

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Иванов В. Э., Гусев А. В., Игнатков К. А., Кудинов С. И., Носков В. Я., Плохих О. В.
Уральский федеральный университет (УрФУ)
им. Первого президента России Б.Н.Ельцина, Екатеринбург, Россия, E-mail: noskov@oko-ek.ru

«Опыт — дитя мысли, а мысль — дитя действия.
Нельзя учиться только по книгам». (Б. Дизраэли)

Аннотация — Дана историческая справка, выполнен анализ современного состояния и намечены пути дальнейшего развития систем радиозондирования атмосферы. Среди перспектив отмечена целесообразность разработки и внедрения мобильной цифровой системы, использующей сигналы навигационных спутниковых платформ ГЛО-НАСС/GPS для слежения за радиозондом и определения его местоположения, а также направления и скорости ветра. Другая перспектива связана с модернизацией существующих систем путём применения автодинных СВЧ генераторов в качестве миниатюрных и дешёвых приёмо-передатчиков — ответчиков сигналов запросного радиолокатора.

I. Введение

Получение точной и оперативной информации о состоянии атмосферы является необходимым условием составления синоптических, авиационных и иных прогнозов, необходимых во многих сферах человеческой деятельности. Одним из основополагающих видов гидрометеорологических измерений являются производимые в свободной атмосфере аэрологические измерения. Среди них наиболее важное и значимое место занимает радиозондирование атмосферы, осуществляемое с помощью радиозондов, поднимаемых в свободной атмосфере газонаполненной оболочкой [1].

В настоящее время радиозонды, являющиеся основным средством получения информации о состоянии тропосферы и нижней стратосферы, позволяют получить наиболее качественные данные. Зондирование — это массовые измерения, производимые одновременно в огромном количестве пунктов, расположенных во всех уголках земного шара. На станциях аэрологического зондирования этих пунктов, объединённых между собой в единую сеть, ежедневно производят, как минимум, 1...2 выпуска радиозондов в целях измерения температуры, влажности, направления и скорости ветра. В некоторых пунктах (космодромы, аэропорты и пр.) зондирование выполняется значительно чаще.

Аэрологические сети России, Украины, Беларуси и других стран являются неотъемлемой частью Глобальной мировой сети радиозондирования Всемирной службы погоды и проводят аэрологические наблюдения в соответствии с требованиями, сформулированными в нормативных документах Всемирной Метеорологической Организации (ВМО). Одной из целей ВМО, как сказано в её Конвенции, является содействие стандартизации и повышению качества наблюдений. С этой целью ВМО периодически принимает Технический регламент, который предписывает странам — членам ВМО процедуры и порядок метеорологических измерений.

В связи с этим к техническим средствам проведения аэрологических измерений, в том числе связанных с радиозондированием атмосферы, постоянно повышаются требования к их параметрам и характеристикам, методам обработки и представления ин-

формации. При этом общий прогресс в области автоматизации измерений, обработки данных и телекоммуникаций, также стимулирует создание новой, более совершенной техники радиозондирования, отвечающей современным требованиям.

Следуя известной мудрости: «Без знания прошлого нет будущего, а без будущего — нет настоящего», материалы доклада представлены в следующем порядке. Сначала дана краткая историческая справка о роли и вкладе отечественных учёных и конструкторов в развитии технических средств радиозондирования атмосферы (см. раздел II). Затем описан десятилетний период «новой истории» развития техники радиозондирования, начиная с середины 90-х годов прошлого века (см. раздел III). Результаты творчества именно этого периода активно внедряются на сети аэрологического радиозондирования нашей страны в настоящее время. В разделе IV представлены результаты разработок последних 5...6 лет. Здесь же нашли отражение наши идеи относительно дальнейших усовершенствований аппаратуры и методов радиозондирования атмосферы.

II. Историческая справка

Изобретателем радиозонда и метода его использования для исследования атмосферы является выдающийся учёный-аэролог профессор Павел Александрович Молчанов (см. рис. 1). Впервые идея метода радиозондов была высказана им в 1923 г. в его научно-популярной брошюре «Воздушный океан». П. А. Молчанов предложил прибор с радиопередатчиком, передающий данные измерений по радио в пункт приёма. Таким образом, данные зондирования могли быть получены немедленно и независимо от дальнейшей судьбы прибора. Эта идея для того времени была исключительно смелой, поскольку радиотехника во всем мире только начинала развиваться.

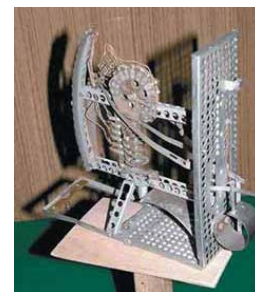


Рис. 1. Профессор П. А. Молчанов и механическая часть его гребенчатого радиозонда.

Fig. 1. Professor P. Molchanov and a mechanical part of his comb radiosounding

Широко известна историческая дата 30 января 1930 г., когда в Павловской аэрологической обсерватории профессор П. А. Молчанов осуществил запуск

созданного им первого в мире радиозонда [2]. С этого крупнейшего события в истории аэрологии и начинается развитие радиозондирования атмосферы в СССР, а затем и в других странах.

Применение на практике метода радиозондов для аэрологических наблюдений за рубежом можно проследить по датам первых удачных выпусков радиозондов. Так, первый успешный выпуск радиозонда собственной конструкции в Германии состоялся в мае 1931 г., во Франции — в сентябре 1930 г. В Финляндии первый удачный радиозонд поднялся в воздух в 1931 г., а в США собственные радиозонды начали появляться только в 1935 г.

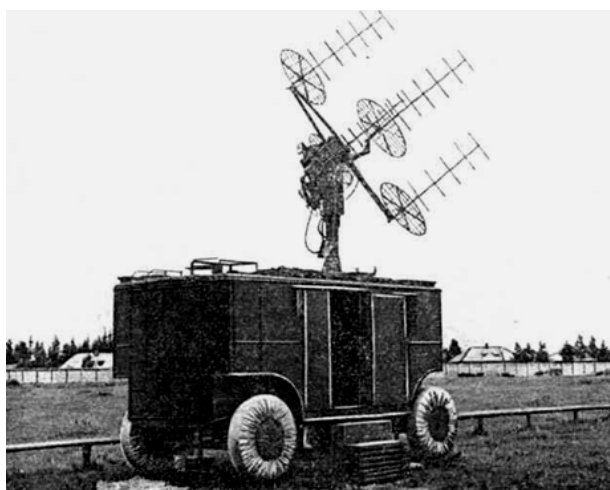


Рис. 2. Система радиозондирования атмосферы «Малахит» (мобильный вариант).

Fig. 2. Atmosphere radiosounding system «Malahit» (mobile version)

Первая в мире сеть станций регулярного радиозондирования атмосферы начала действовать в 1935 г. в Советском Союзе. Было организовано 17 таких станций; число их с каждым годом увеличивалось и к 1940 г. достигло 40. Быстрое развитие сети, отвечавшее возросшим запросам и техническим возможностям, шло в послевоенные годы: в 1950 г. действовало уже 106 станций, в 90-е годы — 240. В настоящее время российская аэрологическая сеть насчитывает более 150 станций, из них две станции находятся в Антарктиде. При этом мировая сеть зондирования насчитывает более 900 пунктов.



Рис. 3. Мобильный и стационарный варианты КРЗ «Метеор-РКЗ», «Метеорит-РКЗ»

Fig. 3. Mobile and stationary versions of CRZ "Meteor-RKZ", "Meteorite-RKZ"

Одним из важнейших этапов развития технических средств исследования атмосферы явилось объединение принципов телеметрии и методов определения текущих координат зонда. Это позволила наряду с температурным зондированием получать

данные о высотном распределении ветра. Для этих целей предпринимались попытки применения радиопеленгаторов (1936 -1937гг.) и оптических теодолитов. Позже (1943 г.) по инициативе В. В. Костарева довольно несовершенный метод радиопеленгации уступил своё место радиолокационному способу определения координат, который в отличие от оптического метода сделал наблюдения ветра всепогодными. Было предложено «механическое» совмещение этих принципов путём установки на зонде пассивного отражателя, значительно увеличившего дальность сопровождения. В качестве радиолокационных станций (РЛС) использовались станции СОН-2 и специально разработанные метеорологические радиолокаторы "Нептун".

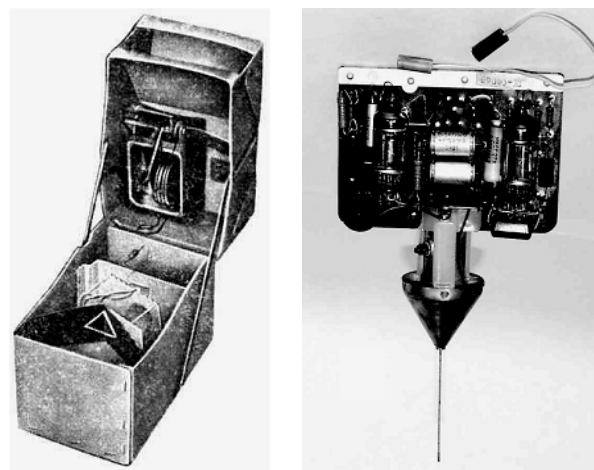


Рис. 4. Общий вид конструкции радиозонда РКЗ (а) и его СПП (б) на частоту 1780 МГц.

Fig. 4. Appearance of radiosounding construction RKZ (a) and its ST (b) for the frequency of 1780 MHz

В 50-е годы была создана система радиозондирования «Малахит» (1955 г.), использующая для измерения наклонной дальности принцип радиотеодолита (см. рис. 2). Эта система, обеспечивающая повышенную точность получения данных, была первой, объединившей измерения температуры, давления, влажности, скорости и направления ветра.

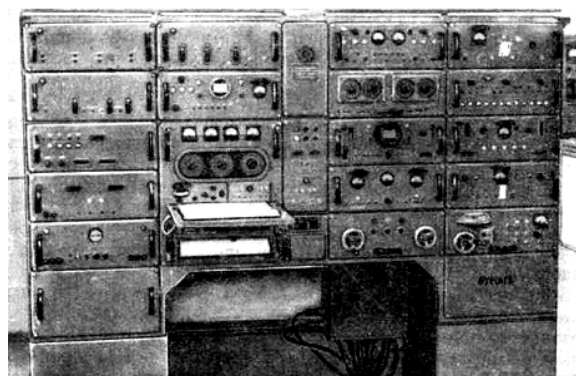


Рис. 5. Общий вид главного пульта управления РЛС «Метеорит-2»

Fig. 5. Appearance of the main control board of radar "Meteorite-2"

Функциональное объединение принципов радиолокации и радиотелеметрии произошло в конце 50-х годов с созданием комплексной системы зондирования

ния (КРЗ) «Метеор» (см. рис. 3). В данной системе было принято «революционное» решение использовать в радиотелеметрическом передатчике сверхрегенеративный режим работы, который предварительно был отработан в системе «Малахит» и показал хорошие результаты [1, 3]. В этом режиме сверхрегенеративный приём-передатчик (СПП) дополнительно выполняет функции активного ответчика запросного радиолокатора (см. рис. 4). Такое решение, не усложнив бортовую аппаратуру, значительно увеличило дальность сопровождения зонда и точность определения его координат.

Данный принцип построения системы радиозондирования, остающийся до настоящего времени основным, использовался в последующих поколениях КРЗ, например, в КРЗ «Метеорит» и «Метеорит-2», созданных в начале 70-х гг. (см. рис. 5). Система «Метеорит» превосходила для своего времени лучшие зарубежные системы комплексного радиозондирования атмосферы.

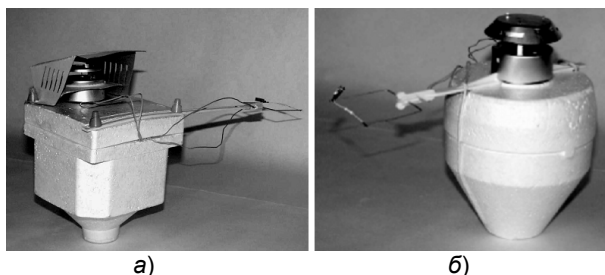


Рис. 6. Общий вид радиозондов MAP3-2 (а) и MP3-3 (б).
Fig. 6. Appearance of radiosoundings MARZ-2 (a) and MRZ-3 (b)

В последующие годы программа и технология аэрологических наблюдений продолжали совершенствоваться, появлялись новые требования к техническим средствам зондирования. Например, задача обеспечения безопасности полетов самолетов потребовала разработку малогабаритного радиозонда. Кроме того, стояла острая необходимость дальнейшего снижения энергопотребления и повышения надежности системы зондирования.



Рис. 7. Антенна РЛС системы радиозондирования АВК-1-МРЗ
Fig. 7. The radar antenna of radiosounding system AVC-1-MRZ

Такая работа, начиная с 1971 г., была выполнена по программе «Микрозонд» с участием УПИ им. С. М. Кирова и ряда других организаций. В результате работы, проведенной НПО «Пульсар» (г. Москва) в тесном сотрудничестве с УПИ им. С. М. Кирова, был разработан и подготовлен к промышленному производству СВЧ-модуль типа М45302А. Он оказался весьма простым, технологичным и надежным, обеспечивал необходимые радиотехнические параметры в качестве мощного СВЧ-генератора, работающего в составе СПП. Этот модуль нашел широкое применение во всех последующих типах отечественных радиозондов MAP3 и MP3 (см. рис. 6), которые были полностью выполнены на полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах по техническим решениям, разработанным в УПИ им. С. М. Кирова [1, 4].



Рис. 8. Общий вид пульта управления АВК-1.
Fig. 8. Appearance of the control board of AVC-1

Следующим крупным шагом в развитии систем радиозондирования явилась разработка в период 1980-90 гг. нового автоматизированного вычислительного комплекса (АВК) системы радиозондирования АВК-1-МРЗ (см. рис. 7 и 8), использующей радиозонды МРЗ. Данная система является полностью автономной, автоматизированная обработка данных радиозондирования непосредственно на аэрологических станциях обеспечивала также выдачу в центры сбора информации стандартных аэрологических телеграмм [5].

Комплексы устанавливались на аэрологической сети с 1986 года и многие работают достаточно надежно до сих пор, быстро осваиваются операторами аэрологами, облегчают их труд, сокращают время получения аэрологических телеграмм. В системе АВК-1-МРЗ стали использоваться новые малогабаритные радиозонды типа МРЗ-3, имеющие массу менее 500 г. (см. рис. 6 б) [1].

В 1992 году произошла остановка производства СВЧ-модулей для радиозондов на московском НПО «Пульсар». Поэтому в течение 1993-1994 гг. сотрудники кафедры Технологии и средств связи УГТУ-УПИ по заказу ОАО «Метео» (г. Екатеринбург) проводили исследования по созданию конструкции и технологии производства полупроводникового приемопередатчика радиозонда в условиях собственного производства ОАО «Метео». Данная задача была успешно решена на уровне изобретения [6].

Даже из этой, краткой исторической справки видно, что совершенствование техники и метода радио-

зондирования атмосферы всегда было тесно связано с развитием радиоэлектроники и отражало научные, технические и технологические достижения в этой области.

III. Анализ современного состояния

В середине 90-х вследствие известных процессов в общественно-политической жизни нашей страны создалась ситуация значительного отставания в развитии средств радиозондирования от мирового уровня. В это тяжёлое для страны время (февраль 1997 г.) в условиях отсутствия централизованного финансирования необходимо отметить заслугу гендиректора ОАО «Метео» В. П. Колотыгина и главного инженера Ю. С. Лосева, по инициативе которых было принято смелое решение о создании нового поколения радиолокационного комплекса температурно-ветрового зондирования атмосферы. Решение этой проблемы было поручено коллективу кафедры Технологии и средств связи УГТУ-УПИ. Согласно этому заказу в короткие сроки была выполнена разработка нового малогабаритного радиолокатора «Бриз» (см. рис. 9).



Рис. 9. РЛС «Бриз», июль, 2001г., обсерватория Верхнее Дуброво.

Fig. 9. Radar "Breeze", July, 2001., Observatory in Verhnee Dubrovo

В конструкции новой РЛС были применены технологические решения, основанные на современных достижениях СВЧ радиотехники и электроники, широко использовании микропроцессорных средств цифровой обработки информации и управления комплексом. Техническую и организационную части работы возглавил заведующий кафедрой В. Э. Иванов. Конструкция РЛС была совершенно оригинальной, заимствовала от прототипа РЛС АВК-1 только одну деталь – оптическую трубу для юстировки координат по азимуту и углу места.

Отличительными особенностями новой РЛС явились значительное снижение массогабаритных характеристик и энергопотребления (в 15 – 20 раз) и построение системы полностью на современной полупроводниковой элементной базе. Широкое применение нашли методы цифровой обработки и управления. Мощность излучения передатчика РЛС была снижена в 100 раз при сохранении оперативного радиуса действия системы в 250 км. Результаты работы неоднократно докладывались на российских и международных конференциях [7, 8].

В сентябре 1997 г. первый функционирующий макет РЛС «Бриз» участвовал на Международной выставке в г. Линдау, Германия, а в ноябре 1997 г. – на Международной выставке «Гидрометеорология – человеку» в Санкт-Петербурге.

В 1999 г. по заказу гидрометслужбы Республика Беларусь был изготовлен и поставлен опытный образец аэрологической РЛС «БРИЗ», который по настоящее время успешно эксплуатируется в г. Брест.

В 2002 году также по «инициативе снизу» на базе ОАО УПП «Вектор» (г. Екатеринбург) с участием УГТУ-УПИ были начаты работы по созданию усовершенствованного аэрологического радиолокационного вычислительного комплекса (АРВК) «Вектор-М» (см. рис. 10). В 2004 году в ЦАО Росгидромета (г. Долгопрудный) были проведены успешные испытания рабочего макета РЛС «Вектор-М». В октябре 2006 года рабочий образец комплекса был поставлен на опытную эксплуатацию на аэрологической обсерватории г. Омска и также стал выдавать информацию в мировую сеть аэрологических данных.

В течение 2007-2008 годов ОАО УПП «Вектор», участвуя в тендере, по заказу Росгидромета РФ выпустил партию в 30 штук РЛС «Вектор-М», которые в настоящее время эксплуатируются на аэрологической сети РФ.



Рис. 10. Комплект аппаратуры комплекса «Вектор-М» (слева) и вид сбоку на РЛС «Вектор-М» (справа).

Fig. 10. Complex "Vector-M" components set (left) and side view of the radar, "Vector-M" (right)

Создание аэрологического радиолокатора со средней мощностью излучения менее мощности сотового телефона (0,1Вт) при обеспечении оперативной дальности не менее 250 км, конечно же, было значительным достижением, отражающим уровень теоретических исследований и способность коллектива осуществлять практические разработки в не простых современных условиях.



Рис. 11. Общий вид радиозондов MRZ-N1 (а), MRZ-ZAK1 (б).

Fig. 11. Radiosoundings MRZ-N1 (a), MRZ-ZAK1 (b) appearance

Параллельно с разработкой РЛС велись работы по совершенствованию бортовой части системы. причём, за период с 1995 года по 2004 год по заказам ОАО «Метео» и ОАО «Радий» (г. Касли) было разработано ещё несколько новых типов радиозондов и узлов к ним (см. рис. 11), проводилось их технологическое сопровождение: 1) для радиопеленга-

ционной системы «МАРЛ-Т» создан радиозонд МРЗ-10 с новыми датчиками метеовеличин и вертикальной компоновкой корпуса; 2) разработан радиозонд МРЗ-ЗАМ, получивший сертификат качества; 3) разработан радиозонд МРЗ – ЗПМ с поверхностным монтажом установочных элементов, имеющие массу около 200 г.; 4) запущен в серийное производство (2004 г.) с высоким экономическим эффектом новый СВЧ-модуль приемопередатчика радиозонда собственного производства.

Результаты научно-технических разработок кафедры демонстрировались на международных выставках в Германии, странах СНГ, России, на Уральской выставке вооружений 1999 – 2004 гг. В 1998 и 1999 гг. были получены Серебряная и Золотая Медали на международных выставках «Уральские выставки».



Рис. 12. Антенна, её внешний вид с радиопрозрачным укрытием и рабочее место оператора АРВК МАРЛ-А.

Fig. 12. The antenna, its appearance with radiotransparent radome and operator position ARVK MARL-A

В настоящее время разработки сотрудников кафедры используются в серийном производстве на четырех предприятиях радиоэлектронного профиля Среднего Урала. Уместно подчеркнуть, что наши теоретические и практические результаты исследований бортовой и наземной аппаратуры отечественной системы радиозондирования и полученный научно-технический задел были использованы сотрудниками ЦАО Росгидромета при разработке радиолокатора МАРЛ (см. рис. 12).

Станции МАРЛ-А, также как и «Вектор-М» отличаются принципиально новым подходом к конструированию подобных комплексов. Эта новизна выражается в построении станции в виде одноблочной конструкции с максимальным упрощением механических и сборочных работ при производстве и исключением из производственного цикла работ по изготовлению точной механики.

В основу АРВК МАРЛ-А положено использование персональной ЭВМ с программной реализацией большинства узлов радиолокатора, что делает его конструкцию гибкой, легко адаптирующейся к изменениям условий эксплуатации. Результаты зондирования могут быть направлены потребителям по любым каналам связи.

Первый такой радиолокатор запущен в работу на аэрологической станции в Ростове-на-Дону в 2001-м году. К настоящему времени на сети установлено уже более 50-ти АРВК МАРЛ-А. В ближайшие 5...10 лет запланировано перевести на новые АРВК всю аэрологическую сеть России. Радиолокаторы МАРЛ-А используются в Казахстане, а также ими оснащен космодром Байконур.

IV. Перспективы развития

Перспективы дальнейшего развития техники радиозондирования, прежде всего, связаны с совершенствованием существующей аппаратуры, отдельных её элементов и узлов. Целью их обычно являются повышение точности измерений, снижение эксплуатационных затрат, улучшение технических характеристик, удобства обслуживания и пр. Другим направлением является поиск принципиально новых возможностей в реализации задачи радиозондирования атмосферы. Ниже изложены предварительные результаты нашей работы в развитии указанных направлений.

Современные требования к методикам выполнения аэрологических измерений и измерительным средствам, сформулированные в последних версиях Технического регламента Всемирной метеорологической организации требуют принципиально нового подхода к решению проблемы их метрологического обеспечения. Необходимо обеспечить единство и заданную достоверность измерений на всей аэрологической сети. Однако сравнительный анализ основных метрологических характеристик зарубежных и отечественных аэрологических радиозондов, приведенных в [9], показывает, что по точности измерения температуры отечественные радиозонды уступают в два-три раза, а по влажности в полтора – два раза.

В связи с этим, в настоящее время с активным участием УрФУ (УГТУ-УПИ) проводится НИОКР по созданию радиозонда, отвечающего международным стандартам. Основные требования к новому радиозонду состоят в следующем:

- 1). Предельная погрешность измерения температуры в условиях эксплуатации не более $\pm 0,5^\circ$;
- 2). Предельная погрешность измерения относительной влажности не более $\pm 5,0\%$;

- 3). Чувствительность приемопередатчика радиозонда МРЗ-3МК должна быть не хуже – 63 дБ/Вт·м²;
- 4). Относительная нестабильность поднесущей (суперирующей) частоты АРЗ не хуже 0,01%;
- 5). Полетная масса АРЗ не должна превышать 0,3 кг.

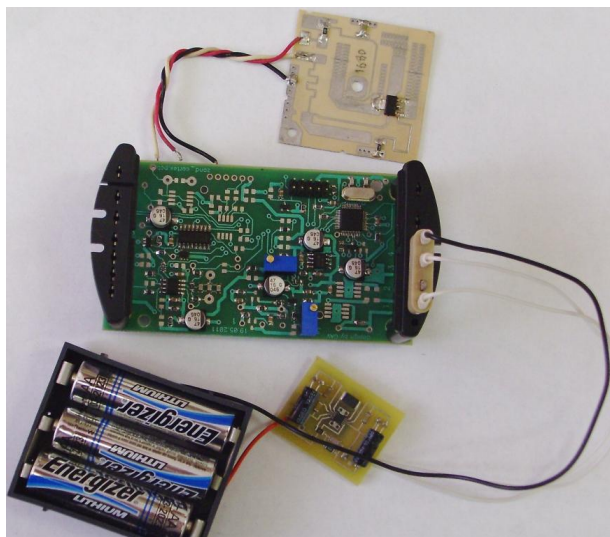


Рис. 13. Состав (сверху вниз), внутренняя «начинка» и внешний вид в предполётной готовности радиозонда МРЗ-3МК.

Fig. 13. Radiosounding MDZ-3MK composition (from top to bottom), the inner "filling" and appearance in preflight readiness

Совершенствование измерительных преобразователей и первичных датчиков, применение микро-

контроллеров при обработке их сигналов и формировании сигналов радиозонда, а также кварцевая стабилизация частоты суперирующего генератора позволили создать новый радиозонд, названный МРЗ-3МК, удовлетворяющий всем указанным выше требованиям. Готовится также модификация этого радиозонда с пакетной передачей данных по цифровому каналу. С небольшой доработкой он будет совместим с РЛС «Вектор-М», а в перспективе и с МАРЛ-А.

Радиозонды состоят из нескольких функциональных узлов (см. рис. 13): радиоблока, датчика температуры, датчика влажности, батареи, корпуса, держателя для крепления датчиков, шнуров для обвязки и подвешивания радиозонда к оболочке. При установке радиотехнического блока в корпус образуется узел радиозонда - называемый блоком. При оснащении блока радиозонда батареей, держателем датчиками и шнурами образуется радиозонд.

В новом образце зонда усовершенствована схема измерения температуры и влажности, обеспечено более стабильное формирование длительностей сигнала телеметрии (патент на п/м №105477). Разработана новая схема питания радиозонда (патент на п/м №82344), впервые позволившая найти альтернативу водоактивируемым батареям, а по некоторым показателям и превзойти их. Литиевые элементы питания, примененные в новой схеме, выдерживают воздействие низких температур и высоких токов разряда. Позволяют увеличить непрерывную работу радиозонда до 3,5 часов в условиях воздействия экстремально низких температур. На ряд новых технических решений поданы заявки на изобретения.

Системы радиозондирования атмосферы в настоящее время, как отмечалось выше, используют сверхрегенеративные приёмо-передатчики (СПП) [1], которые, не смотря на их постоянное совершенствование [11,12], обладают рядом принципиальных недостатков. Основной из них связан с широким спектром излучения СПП, который, как известно [1], работает в импульсном режиме. Для решения проблемы удовлетворения современным требованиям по электромагнитной совместимости РЭС, в представленных на данной конференции докладах [13,14] дано теоретическое обоснование возможности применения для этих целей автодинных приёмопередатчиков (АПП), которые конструктивно и функционально ничем не отличаются от первых, но обладают рядом существенных преимуществ.

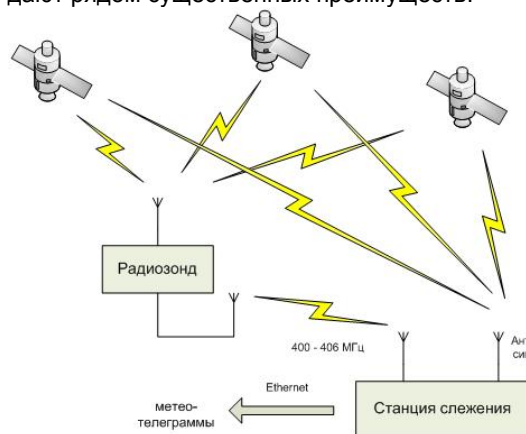


Рис. 14. Принцип работы системы радиозондирования «Полус».

Fig. 14. Radiosounding system "Polus" principle of operation

Другим перспективным направлением в настоящее время является создание и внедрение системы радиозондирования, построенной на основе спутниковых радионавигационных систем GPS [15, 16]. Подобные системы в начале 90-х годов были разработаны зарубежными фирмами Air, Vaisala, Graw и поставляются заказчикам [17]. Эти станции имеют принципиальные преимущества по экономичности, габаритам, мобильности, и использованию на подвижных объектах. Перспективы развития этого направления в России нашли отражение в работе [18].

В УрФУ и ОАО «Радий» в настоящее время ведутся совместные работы по созданию мобильной навигационной системы радиозондирования атмосферы (СРА) на базе СРНС ГЛОНАСС/ GPS, названной «Полюс» (патент на п/м № 109297). Данная система состоит из наземной базовой станции слежения (БСС) и запускаемого в свободный полет аэрологический радиозонд (АРЗ). Опосредованно в систему радиозондирования «Полюс» включены СРНС ГЛОНАСС и GPS (см. рис. 14).

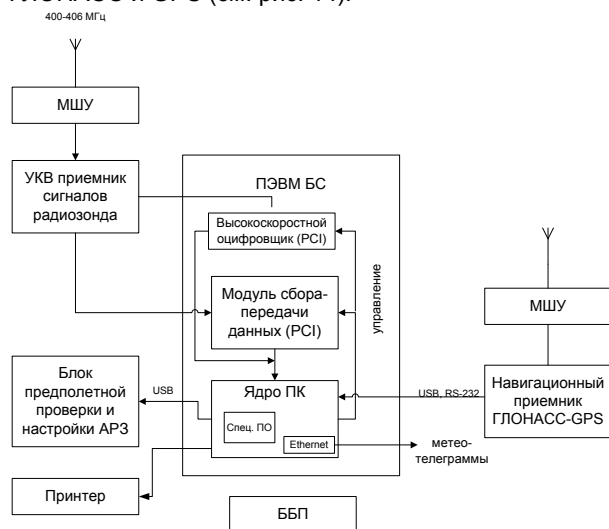


Рис. 15. Структурная схема БСС системы «Полюс».

Fig. 15. System "Polus" Base Station structure chart

АРЗ измеряет параметры атмосферы, текущие координаты, вектор скорости и передает эту телеметрическую информацию по цифровому радиоканалу на БСС. Некоторые образцы АРЗ предназначены для измерения специальных параметров атмосферы (радиации, уровня промышленных выбросов газов, аэрозолей и т.п.).

Сигналы АРЗ принимаются антенно-фидерной системой (АФС) и поступают на УКВ приемник (см. рис. 15), где они демодулируются и поступают далее в ПЭВМ БСС. В ПЭВМ осуществляется окончательная обработка сигналов и сохранение информации. АФС приема сигналов АРЗ имеет две антенны, одна из них предназначена для «ближнего», а другая – для «дальнего» приема (см. рис. 16).

Антенна ближнего приема используется при больших значениях угла места АРЗ и ограниченной дальности до 30-40 км. Антенна дальнего приема имеет приплюснутую диаграмму направленности по углу места и включается при приеме сигналов от радиозонда с углом места ниже 40 градусов и дальности свыше 40 км.

Интегрированный в ПЭВМ, модуль сбора данных оцифровывает принятый сигнал и управляет переключением каналов ближнего и дальнего приема

АФС БСС (см. рис. 17). Для получения частотного спектра в рабочей полосе СРА и оценки помеховой обстановки на вход высокоскоростного оцифровщика подается сигнал АРЗ на промежуточной частоте.

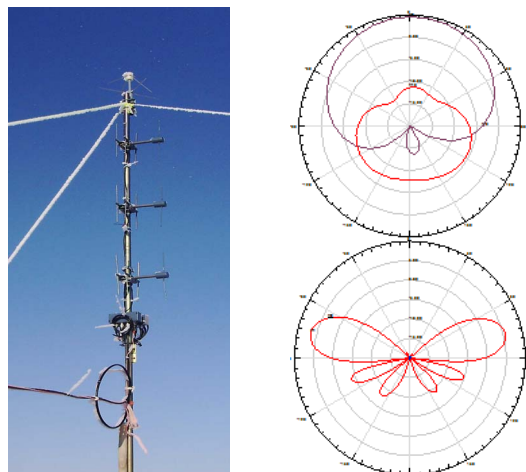


Рис. 16. Антенна СРА «Полюс» и её диаграмма направленности в режиме ближнего (вверху) и дальнего приёма (внизу).

Fig. 16. SRA "Polus" antenna and its directional diagram in modes of near (top) and long receiving (bottom)



Рис. 17. Внешний вид рабочего места оператора СРА «Полюс».

Fig. 17. SRA "Polus" operator work place appearance

По последовательному интерфейсу RS-232 (или интерфейсу USB) может быть подключен приемник СРНС. Блок предполетной проверки и настройки радиозонда необходим для проверки АРЗ перед пуском и настройки частотного канала его передатчика. Входящий в комплект блок бесперебойного питания защищает БСС от кратковременных сбоев в сети питания.

Структурная схема аэрологического радиозонда (АРЗ) типа МРЗ-Н1, предназначенного для работы в системе «Полюс», представлена на рис. 18. МРЗ-Н1 состоит из: базового модуля, навигационного модуля ГЛОНАСС/GPS, модуля передатчика, модуля питания и узла датчиков. Модуль питания состоит из батареи питания и модуля преобразователя напряжения, формирующего требуемое напряжение питания, которое подается на базовый модуль.

Базовый модуль включает в себя микроконтроллер с 32-разрядным цифровым процессором, измерительный преобразователь, стабилизатор напряжения и разъемы для подключения остальных модулей. Базовый модуль выполняет функции измерения выходного напряжения первичного преобразователя влажности и период выходного сигнала измеритель-

ного преобразователя, который определяется сопротивлением первичного преобразователя температуры и величиной опорного сопротивления. Кроме того, базовый модуль принимает данные от навигационного модуля ГЛОНАСС/GPS, подключенного к универсальному асинхронному приёмопередатчику, формирует цифровой пакет для передачи на БСС и управляет работой модуля передатчика. Модуль передатчика передает по радиоканалу битовый поток, формируемый базовым модулем.

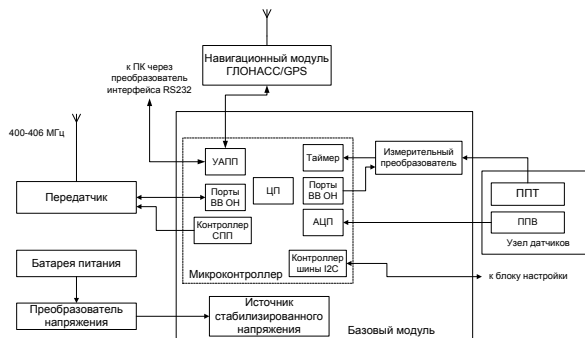


Рис. 18. Структурная схема АРЗ МРЗ-Н1 системы «Полус».

Fig. 18. System "Polus" ARZ MRZ-N1 structure chart

При разработке конструкции АРЗ МРЗ-Н1, за основу был взят корпус серийного АРЗ МРЗ-3А. В конструкцию крышки корпуса были внесены изменения, необходимые для размещения в ней навигационного модуля ГЛОНАСС/GPS.

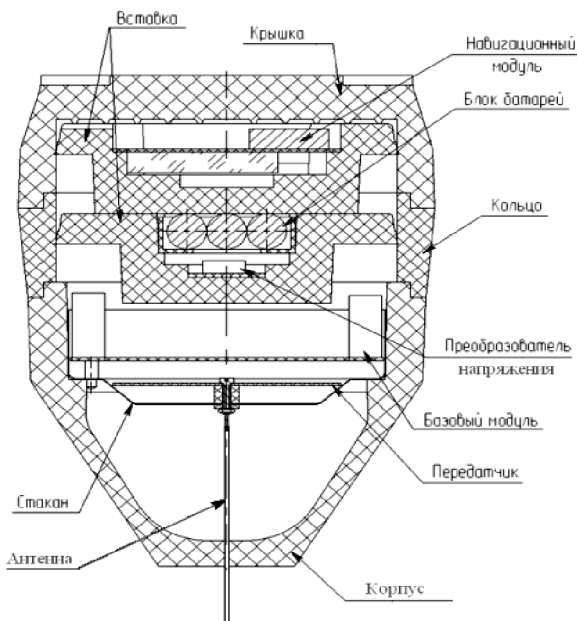


Рис. 19. Схема компоновки АРЗ МРЗ-Н1.

Fig. 19. ARZ MRZ-N1 layout drawing

Компоновка составных узлов в АРЗ МРЗ-Н1 показана на рис. 19. В нижней части корпуса размещён модуль передатчика со штыревой антенной. Сам модуль находится внутри алюминиевого стакана. На следующем уровне располагается базовый модуль, также заключённый в алюминиевый стакан. Внутри крышки, наращенной по высоте кольцом, размещены две вставки из пенопласта. В верхней вставке закреплён навигационный модуль ГЛОНАСС/GPS, а в нижней – модуль питания.

Действующий макет СРА «Полус» был разработан и испытан на аэрологической станции «Верхнее Дуброво» в 2009 [19]. В 2011 г. был разработан и изготовлен опытный образец этой системы. С целью оценки эффективности работы системы в условиях эксплуатации в ноябре 2011 г. на площадке № 6 космодрома Байконур были проведены сравнительные испытания системы «Полус» и серийной радиолокационной системы на базе РЛС МАРЛ (см. рис. 20).

Было выполнено несколько одиночных и спаренных запусков АРЗ. В спаренном запуске два радиозонда подвешиваются к одной газонаполненной оболочке с интервалом порядка 10 м и летят в паре.



Рис. 20. Первый пуск АРЗ МРЗ-Н1 при испытаниях системы «Полус» на космодроме Байконур.

Fig. 20. The first launch of ARZ MRZ-N1 during the tests of system "Polus" at the Baikonur Cosmodrome

Программное обеспечение БСС по каждому запуску формировало телеграмму данных в виде таблицы. Выдача данных по высоте при нахождении АРЗ в приземном слое (до 4 км) выполнялась через каждые 10 м, а далее, – через 100 м. Следует отметить, что регистрация скорости движения радиозонда системой «Полус» позволила проследить даже такие «мелочи», как раскачивание радиозонда на фале его подвески к шару-баллону (см. рис. 21).

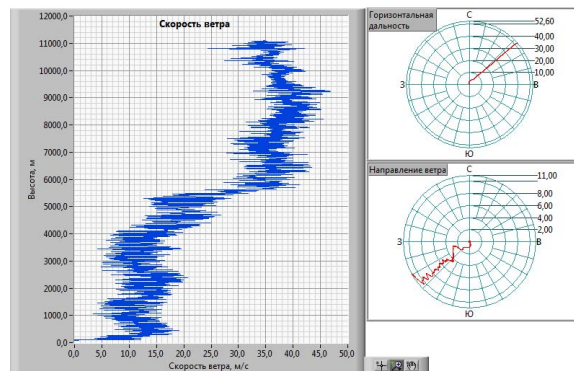


Рис. 21. Фрагмент «сырого» профиля ветра (модуль скорости и направление) и диаграмма горизонтальной дальности.

Fig. 21. Fragment of "raw" wind profile (velocity magnitude and direction) and the diagram of the horizontal distance

Амплитуда раскачиваний радиозонда по скорости составляла 2...5 м/сек. При этом движение радиозонда в пространстве происходит по форме смещающейся спирали. В первом выпуске АРЗ достигнута дальность сопровождения 170 км при высоте зонда 31,3 км. Во втором – дальность составила 160 км при высоте нахождения АРЗ 30,7 км. Указанные ограничения по дальности обусловлены кривизной поверхности Земли.

Необходимо отметить, что первые выпуски радиозондов МРЗ-Н1 происходили при значительной скорости ветра (до 56 м/с на высотах 4...10 км). Другие выпуски проводились при практически вертикальном подъеме радиозондов до высоты 5...10 км и дальнейшем удалении на расстояние более 100 км. Навигационные GPS приемники радиозондов МРЗ-Н1 обеспечивали устойчивый прием сигналов от 7...11 спутников, что контролировалось программным обеспечением БСС системы «Полюс». Сигналы передатчиков радиозондов МРЗ-Н1 на частотах 400...406 МГц надежно принимались и расшифровывались во всем диапазоне достигнутых дальностей и высот при выпусках радиозондов.

Из результатов испытаний следует, что точности измерения координат в обычном режиме измерения достаточно для обеспечения тактико-технических требований. Для реализации дифференциального режима работы СРА потребуется увеличить скорость передачи данных в радиоканале в несколько раз, так как в этом режиме значительно увеличивается объем передаваемой АРЗ информации. Это повлечет за собой увеличение рабочей полосы частот сигнала. В результате будет снижена энергетическая эффективность радиоканала при небольшом повышении точности измерения высоты. Кроме того дифференциальный режим требует геодезической привязки БСС, что накладно или невыполнимо для мобильного исполнения системы. Поэтому целесообразно направить усилия на максимальное использование потенциала обычного режима измерений.

V. Заключение

За восемьдесят лет своего развития радиозондирование атмосферы прошло целый ряд качественных этапов, которые характеризовались увеличением высоты, автоматизации измерений и обработки данных. За эти годы метод радиозондирования атмосферы претерпел огромные изменения – от приема информации на слух, громоздкой ручной обработки и передачи данных до полностью автоматического приема, обработки и отправки аэрологических сообщений в специализированные каналы связи. Радиозонд прошел путь от прибора весом около 2-х кг до миниатюрного устройства легче 200 г.

Из выполненного обзора современного состояния техники радиозондирования видно, что на основе тесного сотрудничества и взаимодействия промышленных предприятий с научным коллективом ВУЗа удалось в короткие сроки создать качественно новую аппаратуру радиозондирования атмосферы и программное обеспечение к ней, отвечающих современным требованиям. Эти успехи послужили основой для принятия государственной программы «Модернизация и техническое перевооружение учреждений и организаций Росгидромета», согласно которой стало возможным масштабное переоснащение сети аэрологического радиозондирования новым оборудованием.

В результате выполненного комплекса работ впервые в РФ создан навигационный АРЗ с современным цифровым радиоканалом и техническими характеристиками, превосходящими отечественные радиолокационные АРЗ. Положительные результаты испытаний опытного образца системы радиозондирования «Полюс» свидетельствуют о правильности принятых технических решений при её реализации, которые могут быть использованы при создании се-

рийного образца этой системы. В ходе сравнительных испытаний в эксплуатационных условиях показана перспективность применения в практике радиозондирования атмосферы мобильной цифровой системы «Полюс», использующей сигналы навигационных спутниковых платформ ГЛОНАСС/GPS для слежения за радиозондом и определения его местоположения, а также направления и скорости ветра.

Эта система может быть предназначена для проверки характеристик систем радиозондирования и замены устаревших систем, эксплуатируемых на территории РФ и за рубежом. Особые преимущества система «Полюс» имеет в случае эксплуатации в сложных климатических условиях, в местах с неблагоприятным для радиолокационных станций рельефом местности, на подвижных платформах, а также в мобильном режиме, когда требуется максимально снизить габариты и вес аппаратуры. В частности, она удобна в полярных экспедициях на дрейфующих льдах Арктики и Антарктики. Целесообразность такого применения системы «Полюс» подтверждена решениями ряда совещаний Росгидромета.

Другая перспектива связана с модернизацией существующих и разработка новых систем радиозондирования путём применения автодинных СВЧ генераторов в качестве миниатюрных и дешёвых приёмо-передатчиков – ответчиков сигналов запросного радиолокатора. Представляет интерес также разработка этих генераторов в гибридно-монокристаллическом исполнении на базе полевых СВЧ транзисторов, которые по сравнению с биполярными транзисторами имеют более высокий КПД. Кроме того, учитывая высокие показатели этих транзисторов в освоении высоких частот, считаем возможным переход систем радиозондирования на использование радиоволн коротковолновой части сантиметрового и даже миллиметрового диапазонов длин волн излучения. В этих диапазонах РЛС по ряду параметров и характеристик, в том числе по массе и габаритам, имеют значительные преимущества.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с постановлением Правительства № 218 от 09.04.2010г.

VI. Список литературы

- [1] Иванов В. Э., Фридзон М. Б., Ессяк С. П. Радиозондирование атмосферы: Технические и метрологические аспекты разработки и применения радиозондовых измерительных средств / под ред. В.Э. Иванова. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. 606 с.
- [2] Молчанов П. А. О точности зондирования атмосферы методом радиозондов // Метеорология и гидрология. 1936. № 2. С. 31–41.
- [3] Хахалин В. С. Современные радиозонды. М.: Госэнергоиздат, 1959. 298 с.
- [4] Исследование возможности комплексной микроиниатюризации аэрологического радиозонда для системы зондирования атмосферы РКЗ – «Метеорит-2»: Отчет о НИР / УПИ им. С. М. Кирова, рук. Х. Н. Гайнанов. № ГР 70022133. Свердловск, 1973. 172 с.
- [5] Ефимов А. А. Принципы работы аэрологического информационно-вычислительного комплекса АВК – 1. М.: Гидрометеиздат, 1989. 149 с.
- [6] Иванов В. Э. Патент № 2172965 (РФ). Сверхрегенеративный приёмопередатчик. Приоритет от 06. 12. 1999.
- [7] Ivanov V., Kikin V., Losev Y. The new generation of upper-air observations equipment // Papers presented at the WMO technical conference on meteorological and environmental instrument and methods of observation (TECO-98). Casablanca, Morocco, 13-15 May 1998. P. 221–225.

- [8] *Ivanov V. E., Gusev A. V., Mironenko O. V., Petrov R. A.* Radiosounding systems of conducting upper-air observation by // Papers presented at the WMO technical conference on meteorological and environmental instruments and methods of observation (TECO - 2000) WMO Instruments and Observing Methods. Report No.74. -WMO/TD-No.1028, Beijing, China, 23-27 October, 2000.
- [9] *Исследование и разработка системы радиозондирования атмосферы на основе спутниковых платформ GPS/ГЛОНАСС, модернизация радиозондов типа МРЗ-3 для аэрологической сети Росгидромета: Отчет по НИР о патентных исследованиях / рук. В. Э. Иванов. Екатеринбург, УрФУ, НИЧ. 2010. № ГР И110112133821. 64 с*
- [10] *Исследование методов повышения точности измерения метеорологических параметров атмосферы. Отчет о НИР/ рук. В. Э. Иванов. Екатеринбург. УрФУ, НИЧ. 2010. № ГР И110112133 821. 47с.*
- [11] *Иванов В. Э., Кудинов С. И.* Моделирование влияния ударных колебаний в транзисторных сверхрегенеративных приёмопередатчиках // 21-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2011): материалы конф. в 2 т. (Севастополь, 14–18 сент. 2011 г.) Севастополь: Вебер, 2011. Т. 1. С. 253–254.
- [12] *Иванов В. Э., Кудинов С. И.* Влияние флуктуаций затухания сверхрегенеративного приёмопередатчика на параметры приёмного режима // 21-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2011): материалы конф. в 2 т. (Севастополь, 14–18 сент. 2011 г.) Севастополь: Вебер, 2011. Т. 1. С. 438–439.
- [13] *Теоретические обоснования автодинного метода формирования ответного сигнала радиозонда по дальности / Носков В. Я., Иванов В. Э., Игнатков К. А., Кудинов С. И. // (см. настоящий сборник).*
- [14] *Экспериментальные исследования автодинного режима приём-передающего устройства радиозонда МРЗ-ЗМК / Кудинов С. И., Иванов В. Э., Носков В. Я., Игнатков К. А. // (см. настоящий сборник).*
- [15] *ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под. Ред. А.И.Перова, В.Н.Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2010. 800 с.*
- [16] *Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС / Под. ред. В. Н. Харисова, А. И. Петрова, В. А. Болдина. 2-е изд. исправ. М.: ИПРЖР, 1999. 560 с.*
- [17] *A comparison of radiosounding windfinding methods OMEGA, LORAN-C, and GPS / Hovius W., Monna W. A., Rothe R. A - Instruments and observing methods, report №70, WMO/TD- №877, 1998.*
- [18] *Иванов В. Э., Плохих О. В.* Радионавигация в системах аэрологического радиозондирования атмосферы // Вестник ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. Проектирование и анализ радиотехнических и информационных систем: серия радиотехническая. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. №18(48).
- [19] *Плохих О. В., Иванов В. Э.* Некоторые результаты разработки системы радиозондирования атмосферы на основе спутниковых навигационных платформ GPS-ГЛОНАСС. // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. Санкт-Петербург: 2009, вып. 6 (тематический выпуск «Широкополосные сигналы и системы»), с. 66–74.

CURRENT STATUS AND PROSPECTS OF ATMOSPHERE RADIOSOUNDING SYSTEMS

Ivanov V. A., Gusev A. V., Ignatkov K. A.,
Kudinov S. I., Noskov V. Ya., Plokhii O. V.
*Ural Federal University (UrFU) named after the first
President of Russia B. N. Yeltsin
Yekaterinburg, Russia
E-mail: noskov@oko-ek.ru*

Abstract — Historical background is given, the analysis of current state is performed and the ways of further development of atmosphere radiosounding systems are presented. Alongside with the prospects, the advisability of developing and implementing the digital mobile system using the signals of satellite navigation GLONASS/GPS platform for tracking radiosounding and determining its location, as well as direction and speed of wind is pointed out. Another prospect deals with the modernization of existing systems through the use of microwave autodyne oscillators as miniature and low-cost transceivers - the responder of request radar signals.

V. Conclusion

During the eighty-year period of its development of the radiosounding of the atmosphere it has passed a series of qualitative stages, characterized by increase in height, automation of measuring and processing of data. These years have seen considerable changes in atmosphere radiosounding method - from auditory perception of information, massive manual processing and transmission of data to a fully automated receiving, processing and transmitting aerological messages to specialized communication channels. The radiosounding device about 2 kg has turned into a miniature device lesser than 200 g.

This review of the current state of radiosounding technology shows that close cooperation and collaboration of industrial enterprises with a university research team resulted in quickly creating brand-new radiosounding equipment and radio software for it meeting modern requirements. This success was the basis for the state program "Modernization and technical upgrading of establishments and organizations of Roshydromet" which enabled the large-scale re-equipment aerological radiosounding network.

As a result of executed range of works, navigation aerological radiosounding with the modern digital radio channel and specifications which leave behind national radar aerological radiosoundings was produced in the Russian Federation for the first time. Positive test results of the prototype model of the radiosounding system "Polus" prove the correctness of the technical solutions adopted for its implementation, which can be used to create production model of the system. Comparative tests in the operating environment showed the prospects of application of the mobile digital system "Polus" in atmosphere radiosounding.

The system uses signals of satellite navigation platforms GLONASS/GPS for tracking the radiosounding and determining its location, as well as wind direction and speed. This system can be meant for verifying the performance of radiosounding systems and replacing of obsolete systems used in Russia and abroad. The system "Polus" has specific advantages in case of operating in harsh climatic conditions, in areas with the lay of the land unfavorable for radar stations, on mobile platforms, as well as in mobile mode when it is necessary to minimize size and weight of equipment. In particular, it is convenient for polar expeditions on drift-ice in the Arctic and Antarctic. The feasibility of such a use of the system "Polus" confirmed by a series of Roshydromet's meetings.

Another prospect deals with the modernization of existing systems through the use of microwave autodyne oscillators as miniature and low-cost transceivers - the responder of request radar signals. The development of these oscillators in hybrid monolithic version based on the field microwave transistors, which have higher efficiency compared with bipolar transistors is of great interest. Moreover, taking into account better specifications of these transistors in a high-frequency range, we consider it possible to shift radiosounding systems to centimeter and even millimeter wavelengths range. In these ranges radar systems have considerable advantages in a number of parameters and characteristics, including mass-dimensional parameters.