

Современное состояние и перспективы применения микроволновой радиометрии атмосферы

Д.М. Караваев, Г.Г. Щукин*

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

Поступила в редакцию 20.07.2015 г.

Рассматривается состояние наземной микроволновой радиометрии для определения профилей влажности и температуры атмосферы, влагозапаса атмосферы, водозапаса облаков и интенсивности осадков. Приведены подходы к решению соответствующих обратных задач, результаты экспериментальных исследований влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков с помощью двухчастотного радиометра. Сформулированы перспективные направления практического применения метода микроволновой радиометрии атмосферы.

Ключевые слова: радиояркость температура, влагозапас атмосферы, водозапас облаков, профили влажности, профили температуры, «влажная» задержка, валидация; brightness temperature, water vapor, cloud liquid, profiles of humidity, profiles of temperature, wet delay, validation.

Введение

Метод микроволновой радиометрии позволяет получать информацию о физическом состоянии атмосферы [1, 2] практически при любой погоде в режиме реального времени. Отечественные исследования в области микроволновой радиометрии для задач метеорологии начались около 50 лет назад и связаны с именами проф. К.С. Шифрина и А.Е. Башаринова [3, 4]. В настоящее время метод микроволновой радиометрии находит применение в различных областях знаний – в метеорологии, физике атмосферы, радиоастрономии и др.

Принципы наземной микроволновой радиометрии атмосферы

Метод микроволновой радиометрии основан на связи искомых параметров атмосферы с характеристиками собственного радиотеплового излучения атмосферы. Эти связи определяются уравнением переноса радиотеплового излучения в атмосфере. В приближении «чистого поглощения» выражение для радиояркости температуры нисходящего излучения атмосферы в предположении горизонтально-однородной, плоскостной, нерассеивающей атмосферы, находящейся в состоянии термодинамического равновесия, при нулевых граничных условиях у поверхности Земли и с учетом космического излучения на верхней границе атмосферы, в интегральной форме записи имеет вид

$$T_{\text{я}}(\nu, \theta) = T_{\text{к}} \exp \left[-\sec(\theta) \int_0^{\infty} \alpha_{\text{п}}(\nu, z) dz \right] + \sec(\theta) \int_0^{\infty} T(z) \alpha_{\text{п}}(\nu, z) \exp \left[-\sec(\theta) \int_0^{\infty} \alpha_{\text{п}}(\nu, z') dz' \right] dz, \quad (1)$$

где $T_{\text{к}}$ – радиояркость температура космического излучения, 2,75 К; θ – угол места; ν – частота излучения; z – высота; $T(z)$ – термодинамическая температура воздуха; $\alpha_{\text{п}}$ – коэффициент поглощения в атмосфере, представленный суммой коэффициентов поглощения в водяном паре, кислороде и жидкокапельных облаках.

Для расчета поглощения микроволнового излучения в водяном паре и кислороде учитывается селективное и континуальное поглощение газовых компонентов атмосферы, используются стандартные методики. При расчете ослабления излучения в капельных облаках и осадках используется теория Ми расчета ослабления и рассеяния на сферических частицах, учитывается вероятностное распределение частиц по размерам. В безоблачной атмосфере поглощение излучения происходит в основном в кислороде и водяном паре, при этом линии поглощения в кислороде центрированы при частотах 118 и 60 ГГц, а линии поглощения водяного пара – при частотах 183,16 и 22,235 ГГц. «Окна прозрачности» атмосферы (30–38, 75–100 и 130–160 ГГц) и область малого поглощения излучения (5–15 ГГц) используются для решения задач зондирования облаков. В спектре радиотеплового излучения атмосферы также присутствуют линии примесных газов атмосферы (озона, закиси азота, окиси углерода и др.), что полезно при исследовании состава атмосферы.

* Дмитрий Михайлович Караваев (dm.karavaev@mail.ru);
Георгий Георгиевич Щукин (ggshchukin@mail.ru).

Задачи микроволновой радиометрии атмосферы и методы их решения

Среди задач наземного микроволнового зондирования атмосферы выделяются задачи определения следующих параметров: влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков; профилей температуры и влажности воздуха в тропосфере; профилей влажности в стратосфере; водности конвективных облаков и интенсивности осадков.

Возможность определения влагозапаса атмосферы по радиотепловому излучению атмосферы была показана в [1, 3]. В случае облачной атмосферы влагозапас атмосферы Q и водозапас облаков W определяются из уравнений

$$\begin{aligned} Q &= a_0 + a_1\tau(v_1) + a_2\tau(v_2); \\ W &= b_0 + b_1\tau(v_1) + b_2\tau(v_2), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\tau(v_i)$ — оптическая толщина атмосферы; a_i, b_i — коэффициенты регрессии, полученные по данным радиозондирования атмосферы и эмпирическим моделям облачности. Оптимальные частоты зондирования находятся вблизи центра линии поглощения водяного пара 22,235 ГГц и в «окне прозрачности» атмосферы 31–38 ГГц. Погрешность определения влагозапаса атмосферы составляет около 5–10%, а водозапаса облаков — 20–30% (в отсутствие осадков). Для определения влагозапаса «сухой» (например, полярной) атмосферы измерения поглощения атмосферы эффективно проводить вблизи центра линии водяного пара 183,31 ГГц.

Экспериментальные исследования влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков выполнены в различных регионах над океаном и сушей [5, 6]. При этом для измерения характеристик излучения атмосферы применялись известные методики угломестных разрезов и абсолютных измерений радиоярких температур атмосферы. В экспериментах использовались автоматизированные микроволновые радиометры (частоты 21,0 или 22,2 и 36,5 ГГц). В качестве примера на рис. 1 приведен временной ход влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в период с 1 по 21 мая 2007 г. в пос. Воейково.

Видно, что влагозапас атмосферы изменялся от 3,2 до 35 кг/м² (среднее значение влагозапаса составляло 11,3 кг/м², а его среднеквадратическое отклонение 4,77 кг/м²). Радиозондовые значения влагозапаса атмосферы (рис. 1) подтверждают результаты радиометрических измерений (различие составляло около 1 кг/м²). Водозапас облаков обычно не превышал 1,0 кг/м². Наблюдения в различные сезоны года показали, что радиометрические измерения водозапасов слоистообразных облаков согласуются с имеющимися самолетными данными для Северо-Западного региона России. В зимний период в Ленинградской области водозапас облаков не превышал 0,28 кг/м² в 95% случаев, а значения водозапаса облаков, превышающие 0,52 кг/м², регистрировались лишь в 1% случаев. В летний период водозапас облаков превышал уровень 0,8 кг/м² в 5% случаев. Над океаном водозапас облаков составлял менее 0,5 кг/м² в 90% случаев.

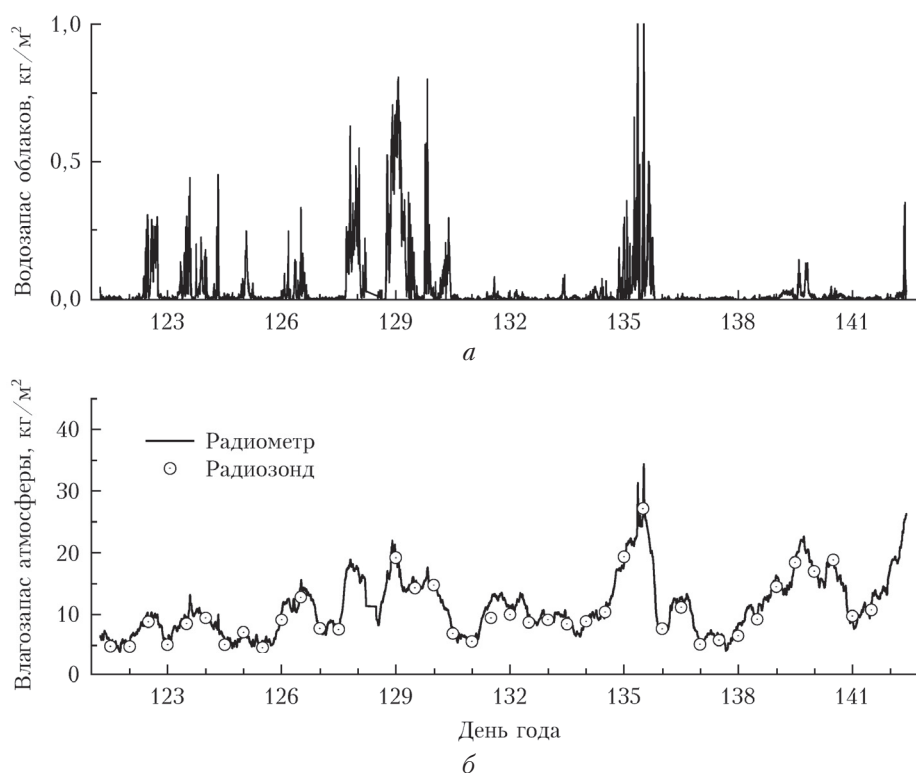


Рис. 1. Временной ход водозапаса облаков (а) и влагозапаса атмосферы (б) по микроволновым радиометрическим измерениям в Ленинградской области

Методы комплексного температурно-влажностного зондирования атмосферы позволяют получать информацию о профилях температуры и влажности в тропосфере Земли [2, 7, 8]. Решение соответствующей обратной задачи сводится к решению уравнения Фредгольма первого рода [9]. В векторно-матричной форме исходное уравнение записывается как

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (3)$$

Метод статистической регуляризации дает решение уравнения в виде

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}_0 + (\mathbf{A}^T \mathbf{I}^{-1} \mathbf{A} + \mathbf{K}^{-1})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{I}^{-1} (\mathbf{Y} - \mathbf{A}\mathbf{X}_0), \quad (4)$$

где \mathbf{A} – линейный оператор прямой задачи; \mathbf{I} – ковариационная матрица ошибок измерений; \mathbf{K} – ковариационная матрица искомым параметров; $\boldsymbol{\varepsilon}$ – вектор ошибок измерений; $\hat{\mathbf{X}}$ – вектор оцениваемых метеопараметров атмосферы; \mathbf{X}_0 – его среднеклиматическая оценка. Вектор измеряемых параметров \mathbf{Y} включает значения измеренных радиоярких температур, приземные метеопараметры, а также может включать дополнительную метеорологическую информацию. При реализации алгоритма определения вектора \mathbf{X} используется априорная информация о профилях температуры, давления, влажности воздуха, водности облаков, полученная из результатов самолетного и радиозондирования.

В общем случае уравнение (3) является нелинейным, и его решение находится методом итераций. Оптимальные частоты зондирования атмосферы при решении задачи определения профилей температуры, влажности воздуха и водности облаков лежат в областях спектра 18–26, 31–37 и 51–58 ГГц. Погрешность определения температуры атмосферы составляет 0,5–1 К в приземном слое и увеличивается с высотой до 1,5–2,5 К. Относительная погрешность определения влажности воздуха составляет 10–20% и увеличивается в верхней тропосфере. Распространение получают наземные многочастотные микроволновые радиометры температурно-влажностного зондирования атмосферы МР-3000А (Radiometrics Corporation, США) и НАТПРО (Radiometer Physics GmbH, Германия). Из отечественных разработок выделим комплекс «Микрорадком» (ЦАО) [7].

Анализ спектров нисходящего собственного радиотеплового излучения атмосферы вблизи центра линий поглощения водяного пара 22,235 и 183,31 ГГц можно использовать для определения профилей водяного пара в стратосфере. Лучшие условия наблюдения стратосферного водяного пара реализуются при измерениях спектров вблизи центра линии водяного пара 183,31 ГГц с самолета (высота полета более 10 км), погрешность определения влажности на высотах от 20 до 80 км составляет около 20%.

Водо запас облаков определяется по результатам измерений поглощения из соотношения

$$W = k_w(v, T_{cl})^{-1} [\tau(v) - \tau_d(v) - k_q(v)Q], \quad (5)$$

где $k_q(v)$ и $k_w(v, T_{cl})$ – эффективные удельные коэффициенты поглощения в водяном паре и в капель-

ных облаках; $\tau_d(v)$ – оптическая толщина кислорода; $\tau(v)$ – измеряемая радиометром оптическая толщина атмосферы. Применение двухчастотного зондирования позволяет исследовать облака на различных стадиях развития. Погрешность определения водо запаса облаков составляет около 30%.

Для определения средней водности облака необходимо использовать информацию о границах облака. Так, получил развитие пассивно-активный метод [10] определения средней водности конвективных облаков, основанный на измерении водо запаса зондируемой зоны с помощью микроволнового радиометра и ее протяженности с помощью активного канала пассивно-активной станции. Тогда средняя водность облака $\bar{w}(\mathbf{l})$ вдоль направления зондирования определяется из соотношения

$$\bar{w}(\mathbf{l}) = W(\mathbf{l})/L(\mathbf{l}), \quad (6)$$

где $L(\mathbf{l})$ – протяженность зондируемой зоны облака (дождя), определяемая с помощью активного канала (радиолокатора); $W(\mathbf{l})$ – водо запас облака вдоль направления визирования, определяемый с помощью радиометра. Для перехода от водности к интенсивности дождя используются соотношения

$$I = 3,4w^{1,33} \text{ при } w \leq 0,32 \text{ г/м}^3, \\ I = 2,8w^{1,17} \text{ при } w > 0,32 \text{ г/м}^3. \quad (7)$$

Современный вариант пассивно-активной радиолокационной станции может быть реализован на базе ДМРЛ-С (несущая частота 5,625 ГГц). Особенностью новой разработки является возможность наблюдения облаков в стандартном режиме оперативного радиолокационного обзора [11]. Такой ДМРЛ-С перспективен для оперативной практики радиолокационного штормооповещения, для определения водо запаса, средней водности мощных облаков и интенсивности осадков, обнаружения и прогноза градовых облаков.

При исследованиях облачной атмосферы с осадками необходимо учитывать эффекты рассеяния и поляризации радиотеплового излучения [12–14]. Поляризация собственного радиотеплового излучения атмосферы связана с несферичностью частиц облаков и осадков, особенностью фазового состояния частиц облаков. Известно, что для исследования облаков и осадков наиболее информативными являются первые три компоненты вектор-параметра Стокса радиотеплового излучения. Модельные представления о формировании радиотеплового излучения облачной атмосферы и осадков подтверждаются экспериментальными исследованиями в диапазонах частот 10, 13, 36 и 90 ГГц. Второй и третий параметры Стокса могут составлять 15–20 и 2–3 К соответственно. Дискуссию вызывают случаи регистрации высоких значений переохлажденной водности в верхней части конвективного облака более 0,7 г/м³, обнаруженные кратковременные высокие уровни поляризации собственного радиотеплового излучения переохлажденной части мощных конвективных облаков (около 15 К на частоте 36,5 ГГц), что объ-

яснялось ориентацией облачных частиц в электрическом поле облака. Поляризационные измерения полезны при зондировании облаков и осадков для раздельного определения мелкокапельной и крупнокапельной фракций водозапаса облаков.

Перспективные применения микроволновой радиометрии атмосферы

Задачи гидрометеорологических прогнозов. Применение микроволновой радиометрической информации в задачах сверхкраткосрочного прогноза погоды становится все более актуальным. В связи с этим в [5] был разработан вариант построения регионального микроволнового радиометрического прогностического критерия развития опасных гидрометеорологических явлений (конвективных облаков, гроз) на основе статистического анализа экспериментальных данных (радиометрического и радиолокационного зондирования). Предикторы, определяемые на основе данных микроволновых радиометров, включают в себя значения водозапаса атмосферы и его изменения во времени. Прогностический критерий cr развития опасных явлений погоды определяется из соотношения

$$cr = C_0 + C_1 Q + C_2 \frac{dQ}{dt}, \quad (8)$$

где C_k — коэффициент регрессии. При условии $cr > 0$ ожидаются опасные явления. Предварительное тестирование в Ленинградской области показало, что заблаговременность прогноза опасных явлений составляет 1–12 ч, а оправдываемость около 0,76.

Перспективы совершенствования системы сверхкраткосрочного прогноза и наукастинга связаны с развитием технологий усвоения разнородной метеорологической информации, в том числе оперативных данных дистанционного зондирования атмосферы в региональных схемах численного прогноза. Перспективной задачей является построение радиометрической сети температурно-влажностного зондирования атмосферы на территории РФ.

Валидация спутниковых данных. В настоящее время в РФ нет собственной системы постоянно действующих экспериментов, направленных на валидацию спутниковых данных целевой аппаратуры космического аппарата «Метеор-1М». Для валидации данных температурно-влажностного зондирования атмосферы МТВЗА-ГЯ целесообразно использовать результаты наземных измерений на тестовых полигонах, организованных в различных регионах России [6]. Наряду с принятыми полигонами Росгидромета могут быть использованы дополнительные полигоны, в частности полигон Лехтуси (Ленинградская область).

Информационные продукты, получаемые по данным спутниковых микроволновых радиометров, таких как ATMS, SSMIS, AMSR-2 и др., включают в себя водозапас атмосферы и водозапас облаков над океаном. Для проверки качества спутниковых данных и настройки процессов обработки данных могут использоваться островные полигоны, самолеты-лаборатории и суда погоды, оборудованные микроволновыми радиометрами. Примеры временной изменчивости водозапаса облаков и водозапаса атмосферы над океаном, полученных по данным судового микроволнового радиометра НИСП «Волна» (апрель 1990 г., 46° с.ш., 48° з.д.) представлены на рис. 2.

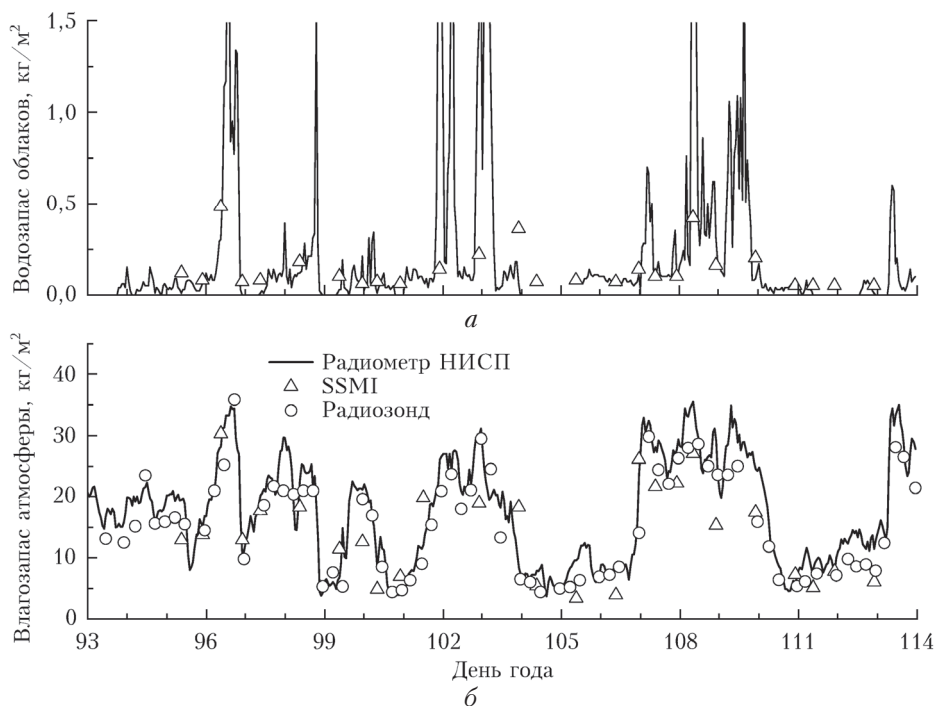


Рис. 2. Временной ход водозапаса облаков (а) и водозапаса атмосферы над океаном (б) по данным судового микроволнового радиометра НИСП «Волна»

Судовые радиометрические измерения влагозапаса атмосферы согласуются с данными аэрологического зондирования (среднеквадратическое отклонение составляет 2 кг/м^2), а данные спутникового радиометра SSM/I DMSP по влагозапасу атмосферы и водозапасу облаков качественно согласуются с данными судового радиометра.

Задачи координатно-временного и навигационного обеспечения. В связи с возрастанием требований к средствам координатно-временного и навигационного обеспечения все более актуальными становятся разработки методов и технологий оперативной оценки условий распространения радиосигналов в тропосфере и ионосфере Земли [15]. Например, для выполнения требований к точности коррекции тропосферной задержки ($\sim 10^{-3}$ м) необходимо измерять распределение влажности воздуха вдоль траектории распространения радионавигационных сигналов. Для решения этой проблемы перспективным представляется метод микроволновой радиометрии, который является одним из наиболее точных методов определения влагозапаса атмосферы и тропосферной задержки, обусловленной наличием водяного пара. Тропосферная задержка в зенитном направлении L_t может быть определена на основе микроволновых радиометрических измерений влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков из соотношения

$$L_t = L_d(\varphi, h, P_d) + b_1 Q + b_2 W, \quad (9)$$

где L_d — гидростатическая компонента задержки; b_i — коэффициент регрессии; P_d — давление сухого воздуха; φ, h — широта и высота наблюдательной станции. Эксперименты в Ленинградской области показали, что тропосферная задержка радионавигационных сигналов, обусловленная наличием водяного пара, может составлять до 0,3 м (в зените) и существенно зависит от метеоусловий. Актуальной современной задачей является создание серии микроволновых радиометров водяного пара. В настоящее время известен ряд разработок-прототипов радиометров водяного пара JPL (США), СКБ ИРЭ РАН (г. Москва), ИПА РАН (г. Санкт-Петербург).

Исследования парниковых газов в стратосфере. Существенную роль в формировании парникового эффекта, влияющего на современные изменения климата Земли, играет водяной пар (до 60%). В число значимых парниковых газов атмосферы также входят углекислый газ, метан, озон и др., существенную роль играют также облака. Метод микроволновой радиометрии перспективен для определения водяного пара, озона и других малых газовых составляющих атмосферы, позволяет оценивать общее содержание газов и их распределение в различных слоях атмосферы [16].

Заключение

Выполненные исследования показали эффективность метода микроволновой радиометрии для определения влажностно-температурных параметров атмосферы, влагозапаса атмосферы и водозапаса об-

лаков. Эти выводы основаны на результатах численных расчетов и экспериментальных исследований атмосферы с применением микроволновых радиометров. Экспериментальные исследования влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, выполненные в различных регионах при различных метеоусловиях, показали, что метод микроволновой радиометрии позволяет с высокой точностью (менее 1 кг/м^2) определять влагозапас атмосферы. Радиометрические данные водозапасов различных типов облаков согласуются с эмпирическими моделями облачной атмосферы. Среди перспективных направлений применения методов и наземных средств микроволновой радиометрии выделяются задачи координатно-временного и навигационного обеспечения, валидации спутниковых данных и сверхкраткосрочного прогноза погоды и опасных явлений.

1. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 283 с.
2. Westwater Ed.R. Ground-based microwave remote sensing of meteorological variables: Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry / Ed. by M. Janssen. N.Y.: John Wiley, 1993. P. 145–213.
3. Шифрин К.С., Рабинович Ю.И., Щукин Г.Г. Исследование поля микроволнового излучения в атмосфере // Труды ГГО. 1968. Вып. 222. С. 5–18.
4. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радионизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 118 с.
5. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. СВЧ-радиометрические исследования влаго-водосодержания атмосферы в период развития конвективных облаков и гроз // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Физика атмосферы. 2010. Спецвыпуск. С. 53–58.
6. Караваев Д.М., Кулешов Ю.В., Щукин Г.Г., Успенский А.Б. Валидация информационных продуктов спутниковых радиометров микроволнового диапазона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 3. С. 259–267.
7. 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 атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 6. С. 459–465.
8. Образцов С.П., Щукин Г.Г. СВЧ-радиометрическое определение высотных распределений температуры и характеристик влагосодержания атмосферы // Труды НИЦ ДЗА. 1997. Вып. 1(546). С. 20–32.
9. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
10. Щукин Г.Г., Булкин В.В. Метеорологические пассивно-активные радиолокационные системы. Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2009. 166 с.
11. Щукин Г.Г., Вылегжанин И.А., Караваев Д.М., Жуков В.Ю. Разработка метеорологического пассивно-активного радиолокатора на базе ДМРЛ-С: Труды конференции // V Армандовские чтения: Практическая радиолокация. Муром, 29.06–1.07.2015. Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2015. С. 120–124.
12. Ильюшин Я.А., Кутуза Б.Г. Компьютерное моделирование поляризационных характеристик теплового радионизлучения дождевых осадков: Труды конференции // XXIV Всерос. науч. конф. по распространению радиоволн. Иркутск, июнь, 2014. Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2014. С. 181–183.

13. *Матросов С.Ю., Щукин Г.Г.* Поляризация радиотеплового излучения мощных конвективных облаков // Метеорол. и гидрол. 1990. № 1. С. 24–29.
14. *Троицкий А.В., Ошарин А.М., Королев А.В., Стратт В., Айзик Ж.* Исследование поляризационных характеристик теплового микроволнового излучения облачной атмосферы // Изв. вузов. Радиофиз. 2001. Т. 44, № 12. С. 1203–1217.
15. *Щукин Г.Г., Караваев Д.М.* Применение дистанционных методов зондирования атмосферы в задачах координатно-временного и навигационного обеспечения // Труды ИПА. 2012. Вып. 23. С. 411–414.
16. *Куликов Ю.Ю., Демкин В.М., Красильников А.А., Рыскин В.Г., Фролов В.Л., Шанин В.Н.* Влияние на вариации озона средней атмосферы естественных и антропогенных факторов (по данным наземной микроволновой радиометрии): Труды конференции // XXIII Всерос. конф. по распространению радиоволн. Йошкар-Ола, май, 2011. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. С. 245–249.

D.M. Karavaev, G.G. Shchukin. **Status and prospects of application of microwave radiometry of the atmosphere.**

The status of the ground-based microwave radiometry in view of determining atmospheric temperature and moisture profiles, water vapor, cloud liquid, and rainfall intensity is discussed. Approaches to solving inverse problems of microwave radiometry of the atmosphere, the results of experimental research of atmospheric water vapor and cloud liquid with the help of dual-frequency radiometer are described. The promising directions of the practical application of the method and means of microwave radiometry of the atmosphere are formulated.