

ПРОБЛЕМЫ ВЛАЖНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ РАДИОМЕТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

д. ф.-м. н. А. Г. Горелик, Е. В. Островский

ФГУП «Гидрометпоставка», г. Долгопрудный МО, gorelik.ag@hotbox.ru

В представленной работе делается попытка дальнейшего развития идей, заложенных ранее и опубликованных в [1, 2, 3]. За прошедший с этих работ период времени достигнуты впечатляющие успехи в области создания высокочувствительной и высокостабильной микроволновой и ИК-радиометрической аппаратуры, светолокационной и радиолокационной техники. Это создает принципиально новые возможности для оценки перспектив развития радиометрических методов определения содержания парообразной влаги в нижних слоях атмосферы в широком диапазоне метеоусловий, сезонов года, включая зимний, различных климатических зон и рельефов местности.

Создание совершенной микроволновой техники и практически неограниченные возможности вычислительной техники позволяет по-новому подойти к осмысливанию полученных ранее результатов и наметить пути дальнейшего применения дистанционных методов для исследования физических процессов, протекающих в атмосфере и исследования процессов, приводящих к образованию и распаду облаков, начиная со стадии их зарождения.

Применение современных методов фоторегистрации облаков при помощи спектрозональной фотосъемки с Земли и со спутника позволяет связать процессы, протекающие в атмосфере в широком диапазоне пространственных и временных масштабов.

Некоторые возможности дальнейшего развития комплексных радиофизических методов рассмотрены в настоящей работе.

Влажность воздуха является одним из наиболее важных и трудноизмеряемых параметров, определяющим термодинамическое состояние атмосферы. Влажность даже у поверхности Земли может изменяться в очень широких пределах (от долей грамма в кубометре воздуха до 25-30 г/м³), с высотой количество водяного пара убывает и уже на высоте 10 км составляет всего сотые доли грамма на м³.

Обычно оперативным средством, при помощи которого определяется относительная влажность воздуха (%) на различных высотах являются специальные «датчики», подъем которых на высоту осуществляется при помощи наполненной водородом оболочки. Данные о температуре воздуха $T(H)$ и относительной влажности $\varphi(H)$ передаются по радиоканалу и уже на Земле рассчитывается содержание водяного пара в г/м³.

Проблемы, связанные с измерением влажности воздуха, с указанием точности и достоверности таких измерений при помощи пленочных датчиков детально обсуждаются в [4]. Данные, полученные при помощи таких датчиков, установленных на радиозонде, длительное время служили основой при сопоставлении данных о влажности, полученных исследователями иными методами [3, 5].

В [4, 6] приведены результаты совместных (синхронных) измерений влажности, осуществленных при помощи прецизионного малоинерционного кондиционного гигрометра и платинового термометра и серийных пленочных датчиков влажности и температуры, установленных на радиозонде. Подъемным средством служил свободный аэростат до высот, превышающих 20 км.

На рис. 1 представлены результаты расчета расхождения величины интегрального содержания водяного пара, полученной в ходе этих совместных измерений для диапазона температур +20...-40°C. Анализ данного графика позволяет выделить три его зоны относительно температуры: первая - левее отметки -5°C, вторая - от -5°C до -15°C и третья - правее отметки -15°C.

Расхождения показаний датчиков СДД и КГ в первой зоне линейно зависят от температуры и их величина не превышает 10%. Во второй зоне, в диапазоне температур -5...-15°C, расхождение не подчиняется линейному закону. В третьей зоне, при низких температурах,

зависимость расхождения близка к линейной, но с большим градиентом – около 5% на градус Цельсия [6].

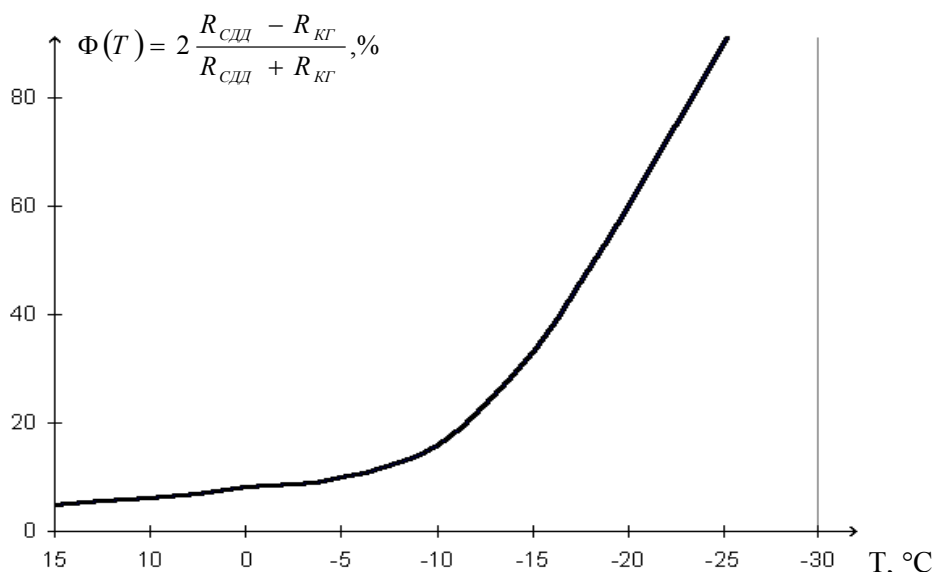


Рис. 1. Относительное расхождение $\Phi(T)$ расчетных величин интегрального содержания водяного пара, полученных по данным стандартного радиозонда с пленочным датчиком влажности СДД ($R_{СДД}$) и прецизионного КГ «Горос» ($R_{КГ}$) для различных температур T .

Сопоставление данных прецизионных и радиозондовых измерений, с одной стороны, позволило оценить существенные погрешности, возникающие при оперативном влажностном и температурном зондировании и установить их зависимость от температуры среды, в которой осуществляются измерения, а с другой - получить уникальные сведения о тонкой структуре поля влажности в свободной атмосфере [4, 6]. Были обнаружены «сухие зоны», в которых относительная влажность падала до 10-15%, без существенного изменения температуры в этих областях.

Данные, полученные при помощи метеорологических радиолокаторов, работающих в дециметровом и метровом диапазоне длин волн, так же указывают на то, что в нижних слоях тропосферы могут существовать слои или зоны, в которых должны отмечаться локальные области с невероятно высокими значениями перепада влажности воздуха [7].

Для дальнейшего изучения «тонкой структуры» и динамических процессов, протекающих в приземном слое свободной атмосферы, необходимо разрабатывать дистанционные методы, при помощи которых можно было бы осуществлять непрерывный и длительный контроль за трансформацией влажностного режима атмосферы и его связью с происходящими в ней динамическими процессами.

Совместные радиолокационно-радиометрические наблюдения должны привести к получению новой информации о строении и физических процессах, протекающих в свободной атмосфере, способствующих образованию в ней устойчивых областей со значительными локальными перепадами температуры и влажности воздуха.

Одна из первейших задач состоит в том, что необходимо определить и сформулировать требования к аппаратуре, осуществляющей непрерывный контроль за изменением количества парообразной влаги, содержащейся в атмосфере.

С этой целью необходимо было обработать обширный экспериментальный материал об изменении влажности с высотой, полученного методом радиозондов, и измерениями влажности у поверхности Земли, $\rho(\theta)$. В [5] показано, что между общим содержанием водяного пара в атмосфере R и $\rho(\theta)$ могут существовать достаточно жесткие связи. Так, по данным, полученным в Долгопрудном (Московская область) обычно разброс точек относительно прямой $R = H_{эф} \cdot \rho(\theta)$

не превышает 15%. Таким образом для таких районов, погрешность радиометрических методов определения влажности атмосферы должна быть значительно меньше этой величины.

Обработка данных фактических измерений $\rho(H)$, полученных по данным радиозондирования в горных районах Армении и Крыма показала, что связи между R и $\rho(0)$ является менее жесткой и может даже нарушаться.

Полученные результаты однозначно указывают на то, что введение радиометрических методов в аэрологическую практику должно способствовать существенному прогрессу работ, направленных на изучение физических процессов, протекающих в атмосфере, получение прогноза погоды и в части заблаговременного предсказания условий для развития облачности и возможного выпадения осадков.

Микроволновые радиометрические методы влажностного зондирования атмосферы начали развиваться в конце 50-х начале 60-х годов прошлого века, базируясь на теоретических работах В. Троицкого и С. Жевакина [8], Жевакина и Наумова [9], а также Ван-Флека – Вайскопфа [10]. В нашей стране работы в этом направлении проводились в НИРФИ, ИРЭ ИФА АН СССР, ГГО, ЦАО, МГАПИ и ряде других организаций. За рубежом работы, связанные с внедрением радиометрических методов в арсенал средств, использующихся для измерения влажности и температуры воздуха, были выполнены Барретом и Чангом [11], Стиланом [12] и Вестуотером [13].

Ко второй половине 60-х - началу 70-х годов была создана достаточно надежная микроволновая радиометрическая аппаратура, работающей в диапазоне длин волн 0,8 – 1,6 см, и с ее помощью был выполнен достаточно широкий объем исследований, посвященных применению микроволновой радиометрии для влажностного зондирования атмосферы.

Результаты сопоставления расчетных значений поглощения в водяном паре и молекулярном кислороде, выполненные в ЦАО по формулам Жевакина и Наумова [9] и Ван-Флека [10], с экспериментальными данными показали, что в центре линии поглощения эксперимент и теория достаточно хорошо совпадают. Для окна прозрачности от 0,8 до 0,9 см $\tau(\lambda)$ ближе к скорректированной зависимости, полученной Ван-Флеком.

На первом этапе создавалось впечатление, что микроволновые методы быстро завоюют свои позиции как средство влажностного зондирования атмосферы и войдут в оперативную систему аэрологических наблюдений. Казалось, что основная проблема связана с необходимостью создания малогабаритной, надежной и высокочувствительной аппаратуры, и что после разработки и создания такой аппаратуры проблема влажностного зондирования будет решена.

Однако, с той поры, когда были высказаны идеи применения микроволновой радиометрии для влажностного зондирования атмосферы прошло почти 50 лет. За прошедшие годы достигнуты впечатляющие успехи в части разработки и создания малогабаритной сверхвысокочувствительной и высокостабильной аппаратуры, работающей практически в любых погодных условиях. На базе современной вычислительной техники оказалось возможной разработка такого программного обеспечения, которое позволяет обрабатывать поступающую с радиометрического комплекса информацию с введением поправок, возникающих за счет изменения температурного режима различных узлов, входящих в него. Однако, микроволновые радиометрические системы в практику аэрологических наблюдений ни в нашей стране, ни за рубежом не вошли [13].

Разработка радиометрических методов измерения влажности в широком диапазоне метеоусловий, в разные сезоны года и при наличии облачности оказалось значительно сложнее, чем это казалось на первом этапе. Возникшие проблемы пытались решить путем применения многоволновых методов или анализом аномалий угловой зависимости $T_A(\varphi)$ [13, 14].

Результаты радиометрических измерений, которые приводятся в литературе, в основном относятся к теплым сезонам года. В большинстве работ не приводятся точные параметры самой радиометрической аппаратуры, в первую очередь – о полосе частот, на которую настроен радиометр, его амплитудные характеристики и т.д. Поэтому результаты, полученные различными авторами, с трудом поддаются совместному анализу. Кроме того, когда анализируется массовый экспериментальный материал не ясно попадает ли в сектор обзора облачность. Очень часто не ясно построение радиометрического комплекса и методика

проведения измерений. Не ясно представляет ли он (радиометрический комплекс) единую систему или он состоит из набора отдельных радиометров и только общую систему обработки данных.

Поэтому результаты, полученные различными авторами, имеют значительный разброс, а часто и противоречивы. Нет единого мнения о вкладе в поглощение молекулярного кислорода в различные сезоны года не только для диапазона длин волн 0,8-1,6 см. Отсутствие надежных общепринятых количественных данных о поглощении в различных формах облачности, которые можно было бы заложить в алгоритм расчета содержания водяного пара, также существенно усложняет внедрение в оперативную практику аэрологических наблюдений микроволновой радиометрии.

Для того, чтобы установить надежные связи между радиационными потоками в широком диапазоне длин волн и температурно-влажностным режимом атмосферы на различных высотах, помимо глубоких теоретических исследований необходима дальнейшее совершенствование методов измерения и контроля за облачностью, попадающей в область формирования излучения, поступающего в радиометрический комплекс. Это особенно важно для зимнего периода года.

До настоящего времени до конца не ясен вопрос об учете вклада жидкокапельной и паробразной влаги, содержащейся в облаке, в общий уровень излучения регистрируемого радиометрической аппаратурой.

При сопоставлении синхронных данных микроволновых радиометрических измерений с данными, полученными в процессе влажностного радиозондирования строгого совпадения результатов измерений даже общего содержания влаги в атмосфере ожидать не следует, даже если бы датчик влажности, установленный на радиозонде, и микроволновый радиометр точно измеряли влажность воздуха и уровень поступающего на вход радиометра излучения соответственно.

Это связано с тем, что радиозонд движется вместе с воздушным потоком, его может отнести даже при слабом ветре почти на десять километров от пункта радиометрических наблюдений. В дальнейшем необходимо доказать надежность методики сопоставления данных, полученных при таких совместных радиозондовых и радиометрических измерениях. Методика, применяемая при радиометрических измерениях, может существенно сказаться на результатах сравнительного анализа полученных данных.

Для изучения возможностей практического использования описанных выше методов была создана соответствующая микроволновая радиометрическая аппаратура и измерения проводились на длинах волн 0,8 см, 1,35 см, 1,6 см, а также в ИК-диапазоне 7-12 мкм.

В один и тот же день, обычно последовательно, проводились измерения влажности радиометрическими методами, что позволяло сопоставлять и анализировать полученные результаты. ИК-радиометрия использовалась для определения наличия облачности, высоты нижней границы облаков, как в режиме вертикального зондирования, так и при угловом сканировании.

Опираясь на многолетний опыт микроволновых и ИК радиометрических измерений предлагается создать радиометрическую аппаратуру и широко применять т.н. градиентные методы, позволяющие, как показывают расчеты, определять не только общее содержание водяного пара, но и наличие инверсий, т.е. областей, в которых происходят значительные локальные изменения влажности. Выполненные расчеты позволяют обосновать выбор оптимальных длин волн, предназначенных для влажностного зондирования атмосферы.

Таким образом, для разработки всепогодной системы в состав радиометрического комплекса должен входить ИК-радиометрический канал, через который можно будет получить дополнительную информацию, необходимую для интерпретации данных микроволновых измерений и перехода от них непосредственно к метеорологическим параметрам – влажности воздуха и количества влаги, содержащейся в облаке в жидкокапельной фракции, а также перенастраиваемый микроволновый радиометр, настройку которого можно изменить в пределах 40-50 ГГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горелик А.Г., Райкова Л.С., Фролов Ю.А. Сверхвысокочастотные радиометрические методы измерения влажности в нижней тропосфере. Метеорология и гидрология, 1975, №5, с. 106–111.
2. Горелик А.Г., Фролов Ю.А., Щукин Г.Г. Комплексные СВЧ- и ИК-радиометрические исследования облачности. Труды ГГО, 1989, вып 526, с. 3-15.
3. Горелик А. Г., Калашников В. В., Фролов Ю. А. Определение общего влагосодержания атмосферы по ее собственному радиоизлучению. Тр. ЦАО, вып. 103, 1972.
4. Иванов В.Э., Фридзон М.Б., Ессяк С.П. Радиозондирование атмосферы. Технические и метеорологические аспекты разработки и применения радиозондовых измерительных средств. г. Екатеринбург, Изд. УрО РАН, 2004.
5. Гурвич А. С., Ершов А. Г., Наумов А. П., Плечков В. М. Исследование влагосодержания атмосферы методом наземной радиотеплолокации. Метеорология и гидрология, №5, 1972.
6. Островский Е.В., Фридзон М.Б. Надежность и достоверность определения общего влагосодержания дистанционными методами при их сопоставлении с данными стандартного радиозондирования атмосферы. Научный вестник МГТУГА, 2006.
7. Atlas D.: Radar in Meteorology. American Met. Society, 1990, p. 806.
8. Жевакин С. А., Троицкий В. С. Радиоизлучение атмосферы и исследование поглощения сантиметровых волн. Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1, №2, 1958.
9. Жевакин С. А., Наумов А. П. Поглощение сантиметровых и миллиметровых радиоволн атмосферными парами воды. Радиотехника и электротехника, №8, 1964.
10. Van Vleck J. H., Weisskopf V. F. On the Shape of Collision-Broadened Lines; Reviews of Modern Physics, Volume 17, Number 2 and 3, April-July, 1945.
11. Barrett A. H., Chung V. K. A method for the determination of high-altitude water-vapor abundance from ground-based microwave observations. J. Geophys. Res., 67, No. 11, October, 1966.
12. Staelin D. H. Measurements and interpretation of the microwave spectrum of the terrestrial atmosphere. J. Geophys. Res., 71, No. 12, 1966.
13. Empirical Evaluation of Four Microwave Radiative Forward Models based on Ground-based Radiometer Data near 20-30 GHz – Cimini, D., Westwater, E.R., Keihm, S., Han, Y., Marzano, F. and Ciotti, P., Proc. ARM (Atmospheric Radiation Measurement), Science Team 2003, March 21-April 4 2003, Broomfield, Colorado, USA.
14. Ground-based Microwave Radiometer Measurements and Radiosonde Comparisons During the WVIOP2000 Field Experiment – Cimini, D., Westwater, E.R., Han, Y., and Keihm, S., Proc. ARM, Science Team 2002, Petersburg, Florida, USA.