

Метод микроволновой радиометрии атмосферы в задачах валидации спутниковой информации и радионавигационного обеспечения

Д.М.Караваев, Г.Г.Щукин

Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Ждановская, 13, e-mail: dm.karavaev@mail.ru

Рассмотрены состояние и перспективы развития микроволновой радиометрии для решения широкого круга задач прикладной метеорологии. Среди актуальных в докладе выделены два направления исследований, связанных с решением проблемы валидации спутниковых данных по параметрам атмосферы и поверхности, а также задачи координатно-временного и навигационного обеспечения, связанные с прецизионными измерениями тропосферной задержки сигналов радионавигационных систем.

Considered a status and prospects of microwave radiometry in applied meteorology. Among the topical report highlights two areas of research related to the problem of validation of satellite data on parameters of the atmosphere and surface, as well as navigation support associated with precise measurements of tropospheric delay of radio navigation signals.

Метод микроволновой радиометрии, основанный на приеме и интерпретации собственного радиотеплового излучения атмосферы, позволяет получать оперативную информацию о параметрах облачной атмосферы практически при любой погоде, находит широкое применение при решении различных задач метеорологии, физики атмосферы, океанологии, радиоастрономии, алтиметрии, радионавигации и т.д.

Отечественные исследования в области микроволновой радиометрии для задач метеорологии начались в конце 50-х-начале 60-х годов прошлого столетия и связаны с именами проф. К.С. Шифрина и А.Е. Башаринова [1]. Предпосылками для начала интенсивных исследований в области дистанционного зондирования атмосферы в микроволновом диапазоне являлись достижения в области радиофизики, распространения радиоволн в атмосфере Земли, полученные под руководством М.А. Колосова, А.В. Соколова, Н.А. Арманда (ИРЭ АН СССР, Москва), В.С. Троицкого, С.А. Жевакина (НИРФИ, Горький).

Особую значимость для исследования облачности и осадков в метеорологии приобрела в середине 60-х – начале 70-х годов разработка методов, основанных на совместном применении активно-пассивных комплексов, в состав которых входят метеорологический радиолокатор, работающий в активном режиме, и микроволновая радиометрическая аппаратура [2].

В настоящее время метод микроволновой радиометрии применяется для оснащения наземных пунктов зондирования атмосферы, подвижных платформ, самолетов-лабораторий, космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Микроволновые радиометры устанавливаются на космических аппаратах гидрометеорологического назначения, позволяют получать важные для задач прогноза погоды параметры атмосферы и поверхности Земли.

Задачи 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. Возможность получения информации о состоянии атмосферы определяется особенностями формирования излучения среды в различных участках частот

электромагнитного спектра. В безоблачной атмосфере молекулярное поглощение излучения происходит в основном в кислороде и водяном паре, при этом линии поглощения в кислороде центрированы при частотах 118 ГГц и 60 ГГц, а линии поглощения водяного пара - при частотах 183.16 ГГц и 22.235 ГГц. «Окна прозрачности» атмосферы (30-38 ГГц, 75-100 ГГц и 130-160 ГГц) и область малого поглощения излучения (5-15 ГГц) используются для зондирования облаков. В спектре радиотеплового излучения атмосферы также присутствуют линии примесных газов атмосферы (озона, закиси азота, окиси углерода и др.), что используется при исследовании состава атмосферы. 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 [3].

В случае облачной атмосферы влагозапас атмосферы (Q) и водозапас облаков (W) определяются из уравнений:

$$\begin{aligned} Q &= a_0 + a_1\tau(v_1) + a_2\tau(v_2) \\ W &= b_0 + b_1\tau(v_1) + b_2\tau(v_2), \end{aligned} \quad (1)$$

где 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 «окне прозрачности» атмосферы 31-38 ГГц. Погрешность определения влагозапаса атмосферы составляет около 5-10%, а водозапаса облаков - 20-30% (при отсутствии осадков). Для определения влагозапаса «сухой» или полярной атмосферы измерения поглощения атмосферы целесообразно проводить вблизи центра линии водяного пара 183.31 ГГц.

Экспериментальные исследования влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков выполнены в различных регионах: над океаном и над сушей. В экспериментах использовались автоматизированные микроволновые радиометры (частоты 21.0 ГГц или 22.2 ГГц и 36.5 ГГц). При этом для измерения характеристик излучения атмосферы применяются методики угломестных разрезов и абсолютных измерений радиояркостных температур атмосферы или комплексные методики.

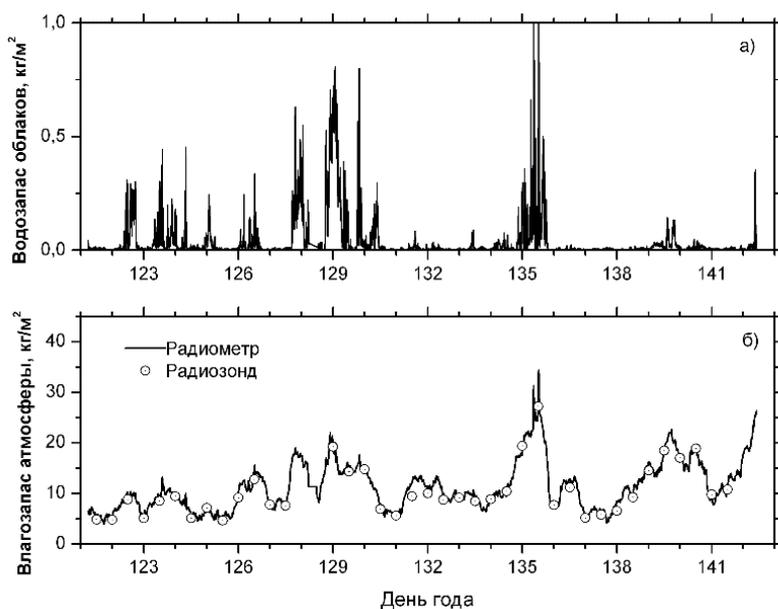


Рис.1. Временной ход влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков по данным микроволнового радиометра

В качестве примера, на рисунке 1 приведен временной ход влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в период с 1 по 21 мая 2007 г. в п. Воейково. Как видно из рисунка, влагозапас атмосферы изменялся от 3.2 кг/м^2 до 35 кг/м^2 . На рисунке показаны радиозондовые значения влагозапаса атмосферы, которые подтверждают результаты радиометрических измерений. Водозапас облаков не превышал 1.2 кг/м^2 .

Наблюдения в различные сезоны года в регионах средних широт показали, в диапазоне изменений влагозапаса атмосферы от 2 до 45 кг/м^2 , микроволновые радиометрические измерения влагозапаса атмосферы согласуются с данными синхронного аэрологического зондирования атмосферы (СКО около 1 кг/м^2), при этом измерения водозапасов слоистообразных облаков согласуются с моделями облаков, полученными по данным самолетного зондирования. Статистические распределения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков имеют сезонные особенности. Так, например, в зимний период в Ленинградской области водозапас облаков не превышал $0,28 \text{ кг/м}^2$ в 95% случаев, а значения водозапаса облаков, превышающие $0,52 \text{ кг/м}^2$, регистрировались лишь в 1% случаев, а в летний период водозапас облаков превышал уровень 0.8 кг/м^2 в 5% случаев, в весенний период над океаном водозапас облаков составлял менее $0,5 \text{ кг/м}^2$ в 90% случаев.

Методы комплексного температурно-влажностного зондирования атмосферы позволяют получать информацию о профилях температуры и влажности в тропосфере Земли. Оптимальные частоты зондирования атмосферы при решении задачи определения профилей температуры, влажности воздуха и водности облаков лежат в областях спектра (18-26) ГГц, (31-37) ГГц и (51- 58) ГГц. Погрешность определения температуры атмосферы составляет (0.5-1) К в приземном слое атмосферы и увеличивается с высотой до (2-2.5) К. Относительная погрешность определения влажности воздуха составляет (10-20) % и увеличивается в верхней тропосфере. Распространение получают серийные наземные многочастотные микроволновые радиометры температурно-влажностного зондирования атмосферы МР - 3000А (Radiometrics Corporation, США) и НАТPRO (Radiometer Physics GmbH, Германия). Из отечественных разработок выделим комплекс «Микрорадком» (ЦАО) [5]. В качестве примера на рис.2 приводится суточный ход температуры пограничного слоя атмосферы 0-1000м в Ленинградской обл. по данным метеорологического температурного профилера МТП-5.

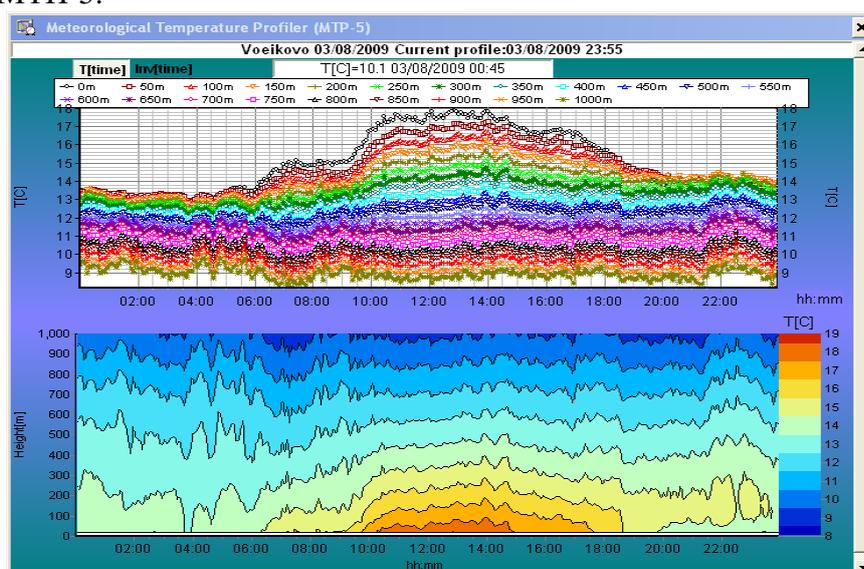


Рис.2. Пример визуализации данных МТП-5

Для определения профилей водяного пара в стратосфере возможно использовать результаты анализа спектров нисходящего собственного радиотеплового излучения атмосферы вблизи центра линий поглощения водяного пара 22.235 ГГц и 183.31 ГГц. 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), при этом погрешность определения влажности на высотах от 20 км до 80 км составляет около 20%.

Для определения средней водности облака необходимо использовать информацию о границах облака. Пассивно-активный метод определения средней водности конвективных облаков, основанный на измерении водозапаса зондируемой зоны с помощью микроволнового радиометра и ее протяженности с помощью активного канала пассивно-активной станции [2]. Средняя водность облака вдоль направления зондирования определяется из соотношения:

$$\overline{w}(\vec{l}) = W(\vec{l})/L(\vec{l}), \quad (2)$$

где $L(\vec{l})$ - протяженность зондируемой зоны облака (дождя), определяемая с помощью активного канала (радиолокатора);

$W(\vec{l})$ - водозапас облака вдоль направления визирования, определяемый с помощью радиометра.

Для перехода от водности к интенсивности дождя используются соотношения:

$$I = 3.4w^{1.33} \text{ (при } w \leq 0.32 \text{ г/м}^3\text{)}, \quad I = 2.8w^{1.17} \text{ (при } w > 0.32 \text{ г/м}^3\text{)}, \quad (3)$$

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 [4]. Такой ДМРЛ-С перспективен для оперативной практики радиолокационного штормоповещения для определения водозапаса, средней водности мощных облаков и интенсивности осадков, обнаружения и прогноза градовых облаков.

При исследованиях облачной атмосферы с осадками проявляются эффекты рассеяния и поляризации радиотеплового излучения [6], связанные с несферичностью частиц облаков и осадков, особенностью фазового состояния частиц облаков. Наиболее информативными являются первые три компонента вектор-параметра Стокса радиотеплового излучения, второй и третий параметры Стокса могут составлять величину (15-20) К 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 на частоте 36.5 ГГц (около 15 К), возможно связанные с ориентацией облачных частиц в электрическом поле облака. Поляризационные измерения перспективны для исследования облаков и осадков, отдельного определения мелкокапельной и крупнокапельной фракции водозапаса облаков.

Проблема валидации спутниковой информации

Создание и эффективное использование космических комплексов дистанционного зондирования Земли невозможно без проведения специальных программ валидации [7]. Основные задачи программы валидации включают широкий круг вопросов, в том числе, проверку функционирования бортовой аппаратуры, настройку комплексов предварительной и тематической обработки данных в период целевого использования аппаратуры, обеспечение сертификации информационных продуктов по различным показателям качества. Необходимой основой программ валидации являются

подсистема комплексов подспутниковых наблюдений и тестовых полигонов. Валидация информационных продуктов выполняется путем сопоставления результатов определения параметров атмосферы или характеристик поверхности по спутниковым данным с независимыми данными других систем наблюдения, как показывает мировой опыт, позволяют существенно улучшить качество спутниковой информации.

По данным Всемирной метеорологической организации микроволновые радиометры используются на космических аппаратах США, Японии, России, Китая, Индии, Бразилии, Европы и др. Отечественный микроволновый радиометр МТВЗА-ГЯ для исследования атмосферы и поверхности Земли устанавливается на космических аппаратах гидрометеорологического назначения Метеор-1М, очередной КА «Метеор-1М» №2 запущен 8 июля 2014 г. Среди зарубежных микроволновых радиометров отметим AMSR2/GCOM-W1, ATMS/Suomi NPP, SSMIS/DSMP, AMSU-A,-B /NOAA, MetOp, и др. Спутниковые микроволновые радиометры – многоканальные, многочастотные поляризационные радиометры, которые имеют частотные каналы вблизи центров линий поглощения водяного пара 22.23 ГГц и 183.31 ГГц (для влажностного зондирования атмосферы), в линии поглощения кислорода 50-60 ГГц (для температурного зондирования атмосферы), в окнах прозрачности 30-40 ГГц и 75-100 ГГц или малого поглощения в атмосфере 6.9-10.7 ГГц - для зондирования облаков, осадков и поверхности Земли. Информационные продукты включают: профили температуры атмосферного воздуха; профили влажности атмосферного воздуха; влагозапас атмосферы, водозапас облаков (над океаном); скорость приводного ветра; температура поверхности океана; интенсивность осадков; характеристики снежного и ледового покровов и др. Анализ информативности показывает, что потенциальные возможности МТВЗА-ГЯ и AMSU-A, B близки [8].

Большое значение для валидации спутниковых данных микроволновых радиометров имеют подспутниковые эксперименты над акваториями океанов. Интерес представляют сравнения спутниковых и судовых наблюдений атмосферы над океаном, выполненные в период комплексного эксперимента «АТЛАНТЭКС-90» для района Ньюфаундлендской зоны Атлантического океана. Непрерывные микроволновые радиометрические измерения выполнялись на частотах 21,0 ГГц и 36,2 ГГц с борта научно-исследовательского судна погоды НИСП «Волна» в период стационарной фазы эксперимента (координаты: 48° с.ш., 46° в.д.). На рис. 3 показаны три фрагмента спутниковых карт влагозапаса атмосферы по данным SSMI/DMSP F8 (www.remss.com), полученные в период с 16 по 18 апреля 1990 г. Район полигона НИСП выделен на рисунке квадратом.

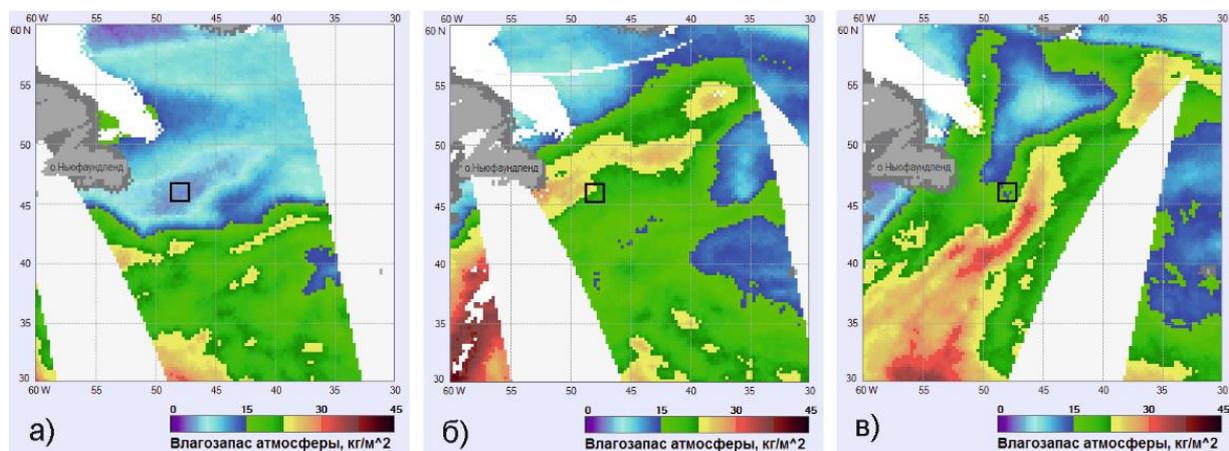


Рис.3. Поля влагозапаса атмосферы по данным SSMI/DMSP:
а) 16 апреля в 08:42 Гр.; б) 17 апреля в 08:30 Гр.; в) 18 апреля в 22:12 Гр.

На рис.4 приводится временной ход влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, полученный в тот же период времени по данным судового микроволнового радиометра. Из рисунков следует, что значительные изменения влагозапаса атмосферы (от 5 кг/м² до 35 кг/м²) были зафиксированы около 00 ч. Гр. 17 апреля, когда судовые наблюдения проводились в области атмосферного фронта циклона. Установлено, что спутниковые и судовые радиометрические измерения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков качественно согласуются. Судовые радиометрические измерения влагозапаса атмосферы также согласуются с данными синхронного аэрологического зондирования, среднеквадратичное отклонение (СКО) между данными радиометра и радиозонда составляет 2 кг/м².

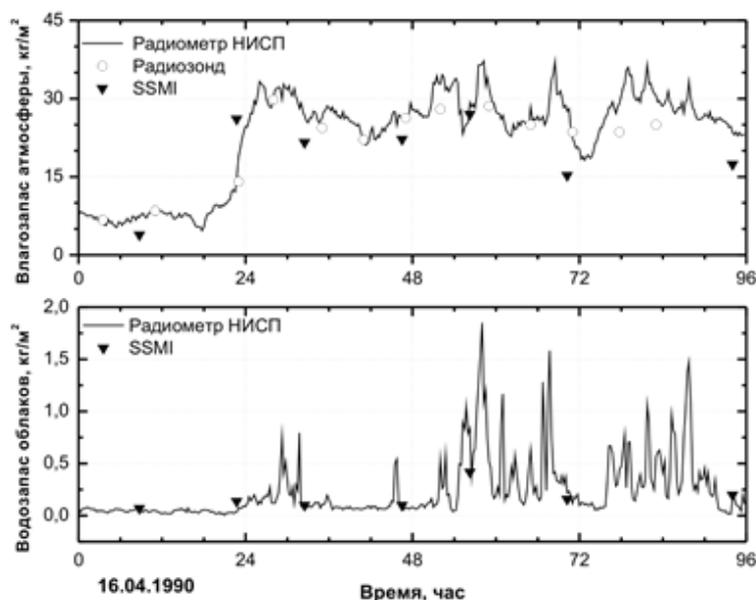


Рис.4. Влагозапас атмосферы и водозапас облаков по данным судовых микроволновых радиометров, радиозонда и SSMI/DMSP

Для оценивания качества спутниковых данных температурно-влажностного зондирования атмосферы выполнен ряд сравнительных экспериментов с привлечением данных сети аэрологического зондирования атмосферы Росгидромета [9]. Анализ сравнения результатов температурно-влажностного зондирования атмосферы по данным ATOVS/NOAA с данными аэрологического зондирования выполнен для Северо-Западного и Западно-Сибирского регионов Российской Федерации. По результатам сравнения сделаны следующие выводы: погрешность определения температуры воздуха составляет около 2,0-2,3 К на уровнях 850 -300 гПа, увеличивается на уровне 850-1000 гПа до 3,0 К (в зимний период) и 4,9 К (в летний период); погрешность определения удельной влажности на уровне 850 -1000 гПа составляет 0,7-0,8 г/кг в зимний период и 1,0-1,7 г/кг в летний период. Относительная погрешность определения удельной влажности составляет 15-30%. Отмечается незначительное завышение спутниковых значений удельной влажности в приземном слое атмосферы.

Необходимо отметить, что потенциальные возможности спутникового зондирования в микроволновом диапазоне частот полностью не реализованы [10]. Можно выделить следующие перспективные направления развития спутниковой микроволновой радиометрии: создание новых образцов мультиспектральных микроволновых радиометров с улучшенными характеристиками; совершенствование метрологического обеспечения микроволновых измерений и создание эталонной базы в микроволновом диапазоне; уточнение моделей формирования микроволнового

излучения системы «атмосфера-подстилающая поверхность» с учетом эффектов рассеяния и поляризации; разработка методических вопросов и алгоритмов тематической обработки данных, целевого использования оперативной спутниковой информации; создание комплексов приема, обработки, распространения и усвоения спутниковой информации; создание подсистемы валидации информационных продуктов спутниковых микроволновых радиометров.

Проблема валидации может решаться методом интеркалибровки, однако, в условиях ограничений по интеркалибровке роль подспутниковых экспериментов на основе специализированных полигонов и сети метеорологических наблюдений возрастает. В частности, для валидации данных температурно-влажностного зондирования атмосферы МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» могут быть использованы результаты сетевого аэрологического зондирования атмосферы, данные авиационного зондирования с прототипами спутниковой аппаратуры, а также, данные наземных измерений с использованием тестовых полигонов, организованных в различных регионах России. В настоящее время в Российской Федерации система постоянно действующих экспериментов валидации спутниковой информации гидрометеорологического назначения отсутствует. Очевидно, что создаваемая на базе наблюдательной системы Росгидромета и пяти полигонов (ААНИИ, СПбГУ, ГГИ, ИФА РАН и ИЛ СО РАН) система калибровки и валидации должна развиваться. Причем специализированные полигоны должны быть созданы в различных регионах Российской Федерации, необходимо создавать также подвижные платформы (самолетные, корабельные) для проведения подспутниковых измерений в различных регионах, над океанами. Для эффективного использования национальной системы специализированных полигонов в интересах Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ) целесообразно создание в Минобороны России оперативно-методического центра по использованию спутниковых данных

На Северо-Западе России получил развитие специализированный гидрометеорологический полигон-обсерватория ВКА имени А.Ф. Можайского (пос.Лехтуси, Ленинградская обл.) [10]. Обсерватория рассматривается как методический центр по испытанию новых образцов измерительных комплексов и средств гидрометеорологического обеспечения ВС РФ. В перечень измерительных средств входят различные типовые и перспективные измерительные комплексы, такие как автоматические метеорологические станции, аэрологические станции, приборы атмосферно-электрических измерений и грозопеленгаторы, метеорологические радиолокаторы, актинометрические станции, озонметрические станции, микроволновые радиометры, лидары, радиолокаторы ветрового зондирования и т.д. Применение наземных микроволновых радиометров в составе полигона перспективно для совершенствования аэрологического зондирования атмосферы, позволит улучшить эффективность наблюдательной системы особенно в период развития динамических процессов в атмосфере, связанных с прохождением атмосферных фронтов, развитием мезомасштабных явлений. Особенностью специализированного полигона является организация единого центра сбора и обработки гидрометеорологической информации, на базе которого должны отрабатываться современные технологии анализа, усвоения и использования разнородной метеорологической информации с возможностью оперативной передачи данных потребителям. Среди направлений научных исследований обсерватории выделим развитие новых технологий гидрометеорологических прогнозов, прогноза опасных явлений погоды, развитие новых методов обработки радиолокационной информации, атмосферно-электрические исследования атмосферы, задачи валидации спутниковой информации и т.д.

Задачи навигационного обеспечения

К приоритетным направлениям развития фундаментального сегмента единой системы координатно-временного и навигационного обеспечения относится разработка методов учета влияния тропосферы на распространение радионавигационных сигналов [11,12]. Для уменьшения погрешностей координатных определений за счет учета тропосферной задержки необходим комплексный подход: с одной стороны, необходимо совершенствовать модели тропосферы, повышая их восприимчивость к текущим изменениям состояния атмосферы, с другой стороны, необходимо создавать систему мониторинга атмосферы на основе высокоточных средств измерений и аппаратно-программных средств, обеспечивающих оперативную обработку и распространение информации. Одно из решений предполагает построение сети радиометров водяного пара на территории России для оснащения наземного комплекса ГЛОНАСС.

Основным препятствием для достижения современных требований к точности учета тропосферной задержки ($\sim 10^{-3}$ м) является необходимость учета влияния водяного пара на траектории распространения радионавигационных сигналов. Для решения этой проблемы перспективно применение метода микроволновой радиометрии, который является одним из наиболее точных методов определения влагозапаса атмосферы, тропосферной задержки, обусловленной наличием водяного пара [13].

Тропосферная задержка в зенитном направлении (L_t) может быть определена на основе микроволновых радиометрических измерений влагозапаса атмосферы (Q) и водозапаса облаков (W) из соотношения [14]:

$$L_t = L_d(\varphi, h, P_d) + b_1 Q + b_2 W, \quad (4)$$

где L_d – гидростатическая компонента задержки;

b_i - коэффициенты регрессии;

$P_d(z)$ – давление сухого воздуха;

φ, h – широта и высота наблюдательной станции, z – высота.

Тропосферная задержка, обусловленная наличием водяного пара, равна $L_q = b_1 Q$. Как показывают микроволновые измерения в Ленинградской области, L_q как правило, изменяется в диапазоне от 0.010 м до 0.300 м. В течение ряда лет в Ленинградской области проводились эксперименты с применением микроволнового радиометра водяного пара, направленные на исследование временной изменчивости влагозапаса атмосферы и тропосферной задержки, обусловленной наличием водяного пара $L_q \propto Q$ при различных метеоусловиях. Получены статистические оценки L_q для различных сезонов года, в частности, средние значения и средние квадратические отклонения тропосферной задержки, обусловленной водяным паром, для июля составляли 0.1624 м и 0.0371 м, а для января - 0.0533 м и 0.0198 м, соответственно. Как показали эксперименты, значительные вариации «влажной» компоненты задержки могут наблюдаться в области атмосферных фронтов. Изменения «влажной» компоненты задержки при прохождении атмосферного фронта могут составлять около 7 см/час. Наблюдаемые в Ленинградской области слоистообразные облака могут вносить вклад в тропосферную задержку, который составляет менее 1%.

В настоящее время существует ряд упрощенных подходов и моделей учета тропосферы, в том числе метод учета влияния тропосферы на распространение радионавигационных сигналов на основе модели NRLMSISE00 и модели влажности воздуха Северного полушария в соответствии с ГОСТ 26352-84. Однако, данная модель, как и другие тропосферные модели, описанные в литературе, не обеспечивают решения ряда прикладных навигационных задач. Для тестирования модели использовались данные наземной и спутниковой микроволновой радиометрии, позволяющей проводить измерения влагозапаса атмосферы в зените и оценивать

соответствующие тропосферные задержки радиоволн с высоким пространственным и временным разрешением, практически при любых погодных условиях в различных регионах. На рисунке 5 представлены результаты сопоставления расчетов задержек радиоволн на основе данных микроволновой радиометрии, расчетов по модели на основе ГОСТ 26352-84 и модели Международного союза электросвязи (МСЭ) для 22 дней измерений в районе Санкт-Петербурга. Как видно из рисунка, L_q изменялась в интервале от 0.024 м до 0.250 м, причем, максимальные значения составляющей тропосферной задержки L_q отмечались 14 мая, составляли около 0.250 м и объяснялись высоким содержанием водяного пара в области атмосферного фронта окклюзии. Среднее значение разницы модельных расчетов от средней измеренной задержки составила 0.04 м, а среднеквадратическое отклонение 0.031 м, соответственно. Для модели МСЭ -0.089 м и 0.031 м, соответственно.

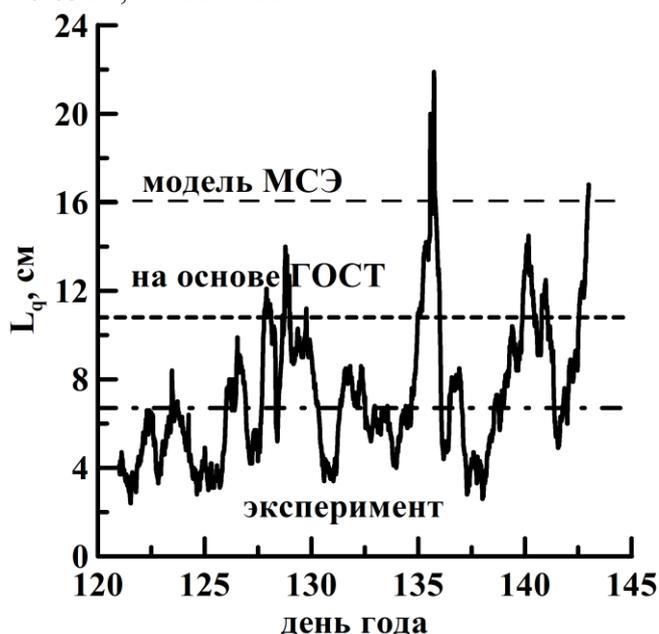


Рис. 5. Влажная компонента тропосферной задержки радиоволн по моделям МСЭ и ГОСТ, по данным наземного микроволнового радиометра

Сопоставление результатов расчета по модели с данными спутниковых микроволновых радиометрических измерений SSMI/DMSP над регионом Атлантического океана в диапазоне широт от 30° С.Ш. до 60° С.Ш. вдоль долготы 48°З.Д. для января, июля и октября 2014 г. показало разницу величин задержек в среднем по модулю 0.01-0.03 м при среднеквадратичном отклонении 0.047-0.053 м.

Развитие средств атмосферного сегмента координатно-временного и навигационного обеспечения связано развитием национальной системы глобального мониторинга тропосферы, оснащением наземной инфраструктуры средствами оперативного влажностного зондирования атмосферы. Развитие сети радиометров водяного пара на территории России позволит проводить непрерывные измерения тропосферной задержки, в зените или в выделенном направлении в пунктах наземного комплекса с высоким пространственным и временным разрешением в режиме реального времени при практически любой погоде.

В настоящее время известны ряд зарубежных разработок микроволновых радиометров водяного пара и тропосферной задержки, среди них: AWR-1 (Jet Propulsion Laboratory, США), MP-1500A (Radiometrics corporation, США); ASTRID (Onsala Space Observatory, Швеция); WAVE (Effelsberg Radio Telescope, Max Planck Institute for Radio Astronomy, Германия), HUMPRO и LWP (Radiometer Physics GmbH,

Германия). Среди последних отечественных разработок выделим радиометры водяного пара СКБ ИРЭ РАН (г. Москва) и ИПА РАН (Санкт-Петербург). В состав радиометра водяного пара входят: радиометрические приемники, антенная система, аппаратно-программный комплекс управления и сбора данных, специальное программное обеспечение, средства калибровки радиометрических измерений и др. Основные требования к характеристикам сетевого радиометра водяного пара следующие: центральные частоты 22,2 ГГц, 23,8 ГГц и 36,0 ГГц; полоса усиления 250 МГц (для 23,8 ГГц) и 1000 МГц (для 36,0 ГГц); сканирующая антенна с шириной луча (по уровню 3дБ) 3-4°; уровень боковых лепестков менее минус 30 дБ; флуктуационная чувствительность не хуже $0.07 \text{ Кс}^{-0.5}$, погрешность измерения радиояркостных температур не хуже 0,5 К; темп сбора данных 10 с. Погрешность определения влагозапаса атмосферы не хуже $0,5 \text{ кг/м}^2$, водозапаса облаков – $0,03 \text{ кг/м}^2$. Современные проблемы связаны с необходимостью совершенствования метрологического обеспечения микроволновых радиометрических измерений. Методическая основа метрологического обеспечения микроволновых измерений получила развитие в ФГУП «ВНИИФТРИ», перспективной задачей является создание национальных эталонов с погрешностью воспроизведения радиояркостной температуры 0,3-0,5 К.

Учитывая особенности пространственно-временной изменчивости полей влажности и других метеорологических элементов, для формирования оперативных глобальных или региональных карт тропосферных задержек перспективны разработки новых технологий усвоения разнородной метеорологической информации на основе численных схем прогноза.

Заключение

Выполненные исследования показали эффективность и перспективность применения метода микроволновой радиометрии для решения широкого круга прикладных задач метеорологии. Среди наиболее актуальных рассмотрены проблема валидации спутниковой информации, а также проблема развития атмосферного сегмента координатно-временного и навигационного обеспечения и пути развития методов учета тропосферной задержки на основе сети радиометров водяного пара.

Литература

1. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии.-Л.:Гидрометеиздат.1987. 283с.
2. Щукин Г.Г., Булкин В.В. Метеорологические пассивно-активные радиолокационные системы. Муром. 2009.166С.
3. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Состояние и перспективы применения микроволновой радиометрии атмосферы. Оптика атмосферы и океана. Т.28, №12, 2015, С.1122-1127.
4. Вылегжанин И.С., Жуков В.Ю., Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Развитие метода пассивно-активной радиолокации в задачах штормооповещения. Труды ВКА, вып. 653, С-Петербург:-ВКА, 2016.С.146-150.
5. 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. 26. № 6. С.459-465.
6. Ильюшин Я.А. Кутуза Б.Г. Компьютерное моделирование поляризационных характеристик теплового радиоизлучения дождевых осадков: Труды конференции // XXIV Всероссийская научная конференция по распространению радиоволн. Иркутск, июнь, 2014. Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2014. С.181-183.

7. 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.
8. Образцов С.П., Щукин Г.Г. Восстановление параметров атмосферы и подстилающей поверхности по данным спутниковых наблюдений в видимом, ИК и СВЧ-диапазонах электромагнитного спектра длин волн // Прикладная метеорология. 2004. Вып.5(553). С.65-98.
9. Щукин Г.Г., Чичкова Е.Ф., Караваев Д.М. Микроволновый радиометр для валидации спутниковых данных температурно-влажностного зондирования атмосферы. Радиолокационные и телекоммуникационные системы // Радиотехнические и телекоммуникационные системы.2013.№1.С.28-31.
10. Караваев Д.М., Кулешов Ю.В., Сахно И.В., Щукин Г.Г. Исследование потенциальной эффективности спутниковых микроволновых радиометров. Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Приложение за 2016. Материалы Четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли», С.193-199.
11. Караваев Д.М., Кулешов Ю.В., Сахно И.В., Суворов С.С., Щукин. Концепция построения сети радиометров водяного пара для наземного комплекса ГЛОНАСС. Труды III Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды», Т.2, С-Пб, 2014. С.83-88.
12. Щукин Г.Г., Караваев Д.М. Применение дистанционных методов зондирования атмосферы в задачах координатно-временных измерений навигационных систем // Труды ИПА. 2012. Вып.23. С.411-414.
13. Готюр И.А., Девяткин А.М., Караваев Д.М., Краснов В.М., Кулешов Ю.В., Мешков А.Н., Щукин Г.Г. Оценивание ионосферных и тропосферных задержек радионавигационных систем на основе данных сети российских опорных станций и микроволновой радиометрии // XXIV Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн», Иркутск, 29 июня-5 июля 2014 г., Труды конференции, Т.4, С.195-199.
14. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Метод микроволновой радиометрии в задачах тропосферной коррекции распространения радиосигналов глобальных навигационных систем // Радиотехнические и телекоммуникационные системы». 2013. №2(10). С.48-51.