

УДК 551.501

ПОДСПУТНИКОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ДЛЯ ЗАДАЧ КАЛИБРОВКИ И ВАЛИДАЦИИ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ РАДИОМЕТРОВ

© 2020 г. Д. М. Караваев¹ *, Ю. В. Кулешов¹, А. Б. Лебедев¹, С. С. Суворов¹, Г. Г. Щукин¹

¹Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

*dm.karavaev@mail.ru

Поступила в редакцию 31.10.2019 г.

После доработки 28.02.2020 г.

Принята к публикации 05.03.2020 г.

Подспутниковые эксперименты необходимы для калибровки и валидации данных спутниковых микроволновых зондировщиков, для повышения качества и эффективности использования спутниковой информации при решении задач гидрометеорологического обеспечения. В статье рассматриваются вопросы организации тестовых специализированных обсерваторий в подсистеме валидации спутниковых данных, на примере создаваемой в пос. Лехтуси Ленинградской области геофизической обсерватории, приводятся состояние и перспективы ее оснащения современными средствами контактных и дистанционных измерений метеорологических параметров, а также направления научных исследований.

DOI: 10.31857/S0023420620050039

Спутниковые микроволновые радиометры рассматриваются в числе приоритетных средств для решения прикладных задач метеорологии и океанологии. В России развитие метода спутниковой микроволновой радиометрии для задач метеорологии начиналось под руководством К.С. Шифрина и А.Е. Башаринова [2, 3] – в 1964 г. была утверждена тема НИР “Гроза”, направленная на исследование возможностей микроволновой радиометрии для решения задач спутниковой метеорологии. Первый космический аппарат *Космос-243* с микроволновым радиометром (длина волны 8.5, 3.4, 1.35, 0.8 см) на борту был запущен в 1968 г., в 1970 г. эксперимент продолжился на КА *Космос-384*. В настоящее время создается космическая система *Метеор-3М* гидрометеорологического и океанографического обеспечения на базе нескольких КА типа *Метеор-М* [7, 19], планируются к запуску очередные КА *Метеор-М* № 2-2, № 2-3 и др. оборудованные микроволновыми радиометрами МТВЗЯ-ГЯ [13].

Информация микроволновых радиометров востребована для многих приложений, например таких, как анализ динамики атмосферных процессов, исследование климатических изменений, численное прогнозирование погоды, исследование атмосферных катастроф и др. [14, 16]. Потребителями информации спутниковых микроволновых радиометров являются прогностические

центры погоды, осуществляющие разработку оперативных прогнозов погоды [20].

Необходимыми процессами технологии дистанционного зондирования Земли из космоса являются калибровка спутниковых данных и валидация получаемых информационных продуктов [1, 11]. Среди актуальных современных задач, определяющих дальнейшее развитие космической системы гидрометеорологического назначения, следует выделить развитие отечественной подсистемы калибровки и валидации данных спутниковых микроволновых радиометров.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СПУТНИКОВЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ РАДИОМЕТРОВ

В настоящее время согласно данным Всемирной метеорологической организации спутниковые микроволновые радиометры широко используются на космических аппаратах США, Японии, России, Китая, Индии, Бразилии, европейских стран. Среди зарубежных микроволновых радиометров можно выделить ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder) на КА *Suomi NPP*, SSMIS (Special Sensor Microwave Imager Sounder) на КА *DMSP*, AMSU-A, -B (Advanced Microwave Sounding Unit A, B) на КА *NOAA* и *MetOp*, AMSR-2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) на КА *GCOM-W1*, MHS (Microwave Humidity Sounder)

на КА *NOAA* и *MetOp*, MWHTS (Microwave Humidity and Temperature Sounder) на КА *FY-3C*, GMI (Global precipitation mission Microwave Imager) на КА *GPM*, WindSat на КА *Coriolis*, SAPHIR (Sondeur Atmosphérique du Profil d'Humidité Inter-tropicale par Radiométrie) на КА *Megha-Tropiques* и др. (<https://www.wmo-sat.info/oscar/satellites>).

Отечественный модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы МТВЗА-ГЯ устанавливался на полярно-орбитальных космических аппаратах гидрометеорологического и океанографического назначения *Метеор-М № 1* (запущенный 17.IX.2009 г., в 2014 г. исчерпал ресурс), *Метеор-М № 2* (запущенный 8.VII.2014 г.). МТВЗА-ГЯ имеет 29 радиометрических каналов в диапазоне частот от 10.6 до 183.3 ГГц. Для наблюдения используется коническое сканирование при угле визирования 53.3° (угол падения 65°), ширина полосы обзора составляет 1500 км, пространственное разрешение зависит от частоты и меняется от 89×189 км (на частоте 10.6 ГГц) до 9×21 км (на частоте 183.3 ГГц). Подробные характеристики МТВЗА-ГЯ приводятся на сайте ФГБУ “НИЦ “Планета” (<http://planet.iitp.ru/index1.html/>).

Спутниковые микроволновые радиометры обычно используют частотные каналы вблизи центров линий поглощения водяного пара 22.23 и 183.31 ГГц (для влажностного зондирования атмосферы), в линии поглощения кислорода 50–60 или/и 118 ГГц (для температурного зондирования атмосферы), в окнах прозрачности атмосферы 6.9–18.7, 30–40, 75–100, 140–160 ГГц для зондирования облаков, осадков и поверхности Земли. Калиброванные значения радиояркостных температур используются для восстановления искомым параметров атмосферы и характеристик поверхности. Основные информационные продукты спутниковых микроволновых радиометров включают: профили температуры и влажности атмосферного воздуха; влагозапас атмосферы и водозапас облаков (над океаном); скорость приводного ветра; температура поверхности океана; интенсивность осадков; характеристики снежного и ледового покровов и др.

Примеры построения алгоритмов решения обратной задачи определения влагозапаса атмосферы, водозапаса облаков, скорости приводного ветра, температуры поверхности океана даны в работах [6, 12, 33]. Комплексный подход к решению задачи температурно-влажностного зондирования атмосферы на основе обработки данных микроволновых и ИК-измерений в рамках метода статистической регуляризации получил развитие в работе [8]. Эти исследования показали, что несмотря на некоторые отличия в выборе частот зондирования информационные возможности радиометра МТВЗА близки к зарубежным аналогам, таким как AMSU-A, -B. Алгоритмы восста-

новления профилей температуры и влажности воздуха на основе обработки данных ИКФС-2, МТВЗА-ГЯ, МСУ КА *Метеор-М* получили развитие в работах [25, 26].

Результаты численных экспериментов по исследованию возможностей температурно-влажностного зондирования атмосферы [8] подтверждаются в ряде натурных экспериментов. Например, при сравнении данных температурно-влажностного зондирования атмосферы АTOVS КА *NOAA* (в состав которой входят микроволновые радиометры AMSU-A и MHS, а также HIRS – ИК-радиометр) с данными сети аэрологического зондирования атмосферы Росгидромета для Северо-Западного и Западно-Сибирского регионов [10, 17]. Погрешность определения температуры воздуха составляет около 2.0–2.3 К на уровнях 850–300 гПа, увеличивается на уровнях 1000–850 гПа до 3.0 К (в зимний период) и 4.9 К (в летний период); погрешность определения удельной влажности на уровнях 1000–850 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. Приведенные результаты сравнительных экспериментов согласуются с ранними исследованиями, полученными в работе [24].

Калибровка спутниковых данных и валидация получаемых информационных продуктов являются необходимыми процессами технологии дистанционного зондирования Земли из космоса, направленными на повышение качества получаемой информации и подтверждение требований целевого использования получаемой информации. Как показывает международный опыт, реализация проектов по калибровке и валидации позволяет улучшить качество спутниковой информации. Актуальной задачей развития отечественной космической системы гидрометеорологического и океанографического назначения является создание постоянно-действующей подсистемы подспутниковых экспериментов, направленных на калибровку и валидацию информационных продуктов микроволновых радиометров космических аппаратов *Метеор-М* [3, 5, 9].

МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ И ВАЛИДАЦИИ

Калибровка и валидация информационных продуктов спутниковых радиометров выполняется путем сопоставления результатов определения физических параметров среды по спутниковым данным с данными других независимых средств измерений, статистическом анализе полученных расхождений (оцениванию систематических смещений, случайных погрешностей), выявления их

зависимостей от географического района, времени, состояния подстилающей поверхности.

Первым этапом обработки данных микроволновых радиометров является получение калиброванных значений радиоярких температур, которые являются базовым информационным продуктом для дальнейшей тематической обработки и использования спутниковых данных. Один из методов калибровки и валидации по радиоярким температурам основан на сравнении модельных расчетов полей радиотеплового излучения системы “атмосфера–поверхность” с измеренными радиояркими температурами и уточнении соответствующих калибровочных коэффициентов или функций перехода. Реализация метода требует проведения комплексных (контактных и дистанционных) высокоточных измерений метеорологических параметров атмосферы, исследований характеристик поверхности в районах тестовых полигонов.

Начиная с 1987 г., в конструкции радиометра SSMI KA *DMSP* применяется способ “внутренней” бортовой калибровки, который применяется и в последующих разработках микроволновых радиометров KA *DMSP*. В соответствии с ним, на каждом скане антенны на вход облучателей последовательно подаются излучение реликтового фона (~ 2.75 К) и “теплого” апертурного абсолютно черного излучателя с контролируемой температурой. Такая схема бортовой калибровки позволяет для линейного усилительного тракта получать калиброванные значения антенных температур.

Подобная схема используется для выполнения “внутренней” бортовой калибровки радиометра МТВЗА-ГЯ, которая проводится на каждом скане антенны с периодом 2.5 с и позволяет получать значения антенных температур [15]. Полученные результаты летных испытаний выявляют определенные трудности при переходе от измеренных антенных температур к радиоярким температурам. Известно, что погрешности измерения радиоярких температур связаны с погрешностью учета излучения, принятого через боковые лепестки диаграммы направленности антенны, корректным учетом потерь в рефлекторе антенны и кросполяризационных искажений, а также нелинейностью усилительного тракта радиометрических приемников и т.д. [27, 28]. Для контроля или коррекции модели перехода к радиоярким температурам могут быть использованы методы “внешней” калибровки.

Особенности метода “внешней” калибровки на частотах в “окнах прозрачности” атмосферы рассмотрены в работах [11, 21]. Предлагается в качестве тестовых использовать естественные участки земной поверхности, причем в качестве “горячих” используются протяженные участки дождевых лесов реки Амазонки или Конго, а в качестве

“холодного” эталона — участки “гладкой” поверхности океана при безоблачной, “сухой” атмосфере. Процедура калибровки заключается в сравнении статистических характеристик расхождений модельных (расчетных) и наблюдаемых радиоярких температур системы “атмосфера–поверхность” с учетом поляризации [18].

Для калибровки радиометрических каналов температурного зондирования используются сравнения измеренных и расчетных значений радиоярких температур на основе моделей переноса радиотеплового излучения в атмосфере с использованием исходных данных мировой сети радиозондирования атмосферы (для высот до 20 км) [15]. Авторы показали, что смещения для большинства температурных каналов МТВЗА-ГЯ составляли не более 1.5 К. Для стратосферных каналов (в диапазоне высот от 20 до 40 км) предлагается использовать данные радиопросвечивания атмосферы сигналами глобальной навигационной спутниковой системы [30], при этом погрешность метода калибровки может составлять около 1 К.

Трудности вызывают вопросы “внешней” калибровки каналов влажностного зондирования атмосферы вблизи центра линии водяного пара 183.31 ГГц [31], связанные с погрешностью контактных измерений влажности воздуха [32], особенно при низких температурах в верхней тропосфере и около тропопаузы. Метод интеркалибровки [22, 29], основанный на сопоставлении радиоярких температур спутниковых микроволновых радиометров диапазона 183.31 ГГц, таких как ATMS, MHS, SSMIS, GMI, SAPHIR, обнаруживает лучшее согласие ($\text{CKO} \leq 0.5$ К) между измерениями GMI, MHS (KA *MetOp-A*, *-B* и *NOAA-18*, *-19*), SAPHIR.

Для выполнения калибровки и валидации данных температурно-влажностного зондирования атмосферы микроволнового модуля МТВЗА-ГЯ KA *Метеор-M*, могут также выполняться сравнительные эксперименты с привлечением данных сети аэрологического зондирования атмосферы и результаты анализа метеополей Гидрометцентра, а также данные наблюдений специализированных полигонов, и специально-оборудованных авиационных, корабельных, передвижных средств наблюдений. Оснащение специализированных полигонов должно включать аэрологическое температурно-влажностное зондирование атмосферы (высота зондирования около 30 км) с радиозондами повышенной точности, дополнительные измерения параметров среды, такие как микроволновые измерения профилей температуры и влажности воздуха в тропосфере, водозапаса облаков, влагозапаса атмосферы; наблюдения состояния поверхности мобильными системами (измерения температуры, влажности, излучательных характеристик и т.д.). Специализированные тестовые по-

лигонов необходимо организовать в различных географических регионах (климатических зонах).

В работе [8] отмечается зависимость информативности спутниковых микроволновых радиометров от типа подстилающей поверхности. Над водной поверхностью с высокой эффективностью восстанавливается влагозапас атмосферы, водозапас облаков, скорость приводного ветра, решаются задачи определения температуры водной поверхности при наличии облачности и характеристик ледового покрова. Поэтому подспутниковые эксперименты с необходимостью проводятся в различных регионах океана с использованием измерительных комплексов самолетов-лабораторий и судов погоды. Они обеспечивают проведение прямых измерений метеорологических параметров атмосферы и характеристик поверхности океана, и являются необходимой моделирующей основой для получения модельных расчетных значений радиояркостных температур с учетом поляризации и уточнения алгоритмов решения задач микроволновой радиометрии.

Первым примером подспутникового микроволнового эксперимента над океаном являлся советско-американский эксперимент “Беринг”, который проводился в северной части Тихого океана в 1973 г. [4]. В экспедиционных исследованиях участвовали два корабля (НИСП Прибой и ледокол US Coast Guard Staten Island), три самолета-лаборатории — Ил-18 ГГО, Ан-24 ААНИИ, Convoyer-990 NASA Galileo-1, КА *Метеор* и *Nimbus-5* и др. Проводились самолетные измерения микроволнового излучения водной поверхности при различных условиях, а также сопутствующие комплексные прямые судовые измерения параметров среды (температура поверхности, волнение, характеристики ледяного покрова, наличие зон жидких осадков и т.д.).

В 1976 г. был проведен второй советско-американский микроволновый эксперимент САМЭКС [5]. Советская сторона проводила эксперимент в северной части Тихого океана (использовались самолет лаборатория Ил-18, НИС Академик Королев), американские специалисты работали в северной части Атлантического океана, а в экспериментах использовались радиометры диапазона длин волн 0.8, 1.35, 1.6, 2.0, 3.2, 8.5 см. Основной задачей исследований было совершенствование использования в синоптическом анализе данных о волнении моря, поле ветра, распределении осадков, получаемых по данным микроволновых измерений. К задачам советской части эксперимента относились: анализ характеристик радиотеплового излучения поверхности моря для определения температуры, параметров ветра, волнения моря, а также оценка погрешности определения общего влагосодержания атмосферы, водозапаса облаков, интенсивности осадков по ра-

диотепловому излучению. В результате удалось улучшить методы интерпретации данных бортовых микроволновых радиометров сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн. Одной из решаемых задач ставилось отработка методики измерений влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков с помощью судового микроволнового радиометра. В последующих экспериментах использовался усовершенствованный вариант судового двухчастотного радиометра, работающего на частотах около 22.235 и 36.5 ГГц.

В качестве примера на рис. 1 приводятся результаты судовых микроволновых радиометрических измерений влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков над районом Северной Атлантики, полученных в период эксперимента “Атлантэкс-90”. Были выполнены сравнения значений влагозапаса атмосферы, полученных по данным судовых (микроволновых радиометрических и радиозондовых) и спутниковых измерений. Как видно из рисунка, данные по влагозапасу атмосферы, полученные различными методами в рамках эксперимента, согласуются. При этом среднеквадратическое отклонение (судовой радиометр — радиозонд) для влагозапаса атмосферы составляет около 2 кг/м^2 . Различие в пространственном разрешении спутниковых и наземных радиометров затрудняет получение количественных оценок среднеквадратического отклонения между спутниковыми и наземными измерениями водозапаса облаков. Применение метода сравнения гистограмм водозапаса облаков, полученных при различных погодных условиях, указывает на качественное согласие судовых и спутниковых измерений. Причем, для случаев наблюдения протяженных областей горизонтально-однородных слоистообразных облаков над океаном различия полученных значений водозапаса облаков составляли около 15%.

Дополнительные методы калибровки и валидации данных спутниковых микроволновых радиометров включают программы валидации с использованием сети аэрологических станций, сопоставление данных информационных продуктов с данными объективного анализа метеорологических полей, сопоставление данных информационных продуктов МТВЗА-ГЯ с данными зарубежных спутниковых систем, подспутниковые измерения с применением самолетов-лабораторий и аналогов спутниковых микроволновых радиометров, а также интеркалибровку с данными хорошо откалиброванных спутниковых микроволновых радиометров, имеющих аналогичные частотные каналы (при развитии группировки космических аппаратов).

Подспутниковые эксперименты, обеспечивающие проведение прямых измерений метеорологических параметров в период сеансов спутниковых наблюдений, являются необходимой модели-

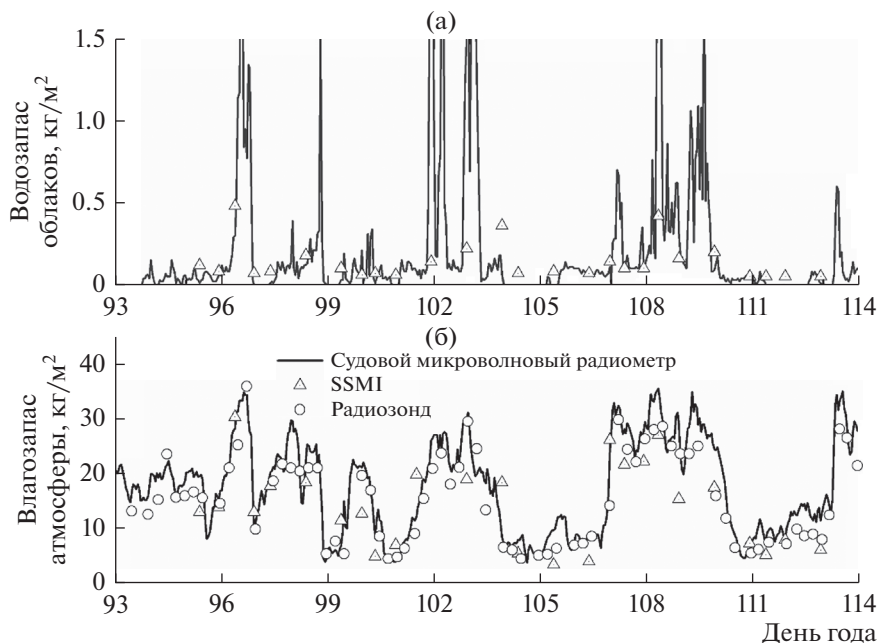


Рис. 1. Водозапас облаков (а) и влагозапас атмосферы (б) по данным судового микроволнового радиометра, SSMI DSMP и радиозондирования.

рующей основой для совершенствования метода микроволновой радиометрии, настройки алгоритмов решения задач, в итоге — повышения качества получаемой информации. Для организации и осуществления экспериментов по калибровке и валидации данных спутниковых микроволновых радиометров необходимо развивать инфраструктуру для проведения подспутниковых экспериментов с привлечением методов авиационных и судовых наблюдений, а также совершенствовать методы и средства контактных и дистанционных измерений метеорологических параметров атмосферы и характеристик поверхности.

РАЗВИТИЕ СЕТИ ТЕСТОВЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ОБСЕРВАТОРИЙ

Создаваемая на базе наблюдательной сети Росгидромета и специализированных полигонов система калибровки и валидации должна развиваться, причем тестовые полигоны — геофизические обсерватории, оборудованные современной высокоточной измерительной аппаратурой, должны быть созданы в различных климатических и географических районах Российской Федерации (Roshydromet calibration/validation system for satellite data and products: http://www.wmo.int/pages/prog/sat/meetings/documents/GSICS-EP-15_Doc_05_ROSHYDROMET.pdf).

На северо-западе России (пос. Лехтуси, Ленинградская обл.) создается специализированная геофизическая обсерватория Военно-космиче-

ской академии имени А.Ф. Можайского, которая предназначена для предоставления возможности практического освоения методик, технологий и особенностей эксплуатации современных и перспективных средств информационного гидрометеорологического обеспечения. Среди задач обсерватории, как методического центра по испытанию новых образцов измерительных комплексов и средств гидрометеорологического обеспечения, также входят подготовка специалистов и проведение научных исследований в области прикладной гидрометеорологии.

Среди основных задач геофизической обсерватории выделим следующие:

а) мониторинг состояния атмосферы, ионосферы, экологической обстановки различными техническими средствами, создание постоянно пополняемого архива данных гидрометеорологической информации;

б) испытание методов и технологий прогноза опасных явлений погоды на основе применения методов и средств дистанционного зондирования атмосферы и данных наземных гидрометеорологических измерений;

в) проведение подспутниковых наблюдений и решения задач калибровки и валидации спутниковой информации.

В структуре специализированной обсерватории выделены три функциональных подсистемы: комплекс средств гидрометеорологических и геофизических измерений; автоматизированная система сбора, обработки и представления гидроме-

теорологической и геофизической информации; подсистема взаимодействия и обмена данными с потребителями.

Комплекс средств гидрометеорологических и геофизических измерений обеспечивает: получение значений метеорологических параметров у поверхности земли; получение радиолокационной информации о полях облачности и осадков, и связанных с ними опасных явлениях погоды (гроза, град, смерч, ливни) в радиусе 250 км при измерении радиолокационной отражаемости и 100 км при измерении радиальных скоростей гидрометров; СВЧ-радиометрические измерения микроволнового излучения атмосферы в диапазоне частот 18–59 ГГц и определение профилей температуры и влажности в тропосфере, влагозапаса атмосферы и влагозапаса облаков в тропосфере; определение грозоопасности в радиусе до 300 км с вероятностью обнаружения молниевых разрядов не менее 0.8 на базе грозопеленгационной сети, состоящей из 4 датчиков грозовой активности; измерение значений напряженности электрического поля в районе обсерватории с целью диагностирования опасных явлений и грозовой (активности) деятельности в ближней зоне (до 30 км); зондирование ионосферы в диапазоне частот 1–30 МГц и мониторинг ветрового режима атмосферы на высотах от 80 до 110 км.

В перечень средств гидрометеорологических и геофизических измерений входят различные типовые и перспективные приборы и 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. Особенностью специализированной обсерватории является организация единого центра сбора и обработки гидрометеорологической информации, на базе которого должны реализовываться современные технологии анализа, усвоения и использования разнородной гидрометеорологической информации.

В настоящее время в состав средств обсерватории включены следующие аппаратно-программные комплексы (АПК): измерения приземных гидрометеорологических параметров; радиолокационных измерений облаков и осадков; аэрологического зондирования атмосферы; геофизических исследований ионосферы; экологических исследований; приема и обработки спутниковых данных; атмосферно-электрических измерений и грозопеленгации.

В состав АПК-1 входят автоматизированная метеорологическая станция (АМС) АМРИИК для измерения приземных значений влажности и

температуры воздуха, атмосферного давления, параметров ветра, осадков, метеорологической дальности видимости, высоты нижней границы облачности, температуры почвы.

В состав АПК-2 включены метеорологические радиолокаторы некогерентные МРЛ-5 (частоты 9.5 и 2.9 ГГц) и доплеровский радиолокатор МРМЛ (частота 9.3 ГГц). Для повышения качества анализа полей водности конвективных облаков и интенсивности осадков рассматривается вариант модернизации МРЛ-5 для работы в режиме пассивно-активных наблюдений.

В состав АПК-3 включены аэрологическая станция Полюс и средства микроволновых радиометрических измерений для измерений влагозапаса облаков, температурно-влажностных параметров тропосферы. Информация наземных микроволновых радиометров востребована в периоды между запусками радиозондов, особенно при развитии динамических процессов в атмосфере, связанных с прохождением атмосферных фронтов.

АПК-4 включает средства зондирования ионосферы, включая ионозонд (диапазон частот от 1.8 до 32 МГц) для исследования радиофизических характеристик ионосферы и УКВ-радиолокационный комплекс диагностики метеорных следов МК-31 (диапазон частот 46 МГц).

АПК-5 обеспечивает анализ данных исследования экологической обстановки.

АПК-6 включает средства приема информации метеорологических ИСЗ “Сюжет-МБ” и обеспечивает обработку и представление спутниковой информации.

АПК-7 включает средства атмосферно-электрических измерений на базе приборов измерения напряженности электрического поля “Рябина” и сеть грозопеленгаторов в Ленинградской области для определения местонахождения гроз.

Для организации автоматизированного сбора, обработки и представления разнородных данных метеорологических наблюдений получили развитие аппаратно-программный комплекс на базе АРМ-ВГМ-М (автоматизированное рабочее место военного гидрометеоролога) [23].

Области применения создаваемого комплекса средств гидрометеорологической и геофизического мониторинга Геофизической Обсерватории Лехтуса:

- совершенствование технологий сверхкраткосрочного прогноза опасных явлений погоды на основе данных комплексного дистанционного зондирования атмосферы с помощью средств ГФО (МРЛ-5, грозопеленгатор, Рябина, СВЧ-радиометры, СПСИ “Сюжет-МБ”);

- разработка методов диагноза и сверхкраткосрочного прогноза электрически опасных зон в облаках, не дающих разрядов, на основе приме-

нения методов и средств ДЗА (прежде всего ГПД, ПНП и МРЛ) и в итоге определение предгрозового состояния облаков;

— исследование с помощью ионозонда атмосферных процессов в ионосфере и их влияния на состояние тропосферы (прежде всего на изменение электрического состояния);

— мониторинг состояния атмосферы и ее загрязнения, включая исследование влияния мегаполиса на экологическую обстановку;

— совершенствование радиолокационных критериев обнаружения опасных явлений погоды (ливень, гроза, град, сдвиг ветра) на основе применения метеорологических радиолокаторов;

— исследование параметров ветра в мезосфере с помощью МК-31.

Среди перспективных измерительных комплексов рассматриваются автоматизированный комплекс распределенных неконтактных датчиков осадков, актинометрическая станция, озонметрическая станция, лидары атмосферного зондирования. Дополнительно, для валидации спутниковых радиолокационных данных на территории обсерватории планируется разместить 9 калибровочных пассивных уголкового отражателей, имеющих геодезическую привязку. Предполагается развитие подсистемы обмена данными с организациями федерального и регионального уровней, которые решают задачи получения, обработки и систематизации гидрометеорологической и геофизической информации (ГГМЦ МО РФ, 373 Центр ВМФ, НИЦ “Планета”, ИПГ, ВНИИГМИ-МЦД, НПО “Тайфун”, РГГМУ, СПбГУ), а также объединение усилий организаций, расположенных на территории Ленинградской области и имеющих экспериментальную базу, для проведения комплексных экспериментов (СПбГУ, РГГМУ, ААНИИ, ИНОЗ РАН, ИПА РАН и обсерватория “Светлое”).

Научно-методические разработки и опыт создания специализированной обсерватории планируется распространить для организации на территории России подсистемы из трех типовых специализированных геофизических обсерваторий. Для проведения подспутниковых измерений в различных климатических районах, в том числе над океанами рассматриваются варианты создания подвижных авиационных и корабельных платформ. Для эффективного использования национальной системы специализированных полигонов подспутниковых экспериментов в интересах Вооруженных Сил Российской Федерации целесообразно создание в Минобороны России оперативно-методического центра по использованию спутниковых данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены состояние и перспективы развития геофизической обсерватории Лехтуса Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, как прототипа сетевого подспутникового полигона в подсистеме калибровки и валидации спутниковой информации. Представлен состав комплекса измерительных средств параметров и состояния природной среды установленных, а также предполагаемых для оснащения геофизической обсерватории. Решение проблемы калибровки и валидации спутниковой информации направлено на повышение эффективности гидрометеорологического обеспечения на основе отечественных космических комплексов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шукин Г.Г.* Задачи, состояние и перспективы подспутниковых наблюдений // Сборник докладов. Берлин, АН ГДР. Изд.: Природа, Интеркосмос, 1989. С. 44–68.
2. *Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т.* Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974.
3. *Шифрин К.С., Рабинович Ю.И., Шукин Г.Г.* Исследование поля микроволнового излучения в атмосфере // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 1968. Вып. 222. С. 5–18.
4. Советско-американский эксперимент “Беринг” / Под ред. Кондратьева К.Я., Рабиновича Ю.И., Нордберга В. Л.: Гидрометеиздат, 1975.
5. *Степаненко В.Д., Рабинович Ю.И.* Комплексный эксперимент САМЭКС // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Вып. 422. 1980. С. 3–6.
6. *Степаненко В.Д., Шукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю.* Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1987.
7. Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения “Метеор-3М” с космическим аппаратом “Метеор-М” № 1 / Под ред. Макриденко Л.А., Волкова С.Н., Трифонова Ю.В. и др. М.: ФГУП “НПП ВНИИЭМ”, 2009.
8. *Образцов С.П., Шукин Г.Г.* Определение температурно-влажностных характеристик атмосферы и подстилающей поверхности по данным спутниковых СВЧ-радиометрических измерений // Метеорология. Ученые Записки. 2006. № 3. С. 28–45.
9. *Караваев Д.М., Кулешов Ю.В., Лебедев А.Б. и др.* Исследование потенциальной эффективности спутниковых микроволновых радиометров. Вопросы электромеханики // Труды ВНИИЭМ. М.: Корпорация “ВНИИЭМ”, 2016. С. 193–199.
10. *Караваев Д.М., Кулешов Ю.В., Шукин 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.
11. *Митник Л.М., Митник М.Л.* Калибровка и валидация — необходимые составляющие микроволно-

- вых радиометрических измерений со спутников серии Метеор-М № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 95–104.
12. Митник М.Л., Митник Л.М. Восстановление паросодержания атмосферы и водозаписа облаков над океаном по данным микроволнового зондирования со спутников DMSP, TRMM, AQUA и ADEOS-II // Исследование Земли из космоса. 2006. № 4. С. 34–41.
 13. Болдырев В.В., Горобец Н.Н., Ильгасов П.А. и др. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 243–248.
 14. Успенский А.Б. Современное состояние и перспективы дистанционного температурно-влажностного зондирования земной атмосферы // Исследование Земли из космоса. 2010. № 2. С. 26–36.
 15. Успенский А.Б., Крамчанинова Е.К., Косцов В.С. и др. Развитие системы внешней калибровки и валидации данных измерений микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ КА “Метеор-М” № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 27–35.
 16. Шарков Е.А. Дистанционные исследования атмосферных катастроф // Исследование земли из космоса. 2010. № 1. С. 52–68.
 17. Шукин Г.Г., Чичкова Е.Ф., Караваев Д.М. Валидация спутниковых данных температурно-влажностного зондирования атмосферы для Северо-Западного региона РФ // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2013. Вып. 15. С. 42–45.
 18. Богородский В.В., Козлов А.И., Тучков Л.Т. Радиотепловое излучение земных покровов. Л.: Гидрометеиздат, 1977.
 19. Asmus V.V., Zagrebaev V.A., Makridenko L.A. et al. Meteorological satellites based on Meteor-M polar orbiting platform // Russian Meteorology and Hydrology. 2014. V. 39. № 12. P. 787–794.
 20. Gayfulin D.R., Tsyrlunikov M.D., Uspensky A.B. et al. The usage of MTVZA-GYa satellite microwave radiometer observations in the data assimilation system of the Hydrometcenter of Russia // Russian Meteorology and Hydrology. 2017. V. 42. № 9. P. 564–573.
 21. Kroodsma R.A., McKague D.S., Ruf C.S. Vicarious cold calibration for conical scanning microwave imagers // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2017. V. 55. № 2. P. 816–827.
 22. Berg W., Bilanow S., Chen R. et al. Intercalibration of the GPM radiometer constellation // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2016. V. 33(12). P. 2639–2654.
 23. Gotyur I.A., Kuleshov Yu.V., Makov A.B. et al. A technology of forecasting weather conditions for space rocket launching at the Vostochnyi cosmodrome using the automatic meteorological system data // Russian Meteorology and Hydrology. 2015. V. 40. № 11. P. 758–765.
 24. Li J., Wolf W., Menzel P. Global Soundings of the Atmosphere from ATOVS Measurements: The Algorithm and Validation // J. Applied Meteorology. 2000. V. 39. № 8. P. 1248–1268.
 25. Polyakov A.V. The Method of Artificial Neural Networks on Retrieving Vertical Profiles of Atmospheric Parameters // Atmospheric and Oceanic Optics. 2014. V. 27. № 3. P. 247.
 26. Polyakov A.V., Timofeev Yu.M., Virolainen Ya.A. Using Artificial Neural Networks in the Temperature and Humidity Sounding of the Atmosphere // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2014. V. 50. № 3. P. 330.
 27. Weng F., Zou X., Sun N. et al. Calibration of Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS) // J. Geophys. Res. Atmos. 2013. V. 118. P. 1–14.
 28. Weng F., Yang H. Validation of ATMS Calibration Accuracy Using Suomi NPP Pitch Maneuver Observations // Remote sensing. 2016. V. 8. № 4. P. 332.
 29. John V.O., Allan R.P., Bell W. et al. Assessment of intercalibration methods for satellite microwave humidity sounders // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2013. V. 118. № 10. P. 4906–4918.
 30. Zou X., Lin L., Weng F. Absolute Calibration of ATMS Upper Level Temperature Sounding Channels Using GPS RO Observations // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2014. V. 52. № 2. P. 1397–1406.
 31. Brogniez H., English S., Mahfouf J.F. et al. A review of sources of systematic errors and uncertainties in observations and simulations at 183 GHz // Atmos. Meas. Tech. 2016. № 9. P. 2207–2221.
 32. Dirksen R.J., Sommer M., Immeler F.J. et al. Reference quality upper-air measurements: GRUAN data processing for the Vaisala RS92 radiosonde // Atmos. Meas. Tech. 2014. № 7. P. 4463–4490.
 33. Wentz F.J. A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave/imager // J. Geophysical Research. 1997. V. 102. № C4. P. 8703–8718.