случаю, когда состояния молекул кислорода слабо связаны в большинстве столкновений. Математически это выражается в том, что в матрице взаимодействия не равны нулю только диагональные и около диагональные элементы. Согласно Розенкранцу, выражение для коэффициента поглощения  $O_2$  записывается так [16]:

$$\gamma(\nu, T, P) = 0.330 P^2 \frac{\nu^2}{T^2} \left\{ \sum_N \Phi_N [f_N^+(\nu) + f_N^+(-\nu) + f_N^-(\nu) + f_N^-(-\nu)] + \frac{0.70 W_B}{\nu^2 + (P W_B)^2} \right\}, \quad (7)$$

размерность:  $[\gamma] = \left[ \frac{H_{\text{П}}}{\text{км}} \right]$ ;  $[P] = [\text{мбар}]$ ;  $[T] = [\text{К}]$ .

В (7) учитываются квантовые переходы с номерами  $N = 1–39$ ;  $\nu$  — частота излучения;  $\Phi_N$  — вероятность заселенности  $N$ -го вращательного уровня молекулы;  $f_N^\pm(\pm\nu)$  — коэффициент формы линии излучения  $O_2$ ;  $W_B$  — ширина нерезонансных линий поглощения. Поглощение также зависит от поляризации излучения.

**Таблица 1.** Значения коэффициента поглощения  $O_2$  на резонансных частотах линий с квантовыми номерами  $1^+ - 23^+$  и  $3^- - 23^-$ 

Квантовый номер линии	Резонансная частота, МГц	Расчеты по модели Розенкранца, Нп/км	Данные измерений Либе, Нп/км	Данные измерений авторов, Нп/км
$1^+$	56265	0.52	0.37	0.47
$3^+$	58447	1.42	1.15	1.20
$5^+$	59591	2.08	1.80	1.70
$7^+$	60435	2.45	2.21	2.67
$9^+$	61151	2.51	2.34	2.18
$11^+$	61800	2.32	2.22	2.39
$13^+$	62411	1.96	1.94	1.99
$15^+$	62998	1.53	1.55	1.03
$17^+$	63569	1.10	1.15	0.85
$19^+$	64128	0.75	0.79	0.77
$21^+$	64679	0.47	0.52	0.61
$23^+$	65224	0.28	0.31	0.27
$3^-$	62486	1.60	1.26	1.54
$5^-$	60306	2.12	1.81	1.67
$7^-$	59164	2.35	2.08	1.83
$9^-$	58324	2.28	2.10	1.80
$11^-$	57612	2.01	1.92	1.83
$13^-$	56968	1.63	1.59	1.77
$15^-$	56363	1.22	1.24	1.14
$17^-$	55784	0.85	0.88	0.80
$19^-$	55221	0.55	0.59	0.52

Нами была поставлена конкретная задача – измерить коэффициент поглощения  $O_2$  прямым спектрометрическим методом при низких давлениях 0.1–10 мм рт. ст. в диапазоне частот 54–65 ГГц, используемом при термическом зондировании атмосферы и сравнить полученные данные с результатами теоретических расчетов Розенкранца и экспериментальными данными Либе [21–23]. Экспериментальная установка, разработанная совместно с сотрудниками НПО “Эталон” (г. Иркутск), обеспечила возможность измерения формы каждой спектральной линии [21]. Интенсивность поглощения  $O_2$  при низких давлениях определялась измерением ослабления СВЧ излучения в волноводной ячейке. Установка для измерения коэффициента поглощения собрана по схеме микроволнового спектрометра с молекулярной модуляцией с СВЧ приемником [21]. Для молекулярной модуляции используется эффект Зеемана: на анализируемый газ в ячейке воздействует переменное магнитное поле. А регистрация сигнала ведется на частоте модуляции. Чувствительность установки 0.01 Нп/км, относительная погрешность измерений 15%. Некоторые результаты представлены в табл. 1. Получено достаточно хорошее согласие с результатами расче-

тов по формуле Розенкранца [22]. Надо отметить, что полученные нами результаты как в части проведения эксперимента с высотным аэростатом, так и в части экспериментальных измерений коэффициента поглощения  $O_2$  и нашего изобретения по использованию свертки спектральных линий остаются по-прежнему актуальными и находят отражение в современных устройствах для микроволнового зондирования термической стратификации стратосферы.

В отличие от тропосферы, при измерениях термической стратификации стратосферы необходим учет влияния эффекта Зеемана. Из-за наличия магнитного дипольного момента у молекулы  $O_2$  линии поглощения под влиянием магнитного поля Земли будут расщепляться на отдельные компоненты вследствие эффекта Зеемана, который начинает проявляться на высотах выше 40–45 км [24]. Под влиянием магнитного поля Земли (примерно 0.5 гаусс) отдельные линии поглощения испытывают расщепление: каждая  $L^\pm$  линия расщепляется на  $3(2 + 1)$  зеемановских компонент. Каждая из этих компонент характеризуется числом  $M_J$  (проекцией полного момента на направление внешнего поля  $H$  или магнитным квантовым числом). Энер-

**Таблица 2.** Сравнение значений коэффициента поглощения  $\gamma_{\text{аэр}}$ , полученных по данным аэростатного эксперимента, со значениями, рассчитанными по модели Розенкранца

Канал	Высота, км	$\gamma_{\text{аэр}}$ , Нп/км	$\gamma_{\text{теор}}$ , Нп/км	$\Delta\gamma/\gamma$ , %
4	25	0.385	0.402	4
5	21	0.307	0.330	7
6	19	0.221	0.234	6

гию этого расщепления для молекулы  $O_2$  можно записать в виде [24]:

$$\Delta W^Z(N, J) = \mu_B H \frac{N(N+1) - J(J+1) - 2}{J(J+1)} M_J, \quad (8)$$

где  $\mu_B$  — магнетон Бора, равный  $0.92712013 \times 10^{-20}$  эрг/гаусс,  $J$  — интенсивность линии.

Тогда Зеemanовский сдвиг по частоте будет равен [24]:

$$\Delta\nu^3 = \frac{\Delta W_{J+1} - \Delta W_J}{h}. \quad (9)$$

С учетом влияния эффекта Зеемана тщательный выбор рабочих частот и типа поляризации могут поднять высоту зондирования температуры микроволновыми надирными спутниковыми зондировщиками вплоть до 70 км.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОТНЫХ АЭРОСТАТОВ ДЛЯ ОТРАБОТКИ МЕТОДИКИ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Первая попытка измерить температуру стратосферы микроволновым радиометром была предпринята в 1966 году в США путем установления его на борт аэростата с высотой подъема 30–35 км [25]. Радиометр имел шумовую температуру порядка 15000 К, измерял излучение на частоте линии  $9^+$  (61.151 ГГц), имея 3 канала с полосами пропускания от 200 до 20 МГц. Измеренные радиояркие температуры сравнивались с расчетными, расхождения составили 3–8°. Эксперимент подтвердил возможность измерения термической стратификации атмосферы путем измерения восходящего излучения в районе частоты 60 ГГц. Дальнейшие исследования возможности измерения термической стратификации стратосферы этим методом были продолжены нами в 1989 г. [26–29]. Установка микроволнового радиометра на высотном аэростате дает уникальную возможность отработать методику стратосферных измерений, выбрать оптимальные частоты измерительных каналов. В отличие от спутника аэростат оснащен высокоточными контактными датчиками температуры, что дает уникальную возможность сравнивать результаты контактных и ди-

станционных измерений во все фазы полета-подъема, дрейфа на высоте порядка 40 км, и спуска. При этом сначала подъема данные совпадают, а по мере достижения высоты максимума весовой функции соответствующего канала радиометра данные этого канала остаются без изменений при дальнейшем подъеме, в отличие от контактных датчиков, что подтверждает правильность теории дистанционных измерений. Всего нами совместно со специалистами ИКИ РАН было проведено в 1989–1990 г. три пуска высотного аэростата (с потолком 40 км) на полевой экспериментальной базе Центральной аэрологической обсерватории (г. Рыльск Курской области). СВЧ радиометр был установлен в специальном контейнере, информация передавалась по радиотелеметрической линии, координатное сопровождение осуществлялось радиолокатором. Характеристики СВЧ радиометра: 6 измерительных каналов с полосами пропускания от 3 до 250 МГц и чувствительностям от 0.65 К до 0.09 К при постоянной времени интегрирования 1 с). Эффективная шумовая температура радиометра 850 К, использовалась свертка двух спектральных линий  $O_2$ :  $11^-$  (57.6125 ГГц) и  $9^+$  (61.1506 ГГц). Измерения проводились в надир, а в одном пуске — в горизонт, что позволило измерить оригинальным способом коэффициент поглощения  $O_2$  в реальной атмосфере (некоторые результаты представлены в табл. 2) [27, 28]. Первый отечественный спутниковый микроволновый зондировщик, обеспечивающий измерение термической стратификации нижней стратосферы, МТВЗА, запущенный в 2001 г., имел температурные каналы примерно с такими же основными характеристиками [14].

### СПУТНИКОВЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРАТИФИКАЦИИ СТРАТОСФЕРЫ И МЕЗОСФЕРЫ

#### *А. Приборы с надирной геометрией измерений*

Появление искусственных спутников Земли открыло новые возможности для измерения температуры атмосферы с помощью микроволновых радиометров. С борта спутника можно получить глобальные картины температурных полей. Измерения из-за пределов атмосферы позволили также избавиться от сильного влияния изменчивого излучения нижнего слоя — тропосферы. Первым спутниковым микроволновым прибором, позволившим измерить температуру атмосферы, является прибор NEMS, установленный на спутнике Nimbus-5 в 1972 г. [15]. Он состоял из пяти супергетеродинных приемников Дикке на фиксированных частотах: 22.235; 31.4; 53.65; 55.9; и 58.8 ГГц [3, 15]. Два первых канала предназначались для измерения концентрации водяного пара,

три остальные – для температурного зондирования. Прибор был не сканирующим. Его дальнейшим развитием стал прибор SCAMS, запущенный в 1975 г. на спутнике Nimbus-6. В отличие от NEMS, этот прибор имел сканер, что существенно увеличило поле обзора и, следовательно, горизонтальное разрешение. Первым спутниковым радиометром, предназначенным только для измерения температуры, стал радиометр MSU (Microwave Sounding Unit) [3, 15], разработанный для системы оперативных метеорологических спутников Земли TIROS-N/NOAA. Впервые прибор MSU был запущен в 1979 г. на спутнике NOAA-6. Прибор давал независимую информацию о температуре атмосферы в диапазоне высот 0–25 км. Измерения проводятся в 4-х спектральных каналах на частотах 50.30; 53.74 и 57.95 МГц. Практически одновременно с разработкой MSU в США был создан спутниковый прибор SSM/T (Sonder System Microwave Temperature), предназначенный для работы на военных метеорологических спутниках системы DMSP (Defence Meteorological Satellite Program) [15]. Это 7-канальный радиометр, измеряющий температуру атмосферы в диапазоне высот 0–30 км при любых погодных условиях. Впервые он был запущен на спутнике “блок-5Д” в 1979 году. Серьезным прорывом в области спутникового зондирования термической стратификации атмосферы, в том числе стратосферы, было создание микроволнового зондировщика AMSU. В Таблице 3 представлены основные характеристики первых микроволновых приборов для измерения термической стратификации атмосферы [3]. Особый интерес представляет рассмотрение измерительных каналов прибора AMSU (табл. 4) [15]. Каналы 1, 2 предназначены для оценки общего содержания водяного пара и влажности облаков (в основном над океанами). Канал 3 предназначен для измерения температуры поверхности Земли. Каналы 4–8 – для измерения профилей температуры тропосферы и нижней стратосферы, каналы 9–14 – для измерения профилей температуры в диапазоне высот 20–38 км, каналы 15–17 – для наблюдения за сушей и океанами, каналы 18–20 – для измерения профилей водяного пара в тропосфере. В дальнейшем появилась целая плеяда уже суперсовременных гиперспектральных спутниковых приборов. Кратко их перечислим: ATMS (22 канала в диапазоне частот от 23 до 183 ГГц для серии спутников JPSS: JPSS-1 (2011 гю); JPSS-2 (2021); JPSS-3 (2026); JPSS-4 (2031) [3, 15]. На спутнике Aqua (2002 г.) (США, Япония, Бразилия) кроме уникального инфракрасного прибора AIRS (имеющего 2378 спектральных канала) установлены модернизированные микроволновые зондировщики AMSU-A1 и AMSU-2. В новом поколении современных надирных спутниковых приборов ATMS для восстановления профилей температуры и влажности, а также измерения об-

лачности и осадков, используются измерения в 22-х рабочих диапазонах с разнесенными полосами пропускания и частотами – в рабочем диапазоне от 23 до 184 ГГц выделены 38 каналов. Дальнейшим развитием военных метеорологических спутников США (DMSP) стал бортовой прибор SSMIS, который перекрывает возможности всех предшествующих зондировщиков. В частности, в его состав входят каналы с частотами в диапазоне 60–64 ГГц с узкими полосами (0.8–2.7 МГц), обеспечивающие измерение профилей температуры стратосферы в диапазоне высот 15–55 км. На геостационарных спутниках США по проекту GeOMAS разработан гиперспектральный микроволновый прибор с использованием антенной решетки, имеющий 72 частотных канала вблизи отдельной спектральной линии O<sub>2</sub> (118.75 ГГц). Еще один новый проект США (STAR) предполагает создание 900-канального микроволнового прибора (из них 300 каналов – вблизи частоты максимума поглощения молекулярного кислорода 60 ГГц) [3, 14, 15]. Запланировано также создание большого числа микроволновых спутниковых приборов в странах ЕС, а также в Японии и Китае. В нашей стране наиболее современным микроволновым спутниковым прибором для измерения термической стратификации атмосферы является прибор МТВЗА-ГЯ, установленный на спутник Метеор-М-2-2, не уступающий по своим характеристикам прибору AMSU. Планируется также создание более современного прибора МТВЗА-МН (2024 г.) [3, 14].

#### *Б. Приборы с лимбовой геометрией измерений*

Необходимость использования лимбовой геометрии измерений – сканировании поперек лимба атмосферы, перпендикулярно к вектору скорости спутника (в зарубежной литературе “field-of-view – FOV”), связана с тем, что концентрация молекулярного кислорода в стратосфере существенно меньше, чем в тропосфере, и для увеличения интенсивности принимаемого сигнала за счет такой геометрии измерений увеличивается количество поглощающего вещества на пути измерения [30]. С точки зрения создания таких измерительных комплексов, а именно спутник – прибор, лимбовая геометрия приводит к существенному усложнению, а значит и удорожанию.

Измеряемая со спутника радиояркостная температура в лимбовом режиме может быть выражена формулой [30]:

$$T_{\text{я}}(\nu, h_t) = T_{\text{к}} e^{-\tau_{\nu}(-\infty, \infty)} + \int_{-\infty}^{\infty} T(s) k_{\nu}(s) e^{-\tau_{\nu}(-s, \infty)} ds, \quad (11)$$

где  $T_{\text{к}} = 2,7 \text{ К}$  – яркостная температура космоса;  $T(s)$  – температура атмосферы в точке на расстоянии  $s$  от точки прицеливания;  $k_{\nu}(s)$  – коэффициент поглощения;  $\tau_{\nu}(s, \infty)$  – оптическая толщина

**Таблица 3.** Микроволновые спутниковые приборы для дистанционного термического зондирования атмосферы (надирная геометрия измерений)

Наименование характеристик	Значения характеристики				
	NEMS	SCAMS	MSU	SSM/T	AMSU
Общее число каналов	5	5	4	7	20
Число каналов температурного зондирования	3	3	47	7	12
Диапазон частот, ГГц	53.7–58.8	52.9–55.5	50.3–55.5	50.5–59.4	50.3–57.6
Полоса пропускания, МГц	100	100	200	115–400	3–400
Приведенная чувствительность, К	0.4	0.4	0.25	0.4–0.6	0.25–1.2
Ширина ДН антенны	10°	10°	7.5°	11°	3.3°
Сканирование	–	±40°	±47.35°	±36°	±40°
Высотный диапазон	0–20	0–20	0–25	0–30	0–38
Спутник	Nimbus5	Nimbus6	NOAA6	DMSP	ATN

**Таблица 4.** AMSU-основные характеристики всех каналов

Номер канала	Центральная частота, ГГц	Число используемых полос	Полоса пропускания, МГц	Приведенная чувствительность, К	Стабильность центральной частоты, МГц	Погрешность абсолютной калибровки, К
1	23.800	1	380	0.3	10	2.0
2	31.400	1	180	0.3	10	2.0
3	50.300	1	200	0.35	10	1.5
4	52.800	1	400	0.25	5	1.5
5	53.330	1	400	0.25	5	1.5
6	54.400	1	400	0.25	5	1.5
7	54.940	1	400	0.25	5	1.5
8	55.500	1	400	0.25	10	1.5
9	57.290344 = $f_{10}$	1	330	0.25	0.5	1.5
10	$f_{10} \pm 0.217$	2	78	0.4	0.5	1.5
11	$f_{10} \pm 0.3222$ $f_{10} \pm 0.48$	4	36	0.4	0.5	1.5
12	$f_{10} \pm 0.3222$ $f_{10} \pm 0.22$	4	16	0.6	0.5	1.5
13	$f_{10} \pm 0.3222$ $f_{10} \pm 0.10$	4	8	0.80	0.5	1.5
14	$f_{10} \pm 0.3222$ $f_{10} \pm 4.5$	4	3	1.20	0.5	1.5
15	89.0	1	6000	0.5	50	2.0
16	89.0	1	6000	0.60	50	2.0
17	166.0	1	4000	0.60	50	2.0
18	183.31 ± 1.00	2	1000	0.8	30	2.0
19	183.31 ± 3.00	2	2000	0.8	30	2.0
20	183.31 ± 7.00	2	4000	0.8	30	2.0



между указанной точкой  $s$  и точкой расположения спутника.

Первый лимбовый микроволновый зондировщик MLS (Microwave Limb Sounder) был запущен на специальном тяжелом геофизическом спутнике UARS (Upper Air Research Satellite) [30]. Запуск состоялся 12 сентября 1991 г., вес спутника 6540 кг, высота орбиты около 600 км. Спутник находился на орбите до 2005 г., имел солнечно-синхронную орбиту с апогеем 575 км и перигеем 574 км. Прибор в основном был создан для анализа малых газовых составляющих (МГС) свободной атмосферы, влияющих на озоновый слой Земли [30]. Измерялись также профили температуры стратосферы и мезосферы, для этого использовался канал на частоте 61 ГГц. Раскрыв антенны, сканирующей по лимбу атмосферы, был 1.6 м, что обеспечивало в части профилей температуры атмосферы вертикальное разрешение 6 км и горизонтальное разрешение 15 км. Высотный диапазон профилей температуры: 20–100 км. Естественно, для таких характеристик при измерениях МГС использовался бортовой анализатор спектра. Последователем прибора UARS-MLS стал более совершенный лимбовый прибор MLS, который был запущен 15 июля 2004 г. на спутнике Aura (воздух) миссии EOS (Earth Observing System), обычно этот прибор называют EOS MLS (в отличие от UARS MLS) [3, 15, 30]. Прибор EOS MLS имел три измерительных модуля: Модуль “GHz” включал в себя антенну с диаметром зеркала 1.6 м, калибровочные мишени, систему сканирования, оптический мультиплексор, радиометры на частотах 118; 190; 240; 640 ГГц. Модуль “TGz” включал в себя специальный ТГц сканер, антенну и переключающее зеркало, телескоп, 2.5 ТГц радиометр на двух поляризациях. Модуль “Spectrometer” -анализаторы спектра, система сбора данных и управления, блоки питания. Спутник находился на солнечно-синхронной орбите высотой 705 км, вес спутника 2970 кг. Кроме профилей температуры и геопотенциала в диапазоне высот 20–100 км, прибор EOS MLS измерял следующие МГС в атмосфере: OH, NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, HCL, CLO, NOCl, BrO, HNO<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, CO, HCN, CH<sub>3</sub>CH, вулканический SO<sub>2</sub>, ледяные частицы. Всего в составе прибора 29 спектрометров: 19 Standard, 5-Midband, 4-DAC и один – в Wide. Вертикальное разрешение профилей температуры 5.8 км, горизонтальное – 12км [23], хотя по некоторым данным из интернета вертикальное разрешение декларируется как 2.5 км.

#### ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СТРАТОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ НАЗЕМНЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ СПЕКТРОРАДИОМЕТРОВ

Если проводить измерение с поверхности Земли в узких полосах вблизи резонансных частот

поглощения O<sub>2</sub> в диапазоне 52–54, то имея высокую чувствительность (за счет большого времени накопления сигнала-порядка одного часа и более) можно измерять приращение радиояркостных температур отдельных линий над общим фоном поглощения и восстанавливать профили температуры стратосферы. Такие уникальные измерения впервые описаны в работе [31]. Измерения проводились вблизи резонансных частот 54.130; 53.596; 53.067; 52.542 и 52.021 ГГц. Радиометр имел шумовую температуру 1800 К, спектральное разрешение 0.16 МГц, стабильность частоты гетеродина 0.01 МГц. Получены профили температуры в диапазоне высот 20–70 км с вертикальных разрешением 20–30 км.

В наши дни микроволновый измерительный комплекс для измерения профилей температуры стратосферы с поверхности Земли был разработан в Институте прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород) в 2010 г. с частичной модернизацией в 2017 г. [32]. Обоснованием необходимости создания такого прибора был тот факт, что спутниковые приборы не обеспечивают непрерывное получение данных над областью поперечником 10–100 км, необходимых для исследования быстротекущих локальных процессов. Приемник гетеродинного типа с СВЧ усилителем на входе, частота гетеродина 52.39709 ГГц, шумовая температура приемника 1400 К [32]. Используется анализатор спектра Acquiris, модель AC 240, работающий в режиме быстрого преобразования Фурье. Он имеет 16384 спектральных канала в полосе 1 ГГц с частотным разрешением 61.04 кГц. Используются две спектральные линии молекулярного кислорода на частотах 52.542 и 53.066 ГГц. Из зарубежных приборов есть прибор TEMPERA, обеспечивающий измерение профилей температуры как тропосферы, так и стратосферы [33]. В нем предусмотрено два блока фильтров – один тропосферный для крыльев линий, второй стратосферный-для центральной части линий. Применяется также Фурье цифровой спектрометр Acquiris AC 240 (Fourier Transform Spectrometer-FFT). Используют измерения на двух спектральных линиях молекулярного кислорода (52.5424 и 53.0669). Полоса анализа 960 МГц, разрешение 30.5 кГц. Шумовая температура приемника 480 К. Диапазон стратосферных высот 20–50 км. Антенна – скалярный рупор и параболический отражатель. Ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности 4°. Измерения стратосферы производились на угле места 60°. Время интегрирования анализатора спектра – 15 с. Данные интегрируются за полчаса либо за час [33]. Расчет коэффициента поглощения молекулярного кислорода производится по методике Розенкранца [16, 17], а восстановление профилей температуры – по методике Роджерса [3].

## РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЙ ДАННЫХ КОМПЛЕКСНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРАТИФИКАЦИИ СТРАТОСФЕРЫ

С января 2014 г. по сентябрь 2016 г. на аэрологической станции Paerue (Швейцария) проходили международные сравнения различных приборов для измерения профилей температуры стратосферы [3]. В сравнениях участвовали: прибор TEMPERA, лимбовый спутниковый прибор MLS (Microwave Limb Sounder), работающий на борту спутника Aura (“Воздух”), (данные канала 118 ГГц), рэлеевский стратосферный лидар станции Nothenpeibenberg (Германия, в 400 км от аэрологической станции)-только ночные данные. За два года сравнивались 192 профиля температуры стратосферы в диапазоне высот 20–50 км. При этом расхождения с MLS составили  $2.4 \pm 0.6$  К внизу высотного диапазона и  $2.0 \pm 0.4$  К на верхнем уровне. С данными лидара на высотах более 35 км расхождения были  $2.3 \pm 0.9$  К и ниже этой высоты  $3.2 \pm 1.1$  К, что объясняется паразитным влиянием аэрозоля на данные лидара на нижних высотах. Кроме того, проводилось сравнение данных TEMPERA с данными глобальной климатической модели SD-WACCM (это часть модели CESM-Community Earth System Model), расхождения были от 1.7 до 4.7 К [3].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние 10–20 лет на фоне достаточно бурного развития в XXI веке наземных и спутниковых дистанционных приборов для измерения термической стратификации тропосферы стала наблюдаться явная тенденция к развитию методов и приборов радиодиапазона для измерения профилей температуры в высоких слоях – стратосфере и мезосфере. Это связано не только с необходимостью контроля за состоянием озонового слоя Земли, но и с возможным влиянием этих слоев на глобальные изменения климата, и в том числе контролем последствий воздействия извержений вулканов и, возможно, парниковых газов на состояние высоких слоев атмосферы. В настоящее время отмечается некоторое потепление температуры тропосферы и некоторое охлаждение средних и нижних слоев стратосферы, что также требует дальнейшего контроля и исследования. Современные спутниковые микроволновые температурные зондировщики с надирной геометрией измерений уже достигают высот порядка 50–60 км, а с лимбовой – 90–100 км, а наземные спектрометрические приборы могут обеспечивать локальными непрерывными данными о динамике температурной стратификации стратосферы. Радиозатменные приборы позволяют также отслеживать различные волновые процессы в атмосфере и осуществлять мониторинг состояния ионосферы [5]. Весьма по-

лезным является и сравнение данных спутниковых приборов с наземными микроволновыми радиометрами, стратосферными лидарами и климатическими моделями.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метеорология верхней атмосферы Земли / Под редакцией Кокина Г.А. и Гайгерова С.С. Ленинград: Гидрометеоздат. 1981. 270 с.
2. Семенов А.И., Шефов Н.Н., Фишкова Л.М., Лысенко Е.В., Перов С.П., Гившивили Г.В., Лещенко Л.Н., Сергеев Н.П. Об изменении климата верхней и средней атмосферы // Доклады РАН. 1996. Т. 349. № 1. С. 108–110.
3. Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия термической стратификации атмосферы. // Москва: П.С. ООО “Шанс”. 2020. 271 с.
4. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты // М.: Наука. 1974. 188 с.
5. Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С. Спутниковый мониторинг Земли: Радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы. М. // Книжный дом “Либроком”. 208 с.
6. Meeks M.L., Lilley A.E. The microwave spectrum of the oxygen in the Earth’s atmosphere // J. Geophysical Research. 1963. V. 68. P. 1683–1703.
7. Кадыгров Е.Н., Князев А.К., Шапошников А.Н. Использование метода микроволновой радиометрии для мониторинга термической стратификации стратосферы // Собственное излучение, структура и динамика средней и верхней атмосферы. Всероссийская конференция с международным участием, посвященная памяти А.И. Семенова и Н.Н. Шефова. 22–23 ноября 2021 г. Сборник тезисов докладов // М.: Физматкнига. 2021. ISBN 978-5-89155-358-3. С. 25.
8. Kadygrov E. N., Pick D. R. The potential for temperature retrieval from an angular – scanning single-channel microwave radiometer and some comparisons with in situ observations // Oxford Press. Meteorological Applications, 1998. V. 5. Iss. 4. P. 393–404.
9. Westwater E.R., Han Y., Irisov V.G., Levskiy V., Kadygrov E.N., Viazankin S.A. Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison Experiments // J. Atmos. and Ocean. Techn. 1999. V. 16. July. P. 805–818.
10. Kadygrov E.N., Miller E.A., Troitsky A.V. Study of Atmospheric Boundary Layer Thermodynamics During Total Solar Eclipses // IEEE Transactions and Remote Sensing. 2013. T. 51. № 9. P. 4672–4677.
11. Westwater E.R., Crewel S., C.Matzler. A review of surface-based microwave and millimeter-wave radiometric remote sensing of the troposphere // Radio Science Bulletin, September. 2004. № 310. P. 59–80.
12. Кадыгров Е.Н., Горелик А.Г., Миллер Е.А., Некрасов В.В., Троицкий А.В., Точилкина Т.А., Шапошников А.Н. Результаты мониторинга термодинамического состояния тропосферы многоканальным микроволновым радиометрическим комплексом // Оптика атмосферы и океана, 2013. Т. 26. № 6. С. 459–465.
13. Kadygrov E.N. Operational aspects of different ground-based remote sensing observing techniques for vertical

- profiling of temperature, wind, humidity and cloud structure: a review. WMO. 2006. IOM Report No. 89. WMO/TD No. 1309. Geneva, Switzerland. 34 p.
14. Чернявский Г.М., Митник Л.М., Кулешов В.П., Митник М.Л., Черный И.В. Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника "Метеор-М" № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. № 4. С. 78–100.
  15. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. / Москва: Изд. ЛЕНАНД. 2015. 333 с.
  16. Rosenkranz P.W. Shape of the 5 mm oxygen band in the atmosphere // IEEE Trans. On Ant. and Prop. 1975. V. AP-23. № 4. P. 498–506.
  17. Rosenkranz P.W. Interference coefficients for overlapping oxygen lines in air // J. Quant. Spectros. Radiat. Transfer. 1988. V. 39. P. 287–297.
  18. Кадыгров Е.Н., Куракин В.С., Сахнев Б.И., Шапошников А.Н. Восстановление профилей температуры стратосферы по дистанционным измерениям восходящего излучения в микроволновом диапазоне // Метеорология и гидрология. № 11. 1989. С. 51–56.
  19. Есенкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры // М.: Наука. 1973. 415 с.
  20. Кадыгров Е.Н., Шапошников А.Н. Способ дистанционного измерения температуры стратосферы в микроволновом диапазоне. А. С. № 1626912A1 от 08.1990 г.
  21. Власов А.А., Кадыгров Е.Н., Куклин Е.А., Глызин В.В., Ловцова О.А. Экспериментальное определение интенсивностей спектральных линий кислорода в полосе 5 мм при низких давлениях // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. № 4. 1990. С. 368–372.
  22. Власов А.А., Глызин В.В., Кадыгров Е.Н., Куклин Е.А., Ловцова О.А., Шапошников А.Н. Сравнение экспериментальных и расчетных значений коэффициента поглощения молекулярного кислорода в миллиметровом диапазоне волн // М.: Труды ЦАО. 1992. Вып. 176. С. 111–119.
  23. Liebe H.J., Gimmestad G.G., Hopponen J.D. // Atmospheric oxygen microwave spectrum – Experiment versus theory // IEEE Transaction. 1977. V. AP25. № 3. P. 327–335.
  24. Hill R.M., Groodly W. Zeeman effect and line-breads studies of the microwave lines of oxygen // Physical Rev. 1954. V. 93. № 5. P. 1019–1022.
  25. Lenoir W.B., Barret J.W., Papa D.C. Observation of microwave emission by molecular oxygen in the stratosphere // J. Geophysical Research. 1968. V. 73. № 4. P. 1119–1126.
  26. Власов А.А., Кадыгров Е.Н. Микроволновая термометрия средней атмосферы с аэростата // Докл. АН СССР. А. А. № 313. Т. 4. 1990. С. 831–834.
  27. Власов А.А., Кадыгров Е.Н., Косов А.С., Струков И.А., Троицкий А.В. Аэростатный эксперимент по измерению радиоизлучения атмосферы на волне 5 мм // Исследование Земли из космоса. 1990. № 5. С. 11–17.
  28. Kosov A.S., Kadygrov E.N., Vlasov A.A., Strukov I.A., Skulachev D.P. Results of the balloon measurements of the stratosphere radiothermal radiation at 5 mm // Adv. Space Res. 1993. V. 13. № 2. P. 209–212.
  29. Власов А.А., Кадыгров Е.Н., Сорокин М.Г. О возможности калибровки микроволновых измерений по горизонтальному излучению свободной атмосферы // Исслед. Земли из космоса. 1992. № 5. С. 27–30.
  30. Waters J.W. Microwave Limb Sounding in Atmospheric Remote sensing by Microwave Radiometry. Edit. M.A. Jansen. New York: John Willey. 1993. Chapter 8. 360 p.
  31. Waters J.W. Ground – based measurements of millimeter-wavelength emission by upper stratospheric O<sub>2</sub> // Natur. 1973. V. 42. April 20. P. 506–508.
  32. Рыскин В.Г., Швецов А.А., Куликов Ю.Ю., Беликович М.В., Большаков О.С., Красильников А.А., Куклин Л.Н., Леснов И.В., Скалыга Н.К., Фейгин А.М. Микроволновый радиометрический комплекс для исследования термической структуры атмосферы Земли // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2016. № 8–9. С. 819–827.
  33. Stahli O., Murk A., Kampfer N., Matzler C., Friksso P. Microwave radiometer to retrieve temperature profile from surface to the stratopause // Atmos. Meas. Tech. 2013. № 6. С. 2477–2494.

## Perticularity of Stratospheric Temperature Stratification Measurements by Microwave Radiometry Method

E. N. Kadygrov<sup>1, \*</sup>, A. K. Kniazev<sup>1</sup>, and A. N. Shaposhnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Central Aerological Observatory,  
3 Pervomayskaya Str., Dolgoprudny, Moscow region, 141700 Russia

\*e-mail: enkadygrov@gmail.com

Principles of microwave remote sensing of stratospheric temperature profiles are discussed. Our focus of this article is to present some aspects in stratospheric measurements in the contrast with tropospheric and boundary layer remote sensing. Selection of spectral lines, molecular oxygen absorption coefficient calculation and measurements, sensitivity of radiometer, influence of Zeeman effect are discussed. We also presented parameters of modern satellite-based and ground-based instruments and some results of it's data comparison. For high altitude measurement it can use limb geometry of satellite-born microwave instruments. The combination of surface-based and satellite data may be able to extend the effective horizontal resolution of remote-sensing system for stratospheric temperature measurements.

**Keywords:** stratosphere, temperature profiles, microwave remote sensing