

## Дистанционное зондирование сред

DOI 10.24412/2221-2574-2022-3-5-17

УДК 551.501

### РАДИОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В МУРОМСКОМ ИНСТИТУТЕ: ПАССИВНО-АКТИВНЫЙ РАДИОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

#### **Щукин Георгий Георгиевич**

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры технологий и средств геофизического обеспечения ФГБОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» МО РФ (ВКА им. А.Ф. Можайского)<sup>1</sup>; научный руководитель лаборатории «Радиофизические исследования природных сред» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»<sup>2</sup>.

E-mail: [ggshchukin@mail.ru](mailto:ggshchukin@mail.ru)

#### **Булкин Владислав Венедиктович**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры техносферной безопасности Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»<sup>2</sup>.

E-mail: [vvbulkin@mail.ru](mailto:vvbulkin@mail.ru)

#### **Федосеева Елена Валерьевна**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»<sup>2</sup>.

E-mail: [elenafedoseeva@yandex.ru](mailto:elenafedoseeva@yandex.ru)

#### **Ростокин Илья Николаевич**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры управления и контроля в технических системах Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»<sup>2</sup>.

E-mail: [rostockin.ilya@yandex.ru](mailto:rostockin.ilya@yandex.ru)

<sup>1</sup>Адрес: 197198, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

<sup>2</sup>Адрес: 602264, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

**Аннотация:** Серия статей посвящена истории развития и современному состоянию радиометеорологических исследований, проводимых в Муромском институте ВлГУ. В данной статье рассмотрен этап, связанный с созданием пассивно-активных радиолокационных систем (ПАРЛС) метеорологического назначения. Проектирование ПАРЛС осуществлялось с использованием самолётной метеонавигационной РЛС «Гроза», имеющей основной и резервный блоки приёмопередатчика. Один из блоков использовался как активный канал, а в корпусе другого выполнен приёмник пассивного канала на основе модуляционного радиометра супергетеродинного типа с преобразователем на диодах с барьером Шоттки (флуктуационный порог чувствительности радиометра 0,3 К при постоянной времени  $\tau = 1$  с). За счёт применения схемных решений и дополнительного замкнутого экрана из пермаллоя был обеспечен гарантированный уровень развязки каналов до 160 дБ. Рассмотрены особенности и даны характеристики ПАРЛС двух вариантов исполнения — стационарного и бортового. Оба варианта прошли апробацию в условиях эксплуатации. Применение методик анализа потенциально опасных явлений обеспечивало повышение достоверности прогнозирования обледенения самолётов. Представлены сведения об особенностях разработанной аппаратуры, сопутствующих исследованиях.

**Ключевые слова:** пассивно-активные радиолокационные системы, метеонавигационная РЛС «Гроза», активный канал, пассивный канал, потенциал активного канала, обледенение летательных аппаратов.

### Введение

Как уже отмечалось [1, 2], в 2021–2022 годах сошлось несколько юбилейных дат, связанных с журналом «Радиотехнические и телекоммуникационные системы» и Муромским институтом ВлГУ: 20 лет с момента выпуска межвузовского сборника «Методы и устройства передачи и обработки информации»; 10 лет с момента выпуска журнала «Радиотехнические и телекоммуникационные системы»; 30 лет со дня первой Всероссийской конференции по проблемам дистанционного зондирования (ныне — Всероссийские открытые Армандовские чтения), проведённой Научным Советом РАН по распространению радиоволн в Муромском институте. Кроме того, в текущем году исполняется 65 лет со дня основания Муромского института.

В предлагаемом цикле статей рассматривается история, достижения, современное состояние и перспективы одного из научных направлений, развиваемых в институте — дистанционного зондирования атмосферы. В первой статье [1] рассмотрены особенности создания СВЧ-радиометрического комплекса. Во второй статье мы вспомним историю и особенности создания пассивно-активных радиометеорологических систем.

### 1. Принципы пассивно-активной метеорадиолокации

Большинство сформировавшихся к настоящему времени методов дистанционного исследования атмосферы основаны на использовании радиотехнических принципов локации и поэтому объединяются общим названием «радиометеорология» [3, 4, 5]. В целом дистанционные радиометеорологические локационные системы можно разделить на два вида: активные и пассивные.

Активные основаны на излучении зондирующего сигнала, приёме отражённых эхосигналов с последующим их анализом, и применяются для получения количественной информации о жидких и твердых осадках, иссле-

дования облаков, и т.п. Пассивные осуществляют измерение собственного радиотеплового излучения метеорообъектов и позволяют решать задачи исследования распределения жидкокапельной влаги в окружающей среде.

СВЧ радиометрический комплекс, история создания которого была рассмотрена в [1, 2], кроме основной пассивной части (четырёхканальный радиометрический приёмник) содержал ещё и активные устройства: радиолокатор и трассовую установку. Работа составляющих частей комплекса осуществлялась независимо от других, данные, полученные в результате измерений, либо имели самостоятельную ценность, либо могли учитываться в случае совместной обработки.

Известно [3, 6, 7], что и активные, и пассивные методы имеют свои особенности и свои недостатки.

Радиометрия позволяет осуществить дистанционное определение интегральных параметров влагосодержания облачной атмосферы, под которыми понимают влагозапас атмосферы  $Q$  и водозапас облаков  $W$ , а также водозапас дождей  $R_d$ .

Радиометрический метод определения водозапаса облаков основан на измерении интегрального ослабления радиоволн или, иначе говоря, оптической толщины жидкокапельной влаги  $\tau_w$  этих облаков, и поиске функциональной связи  $\tau_w$  с водозапасом.

Оптическая толщина таких облаков выражается соотношением [3, 4, 5]

$$\tau_w(\lambda) \approx \Psi_n[\lambda, T_o], \quad (1)$$

где  $T_o$  — эффективная температура облака;  $\lambda$  — длина волны, на которой осуществляются измерения;  $\Psi_n[\lambda, T_o]$  — удельный коэффициент поглощения жидкокапельной влаги облака.

Наличие величины  $\lambda$  в формуле (1) указывает на зависимость получаемого результата от длины волны, на которой осуществляется измерение.

Определение по величине оптической толщины атмосферы влаго- и водозапаса облачных образований и атмосферы осуществляется

с помощью различного рода математических моделей, например

$$\Delta\tau_w = \bar{\gamma}\Delta Q + \Psi(\bar{T}_s)\Delta W + R_d \frac{\partial\Psi}{\partial T}\Delta T_s + \varepsilon_n, \quad (2)$$

где  $\Delta\tau_w$  — измеряемые по радиояркостному контрасту приращения оптической толщины облаков (относительно средних значений);  $\Delta$  — отклонение значения величины от среднего;  $\varepsilon_n$  — погрешность наблюдения;  $\Psi(\bar{T}_s)$  — удельный коэффициент поглощения жидкокапельной влаги.

При всех достоинствах главным недостатком радиометрических методов является невозможность определения пространственных размеров различных облачных или иных образований (например — зоны осадков), их дальности.

В активной радиометеорологии излучаемый зондирующий сигнал преобразуется исследуемым объектом и отражается в сторону приёмной антенны. Облако, поле осадков и т.п. объекты неоднородны, поскольку состоят из большого числа элементарных отражателей — частиц различного фазового состояния, размера, к тому же неравномерно распределённых в пространстве и находящихся в состоянии постоянного относительного перемещения. В результате мощность принятого радиолокационной станцией сигнала изменяется от одного зондирующего импульса к другому [3, 6].

Количество энергии, отражаемое целью, характеризуется эффективной площадью рассеяния (ЭПР). Суммарная мощность отражённых сигналов определяется суммой ЭПР отдельных отражателей, образующих эту сложную цель. С учётом закона распределения гидрометеорных частиц по размерам  $N(d)$ , ЭПР метеоцели будет иметь вид

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \sum_d N(d) \cdot d^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2, \quad (3)$$

где  $d$  — диаметр частицы;  $m$  — комплексный коэффициент преломления вещества частиц.

В радиометеорологии параметр  $\sum_d N(d) \cdot d^6$

называют отражаемостью облаков и осадков, и обозначают через  $Z$ . Чаще всего значение  $Z$  выражается в  $\text{мм}^6/\text{м}^3$ , а формула (3) представляется в виде

$$Z = \int_0^\infty N(d) \cdot d^6 \cdot dd. \quad (4)$$

Как известно, активная метеорологическая радиолокация при определении характеристик облаков и осадков имеет существенные трудности в получении однозначных связей между радиолокационной отражаемостью и водностью облаков и осадков, что обусловлено, в основном, сильной зависимостью  $Z$  от  $d^6$ . Практически это означает, что относительно незначительное количество капель большого размера обеспечивает существенно больший вклад в  $Z$ , чем значительно большее количество капель малого размера, вносящих основной вклад в водозапас облаков. Имеются и другие трудности, связанные с изменчивостью функции распределения частиц по размерам и с распределением скоростей падения капель.

Для использования достоинств пассивного и активного методов и компенсации присущих им недостатков неоднократно предлагалось использовать совместно оба метода при осуществлении метеонаблюдений.

В 70-х годах Г.Г. Шукиным были сформулированы принципы построения метеорологических пассивно-активных радиолокационных систем (ПАРЛС). В соответствии с этим методом среднюю водность облака  $\bar{w}(\vec{l})$  вдоль направления зондирования определяют по соотношению [4, 8]

$$\bar{w}(\vec{l}) = W(\vec{l}) / L(\vec{l}), \quad (5)$$

где  $W(\vec{l})$  — водозапас облака вдоль направления визирования, определяемый с помощью пассивного канала (радиометра);  $L(\vec{l})$  — протяжённость зондируемой зоны облака (дождя), определяемая с помощью активного канала (радиолокатора).

Основным каналом получения информации о состоянии метеобъекта становится пассивный канал, единственным недостатком которого является сложность локализации контролируемых объектов, а активный канал используется по своему исторически-естественному назначению – определению расстояния до выявленного объекта, его геометрических размеров.

В связи с этим принципы пассивно-активного зондирования изначально базировались на методиках, используемых при пассивном мониторинге. Основной методикой являлись измерения в горизонтальном (азимутальном) направлении при различных углах места с «выходом» на участки чистого неба, находящиеся рядом с выявленными конвективными метеоячейками. Главное преимущество такой методики в том, что не требуется дополнительная внутренняя абсолютная калибровка рабочего инструмента — радиометра.

Были проработаны методические основы обработки получаемой информации [4, 8]. Так, для  $\lambda = 3,2$  см соотношение для определения водности имеет вид:

$$w(l) = \frac{91,833}{\psi(T_s)} A(l), \quad (6)$$

где  $\psi$  — температурный коэффициент;  $A(l)$  — профиль коэффициента поглощения:

$$A(l) = \frac{\sqrt{Z(l)}}{\int_{l_1}^{l_2} \sqrt{Z(l)} dl} \tau_l, \quad (7)$$

где  $l_1-l_2$  — протяжённость зондируемой зоны, км;  $\tau_l$  — оптическая толщина,  $Hn$ ;  $Z(l)$  — радиолокационная отражаемость зондируемой зоны,  $\text{мм}^6/\text{м}^3$ .

Таким образом, с помощью пассивного канала (радиометра) получают азимутальное распределение водозаписа конвективного облака под любым углом места. С помощью активного канала получают данные о геометрических размерах облака и распределение отражаемости в его сечении, соответствующие выбранному углу места.

### Стационарная пассивно-активная радиолокационная станция

При проектировании ПАРЛС в Муромском институте решалась задача создания сравнительно недорогой и компактной системы на основе серийно выпускаемой РЛС, обеспечивающей двойное применение: в качестве основы для создания наземных систем и систем самолётного базирования. Предварительный анализ возможного базового варианта (основы) будущей системы, проведённый с учётом таких факторов, как стоимость, массогабаритные характеристики, надёжность, возможность доработки под совмещение с радиометром и т.д., позволил выбрать в качестве основы для последующей разработки одну из самолётных метеонавигационных РЛС (МНРЛС) типов «Гроза», «Градиент» или «Контур». Для конкретной реализации макета была использована МНРЛС «Гроза». Более подробно обоснование выбора типа РЛС представлено в работах [9, 10, 11].

МНРЛС «Гроза» состоит из двух блоков приёмопередатчика — основного и резервного, размещённых на одной раме и подключаемых к антенно-фидерной системе посредством волноводного переключателя. В силу этого конструктивно вопрос совмещения был решён достаточно просто: один из блоков использован как активный канал (АК), а в корпусе другого выполнен приёмник пассивного канала (ПК). Вместо волноводного переключателя установлен совпадающий по геометрическим размерам Y-циркулятор, с помощью которого осуществляется решение двух задач: подключение АК или ПК к антенне и электромагнитная развязка каналов.

Поскольку мощность излучаемого сигнала у «Грозы» существенно меньше, чем у станций серии МРЛ, очевидно, что меньший уровень имеет и значение потенциала  $P_m$  станции. Было проведено сравнение потенциалов при использовании антенн различных диаметров с потенциалами основных на тот период времени метеорадиолокационных станций серии МРЛ (МРЛ-2 — 283 дБ, МРЛ-5 — 293 дБ).

Расчёт значений потенциалов производился при максимальном для данной станции значении импульсной мощности 14 кВт по известному соотношению [3], определяющему зависимость величины потенциала от основных параметров РЛС. В результате были получены следующие значения: с антенной диаметром 560 мм — 259 дБ; с антенной диаметром 760 мм — 262 дБ; с антенной диаметром 3000 мм — 274 дБ.

Из проведённых расчётов видно, что увеличение площади раскрытия антенны до 3 м обеспечивает повышение потенциала до 274 дБ. В этом случае величина потенциала «Грозы» становится соизмерима с потенциалом МРЛ-2.

Поскольку «Гроза» — это малогабаритная станция, имеющая простую структуру, с целью проверки пригодности её для создания ПАРЛС было проведено исследование стабильности основных параметров станции — излучаемой мощности и рабочей длины волны (частоты генерации).

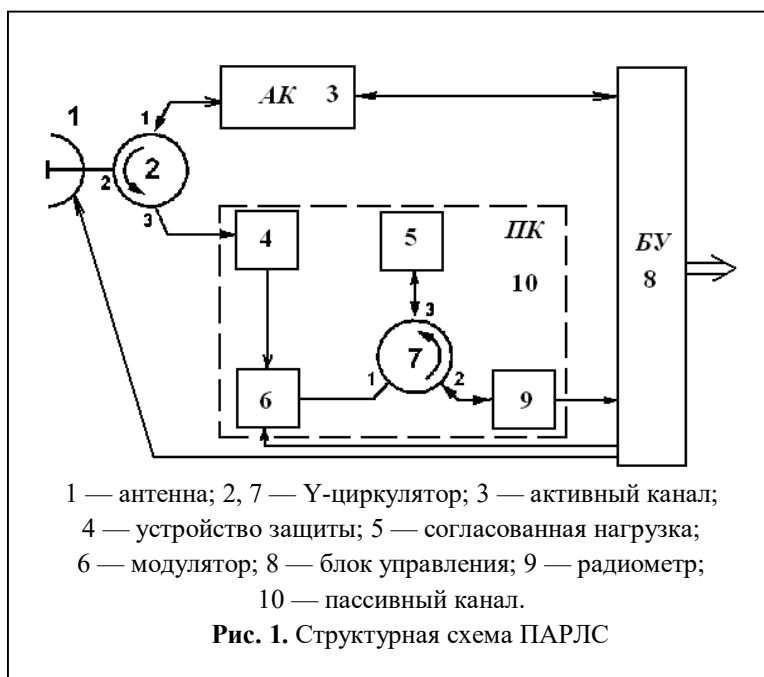
Анализ усреднённых данных, полученных по результатам нескольких экспериментов, показал, что общее реальное изменение потенциала за счёт неконтролируемого ухода мощности передатчика могло достигать 1,9...2 дБ. Однако при эксплуатации передатчика в области мощностей выше 12 кВт реальное значение потенциала непредсказуемо снижается более чем на 5 дБ, что составляет более 40% от возможного выигрыша. В связи с этим рабочая точка передатчика в области мощностей была выбрана в диапазоне 9,4...10,9 кВт, что несколько снижает возможное значение потенциала.

Упрощённая структурная схема ПАРЛС приведена на рис. 1. ПАРЛС состоит из антенной системы, Y-циркулятора, активного канала, пассивного канала и блока управления. Антенная система и активный канал (приёмопередатчик

РЛС «Гроза») остаются практически без изменения. Пассивный канал был выполнен по схеме модуляционного радиометра супергетеродинного типа с преобразователем на диодах с барьером Шоттки. УПЧ состоял из двух усилителей с полосой пропускания 700 МГц и общим коэффициентом усиления 50 дБ при коэффициенте шума 4,5 дБ. Это позволило получить флуктуационный порог чувствительности радиометра 0,3 К при постоянной времени  $\tau = 1$  с.

На рис. 2 показаны временные графики работы ПАРЛС. Синхронизация работы каналов осуществлялась использованием первого полупериода для активного канала, а второго — для приёма радиотеплового излучения (пассивный канал) [5, 10, 12].

Схема работает следующим образом. Под воздействием синхроимпульса, поступающего с выхода блока управления, передатчик активного канала вырабатывает мощный зондирующий импульс (см. рис. 2, а), который через плечи 1-2 первого циркулятора передаётся в антенну и излучается в пространство. Одновременно запирающий сигнал подаётся на модулятор (рис. 2, б), выполненный на основе управляемого *pin*-выключателя. Поскольку модулятор в закрытом состоянии имеет коэф-





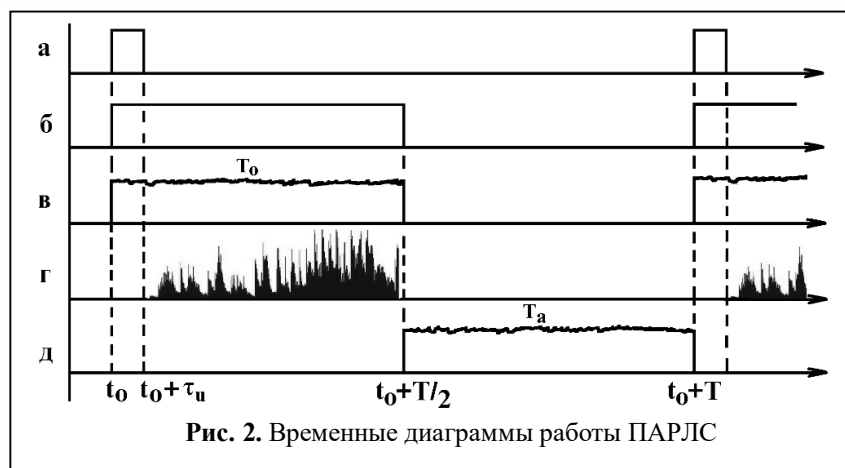


Рис. 2. Временные диаграммы работы ПАРЛС

коэффициент отражения, мало отличающийся от единицы, то вход ПК через плечи 3-1-2 второго циркулятора оказывается подключён к согласованной нагрузке, выполняющей функции источника эталонного шума  $T_0$  (рис. 2, в). Просочившийся через первый циркулятор импульс дополнительно ослабляется устройством защиты – разрядником.

Отражённые эхо-сигналы принимаются антенной и через плечи 2-3 первого циркулятора поступают в пассивный канал, отражаются модулятором и через плечи 3-1 того же циркулятора подаются на вход АК (рис. 2, г, показано условно). После снятия запирающего напряжения с модулятора (через время  $t = T/2$ , где  $T$  — длительность периода следования зондирующих импульсов АК) активный канал отключается от антенны и начинает работать выполненный по схеме модуляционного радиометра ПК, принимая радиотепловой шум  $T_a$  (рис. 2, д).

В таком режиме работы радиус действия активного канала ограничен дальностью 185 км, что вполне достаточно для решения задач измерения осадков и сопровождения работ по активным воздействиям. Однако при необходимости активный канал мог работать на полную дальность (375 км). Для этого на модулятор подавалось запирающее напряжение, которое закрывало его, в результате чего антенная система оказывалась постоянно подключена к приёмнику активного канала, а пассивный канал к согласованной нагрузке (эквиваленту).

Самым сложным являлся вопрос обеспечения электромагнитной совместимости блоков, что обусловлено влиянием мощного зондирующего импульса передатчика на работу приёмника ПК и влиянием гетеродина ПК на работу приёмника АК.

Опыт ГГО показал, что для обеспечения достаточного уровня электромагнитной совместимости каналов необ-

ходимо, чтобы развязка между каналами ПАРЛС была на уровне не ниже 140 дБ [8]. Частично эта задача решается самой схемой компоновки (см. рис. 1). Подключение в момент излучения зондирующего импульса к входу приёмника ПК согласованной нагрузки, наличие устройства защиты («разрядника»), подача сигнала в антенну через Y-циркулятор — всё это, как показывают расчёты, позволяет обеспечить развязку на уровне до 70 дБ. Дополнительно было осуществлено смещение центральной частоты полосы пропускания УПЧ ПК и отключение гетеродина в момент излучения зондирующего импульса. Эти меры обеспечили ещё до 90 дБ.

Кроме того, были проанализированы и исследованы вопросы экранирования блоков. В результате проведённых экспериментов было определено, что наибольшей эффективностью обладают замкнутые экраны, выполненные из магнитомягких материалов с высокой магнитной проницаемостью (различные типы пермаллоев). Эффективность экранирования за счёт применения таких экранов удалось повысить на 30...35 дБ. В результате развязка была гарантированно обеспечена на уровне 160 дБ [10, 13].

Внешний вид наземного (стационарного) варианта ПАРЛС показан на рис. 3.

Для стационарного комплекса на крыше института была установлена вторая антенная колонка от СОН-4, причём дополнительно между опорным узлом и колонкой был оборудован

«постамент», обеспечивающий установку антенны диаметром 3 м. Рама с АК и ПК устанавливалась на той же несущей конструкции, что и зеркало антенны. Такое решение обеспечивало сокращение длины волновода до излучателя, позволяло избежать применения вращающихся соединений.

Внешний вид пульта управления ПАРЛС показан на рис. 4, антенная система — на рис. 5.

Испытания ПАРЛС были проведены в составе наземного комплекса [10] на базе ГГО Тургош с использованием антенной системы станции МРЛ-2. Сравнительные измерения, проведённые с активным каналом 3,2 см стан-

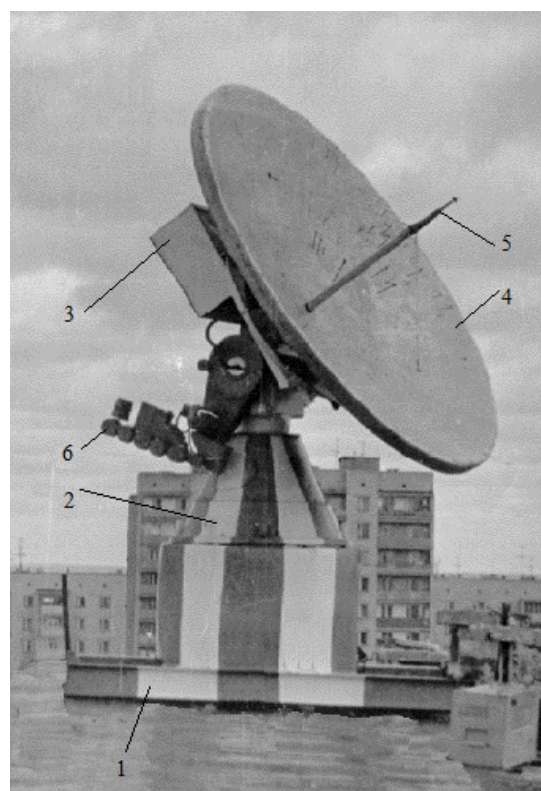
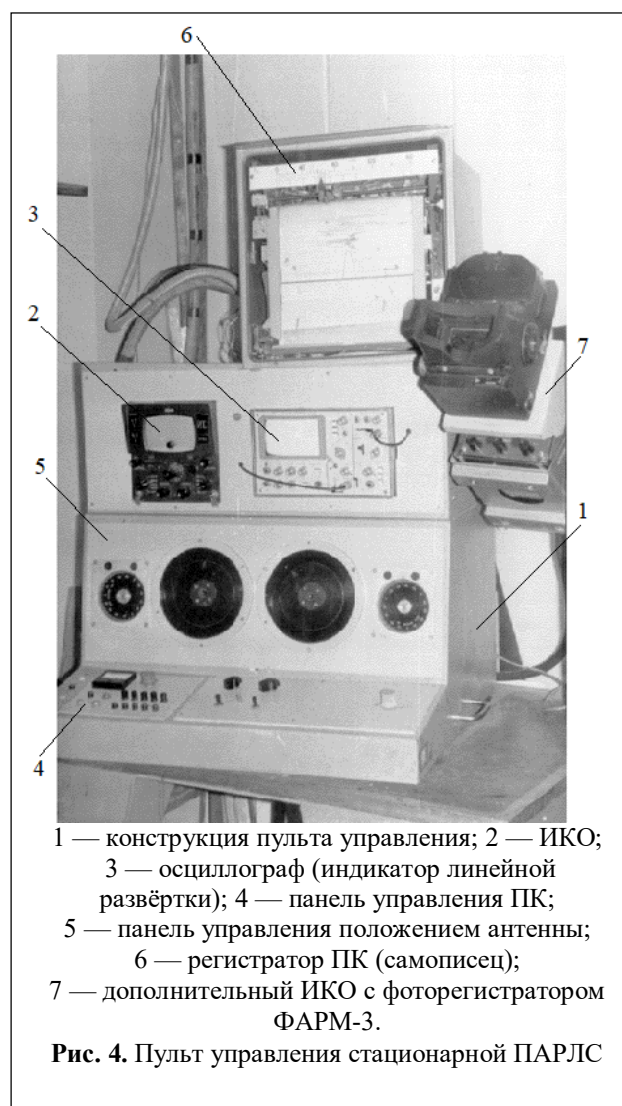
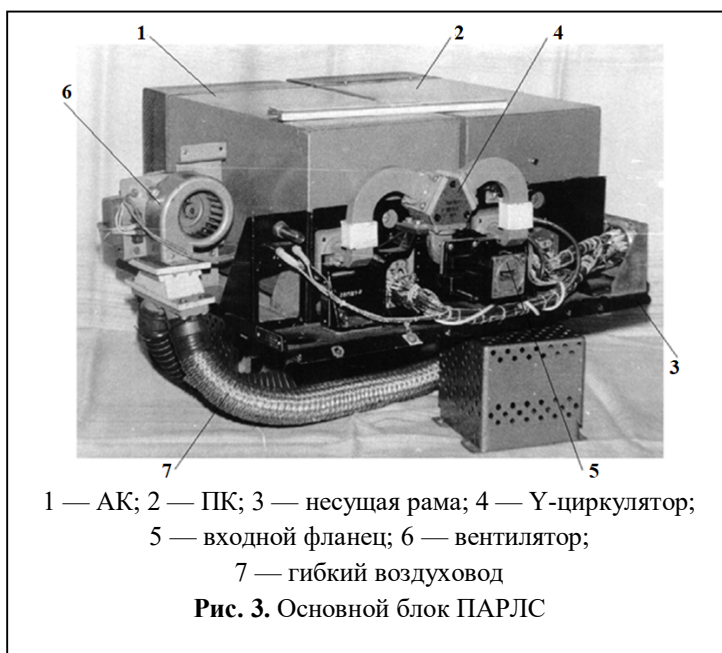


Таблица 1. Параметры ПАРЛС

П а р а м е т р	Величина
<u>Активный канал</u>	
Импульсная мощность, кВт	9 ... 14
Длительность зондирующих импульсов, мкс	3,5
Рабочая длина волны, см	3,2
Минимальная чувствительность, дБ/мВт	-103
Дальность обнаружения, км	
в пассивно-активном режиме	175
в активном режиме	350
Потенциал с антенной диаметром 3000 мм, дБ	270
<u>Пассивный канал</u>	
Чувствительность, К	0,3
Постоянная времени интегрирования, с	1
Коэффициент шума, дБ	не хуже 4,5
Развязка от активного канала, дБ	160±7

ции МРЛ-1 на полигоне ГГО в Тургоше показали, что вероятности обнаружения облачных образований с осадками в зоне до 100 км равны. Флуктуационный порог чувствительности по радиоярким температурам пассивного канала составлял 0,4К при постоянной времени  $\tau = 1$  с.

Характеристики системы представлены в таблице 1.

**Бортовая пассивно-активная радиолокационная станция**

Второй вариант системы был установлен на борту самолёта-лаборатории ГГО ИЛ-18 [14].

В этом случае использовалась штатная антенна от РЛС «Гроза» (диаметр зеркала 760 мм и ширина диаграммы направленности 4°). Потенциал активного канала  $P_n = 262$  дБ.

Для получения игольчатой диаграммы направленности в обеих плоскостях поляризации с антенны был снят отражатель, формирующий косекансную диаграмму направленности.

Конструктивно бортовой вариант по ПК совпадал со стационарным. Такая же доработка была проведена и в узле антенного переключателя (замена на Y-циркулятор). Отсутствовал узел вентиляции, поскольку в условиях эксплуатации станции на борту самолёта аппаратура подключалась к внутренней вентиляционной системе.

Существенно отличался блок управления, включающий минимально необходимый набор устройств и элементов (рис. 6).

**Апробация ПАРЛС и сопутствующие решения**

Представленный обзор не может отразить весь объём выполненных в тот период работ, вклю-



Рис. 6. Пульт управления бортовой ПАРЛС



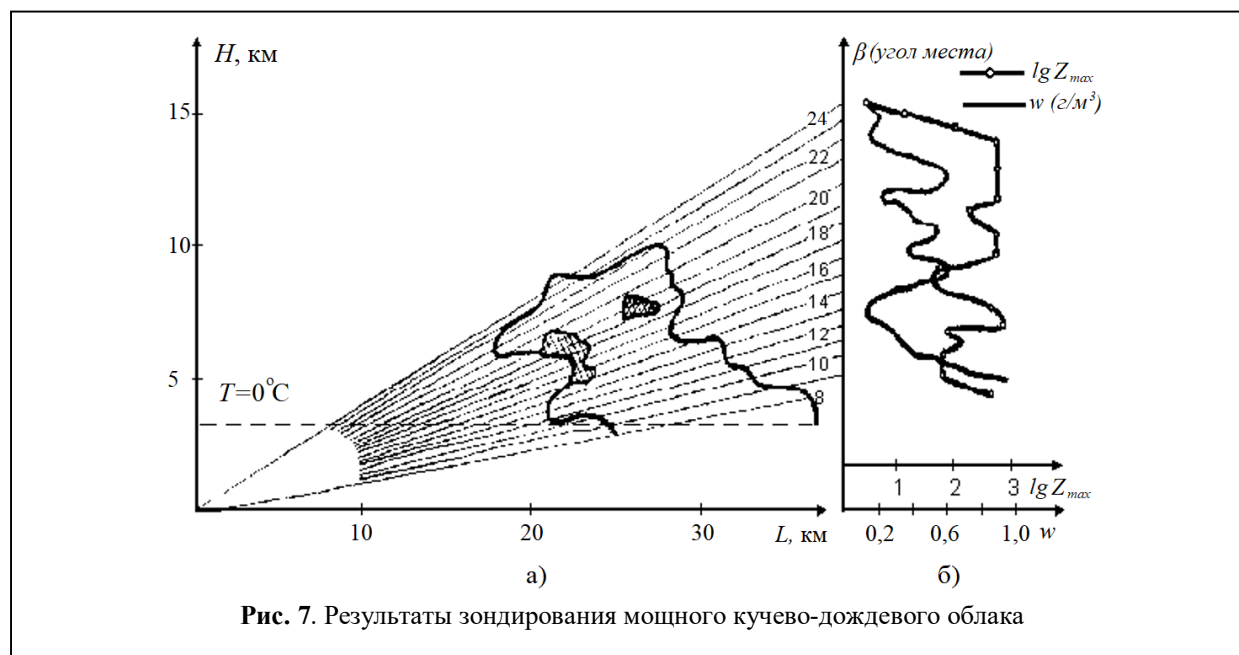


Рис. 7. Результаты зондирования мощного кучево-дождевого облака

чавший как поиск вариантов схмотехнических решений, так и решение архитектурно-конструкторских задач, как оптимизацию или разработку методик обработки данных, так и решение вопросов автоматизации этой обработки.

Решение методических вопросов нашло своё отражение в ряде изобретений, анализе и выработке алгоритмов измерений и обработки данных или локализации потенциально опасных зон (явлений) [5, 6, 12, 15, 16].

В качестве примера применения стационарного варианта ПАРЛС для анализа облачных образований на рис. 7 представлены результаты зондирования мощного кучево-дождевого облака. На рис. 7, а представлен вертикальный разрез облака и уровень нулевой изотермы ( $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ). Как видно из рисунка, основная часть облака расположена выше уровня нулевой изотермы, что говорит о высоком содержании переохлаждённой и кристаллической воды. На рис. 7, б приведено угломестное распределение максимальной отражаемости облака  $\lg Z_{max}$ , определённой по величине эхосигнала, и восстановленный профиль средней водности в зависимости от угла места  $\beta$ .

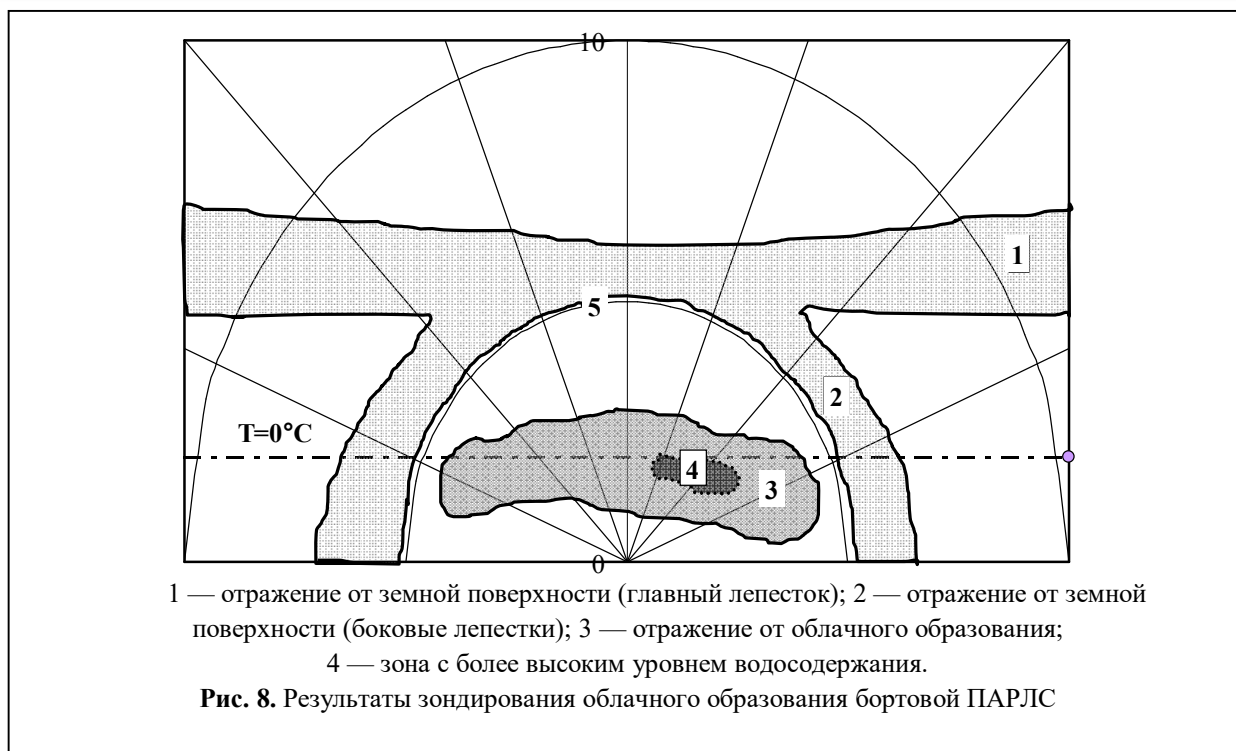
Кроме того, на основании полученных результатов было осуществлено определение

границ опасных зон. В соответствии с критерием [15]

$$F = -1,785 w + 0,0312 T_0 + 0,4233, \quad (8)$$

были выявлены зоны возможного обледенения летательных аппаратов, местоположение которых в границах исследуемого облака показано на рис. 7, а штриховкой. По этому критерию при  $F \leq 0$  принимается решение о средней или высокой степени возможности обледенения, при  $F > 0$  — о низкой степени возможности обледенения.

Бортовой вариант ПАРЛС был установлен и испытан на борту самолёта-лаборатории Ил-18. Антенная система была расположена в гондоле из радиопрозрачного материала. Рама с блоками активного и пассивного каналов располагалась в багажном гермоотсеке. Блок управления находился в салоне самолёта. Антенная система соединялась с остальной частью системы посредством двух гермопроходников — волноводного и кабельного. Сканирование осуществлялось перпендикулярно направлению движения самолёта. Фазирование направлений движения антенны и луча развёртки индикатора было выбрано таким образом, что крайние положения антенны и луча совпадают, а направления движения противоположны. Таким образом, изображение на



экране индикатора имеет зеркальное отображение радиолокационной картины [6] (рис. 8).

Вопросы автоматизации данных решались в самом конце 80-х годов и в силу понятных причин не были доведены до логического завершения [5, 14, 17].

Обобщение принципов построения пассивно-активных систем, методик обработки и представления данных было осуществлено в диссертациях С.П. Гинеотиса, В.В. Булкина, Р.В. Первушина, В.И. Гореликова, докторской диссертации В.В. Фалина, ряде изобретений, монографиях [4, 5, 6].

### Итоги второго этапа работ

Вся совокупность работ по созданию пассивно-активных радиолокационных систем метеорологического назначения кратко может быть выражена следующим обобщённым итогом:

1. С учётом возможности промышленной реализации разработана и реализована действующая стационарная пассивно-активная радиолокационная система метеорологического назначения. Осуществлена её экспериментальная проверка в различных условиях экс-

плуатации, проведены измерения параметров облачных образований.

2. Разработана и реализована действующая бортовая пассивно-активная радиолокационная система. Осуществлена её экспериментальная проверка в условиях испытательных полётов на борту самолёта-лаборатории ИЛ-18Д.

3. Разработаны оптимальные и квази-оптимальные алгоритмы определения прогностических параметров для повышения безопасности техногенных объектов. На примере прогнозирования возможного обледенения самолётов решена задача создания аппаратных средств для выработки прогностического критерия.

4. Решена задача автоматизации обработки метеорологической информации в части сопряжения пассивно-активной радиометеорологической системы с персональным компьютером и оптимизации передаточной характеристики усилителя информационного сигнала применением автоматических корректоров.

5. Решена задача повышения информативности пассивного канала системы в два раза.

6. На уровне изобретений решён ряд прикладных задач, обеспечивающих идентификацию контролируемых объектов и повышение уровня достоверности получаемой информации, и др.

Работы по созданию комплексов ПАРЛС проводились под общим руководством В.В. Фалина и Г.Г. Щукина. Непосредственную реализацию работ координировал С.П. Гинеотис. В работах по созданию ПАРЛС, сопутствующих работах и исследованиях также принимали участие преподаватели, сотрудники и студенты Радиотехнического факультета института: Первушин Р.В., Костров В.В., Николаев В.А., Булкин В.В., Гореликов В.И., Сергеев Н.Н., Соловьёв Л.П., Васильцов И., Ермаков И., Голубев А., Горшков В., Гришаков А., и другие.

К сожалению, известные проблемы последнего десятилетия XX века свели на нет возможность полноценной работы в практической части и продолжение исследований было общетеоретическим.

*Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-19-00378 (<https://rscf.ru/project/21-19-00378>)*

#### Литература

1. Щукин Г.Г., Булкин В.В., Федосеева Е.В., Ростокин И.Н. Радиометеорологические исследования в Муромском институте: СВЧ-радиометрический комплекс // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022. №1. С. 5–19. DOI 10.24412/2221-2574-2022-2-5-19
2. Булкин В.В., Щукин Г.Г., Федосеева Е.В., Ростокин И.Н. Радиометеорологические исследования в Муромском институте. К 30-летию проведения Армандовских чтений / Всероссийские открытые Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром: МИ ВлГУ, 2022. С. 7–20. DOI: 10.24412/2304-0297-2022-1-7-20
3. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 343с.
4. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылёв Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплокация в метеорологии. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 283 с.

5. Фалин В.В. Радиометрические системы СВЧ. М.: Луч, 1997. 440 с.

6. Щукин Г.Г., Булкин В.В. Метеорологические пассивно-активные радиолокационные системы: Монография. Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2009. 166 с.

7. Shchukin G.G., Bulkin V.V. Meteorological passive-active radar observations // Journal of Communications Technology and Electronics. 2011. Vol. 56. Pp. 509–530. DOI:10.1134/S1064226911030089.

8. Щукин Г.Г., Бобылёв Л.П., Ильин Я.К. Комплексное активно-пассивное радиолокационное зондирование облачности // Труды ГГО. Вып. 411. 1978. С. 3–12.

9. Голубев А.В., Гинеотис С.П. Определение оптимальных технических характеристик пассивно-активного метеорологического радиолокатора // Республиканская научно-техническая конференция «Актуальные вопросы радиоэлектроники и автоматики». Свердловск: 1984. С.7.

10. Гинеотис С.П., Фалин В.В., Костров В.В., Булкин В.В., Первушин Р.В., Васильцов И.М. Метеорологический пассивно-активный комплекс // Радиометеорология: Труды VII Всесоюзного совещания. Л.: Гидрометеоздат, 1989. С. 122–124.

11. Kostrov V.V., Bulkin V.V. Possibility of using the «Groza» aircraft radar in radio-meteorological measurements / Measurement Techniques. 1996. Vol. 39. Pp. 204–207 (1996).

12. А.С. СССР N1344074, G 01 S 13/95, G 01 R 29/08. Метеорологическая радиометрическая система / Гинеотис С.П., Костров В.В., Николаев В.А., Первушин Р.В., Соловьёв Л.П., Фалин В.В. 08.06.1987.

13. Ермаков И.В., Гинеотис С.П. Метод повышения электромагнитной совместимости в пассивно-активном радиолокаторе // Республиканская НТК «Достижения радиоэлектроники и автоматики — народному хозяйству». Свердловск: 1985. С. 9.

14. Фалин В.В., Первушин Р.В., Щукин Г.Г., Гинеотис С.П., Николаев В.А., Канарейкин Д.Б. Бортовая пассивно активная радиолокационная станция // Труды ГГО. 1991. Вып. 535. С. 61–65.

15. Первушин Р.В., Гинеотис С.П. Нелинейные алгоритмы обнаружения зон возможного обледенения летательных аппаратов // Радиотехника, электроника, информатика: Сб. науч. Работ. Муром: ИПЦ МИ ВлГУ. 2002. Вып 1. С. 87–89.

16. Булкин В.В. Совмещённые радиолокационные системы метеорологического назначения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, №1. 2014. С. 73–86.

1. Kostrov V.V., Chekushkin V.V., Bulkin V.V. A passive-active meteorological radar system-personal computer interface // Measurement Techniques. 2000. Vol. 43. Pp. 533–537. DOI:10.1007/BF02503545

Поступила 23 марта 2022 г.

English

## RADIO-METEOROLOGICAL RESEARCH AT MUROM INSTITUTE: PASSIVE-ACTIVE RADIO-METEOROLOGICAL FACILITY

**Georgy Georgyevich Shchukin** — Grand Dr. in Physics and Mathematics, Professor, Department of Technologies and Army Geophysical Support Federal State-owned Military Educational Institution of Higher Education “Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky”<sup>1</sup>, Ministry of Defense of the Russian Federation.

*E-mail:* [ggshchukin@mail.ru](mailto:ggshchukin@mail.ru)

**Vladislav Venediktovich Bulkin** — Grand Dr. in Engineering, Professor, Technosphere Safety Department, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”<sup>2</sup>.

*E-mail:* [yvbulkin@mail.ru](mailto:yvbulkin@mail.ru)

**Elena Valeryevna Fedoseeva** — Grand Dr. in Engineering, Professor, Radio Engineering Department, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”<sup>2</sup>.

*E-mail:* [elenafedoseeva@yandex.ru](mailto:elenafedoseeva@yandex.ru)

**Ilya Nikolaevich Rostokin** — Grand Dr. in Engineering, Professor, Department of Monitoring and Control in Engineering Systems, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”<sup>2</sup>.

*E-mail:* [rostockin.ilya@yandex.ru](mailto:rostockin.ilya@yandex.ru)

<sup>1</sup>Address: 197198, Russian Federation, Saint-Petersburg, Zhdanovskaya st., 13.

<sup>2</sup>Address: 602264, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Orlovskaya st., 23.

*Abstract:* A series of articles is dedicated to the development history and the current state of radio-meteorological research at Murom Institute of VLSU. This article examines the period involving development of passive and active radar systems (PARS) for meteorological purposes. When using the passive-active method, the main channel for obtaining information of meteorological object status becomes the passive channel, and the active channel is used to define meteorological object size. PARS engineering was done by using airborne meteo-navigation radar Groza, comprising main and standby transceiver units placed on the same frame and connected to antenna feeder system via a waveguide switch. One of the units was used as an active channel, and the other one had a passive channel receiver installed in it. Y-circulator is installed instead of a waveguide switch ensuring the signal separation and electromagnetic decoupling of channels. The passive channel was a switched radiometer of superheterodine type with Schottky barrier diode-based transformer. This made it possible to obtain a fluctuation threshold of radiometer sensitivity 0.3 k with constant time  $\tau = 1$  s. Assurance level of channel decoupling was provided up to to 160 dB due to circuit design and an additional closed permalloy-made screen. As for fixed version, the frame with transceiver’s units and radiometer were placed upon the antenna column installed on the roof of the Institute. Application of 3000 mm diameter mirror antenna enabled to achieve radar’s meteorological potential up to 270 dB. The second version of the system was installed on board IL-18 aircraft-laboratory of Main Geophysical Observatory (MGO). Using standard antenna from Groza radar (760 mm reflector diameter and 4° antenna beamwidth) provided the active channel potential on level of 262 dB. Both options were tested in test site or aircraft laboratory. Using analytical procedure for potentially dangerous phenomena ensured an increase in reliability of predicting aircraft icing. Data is presented about the features of the developed equipment and co-occurring research.

*Keywords:* passive-active radar systems, meteonavigation radar Groza, active channel, passive channel, active channel potential, aircraft icing.

*The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 21-19-00378  
(<https://rscf.ru/projekt/21-19-00378>)*



## References

2. *Shchukin G.G., Bulkin V.V., Fedoseeva E.A., Rostokin I.N.* Radiometeorological research in Murom institute: microwave radiometric system. Radioengineering and telecommunication systems. 2022. No. 1. Pp. 5–19. DOI 10.24412/2221-2574-2022-2-5-19
3. *Bulkin V.V., Shchukin G.G., Fedoseeva E.V., Rostokin I.N.* Radiometeorological research at the Murom Institute. To the 30th anniversary of the Armand Readings. All-Russian Open Armand Readings [Electronic source]: Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction. Materials of the All-Russian Open Scientific Conference. Murom: MI VISU, 2022. Pp. 7–20. DOI: 10.24412/2304-0297-2022-1-7-20
4. *Stepanenko V.D.* Radar in meteorology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973. 343 p.
5. *Stepanenko V.D., Shchukin G.G., Bobylev L.P., Matrosov S.Yu.* Radioteplolocation in meteorology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 283 p.
6. *Falin V.V.* Radiometric microwave systems. Moscow: Luch, 1997. 440 p.
7. *Shchukin G.G., Bulkin V.V.* Meteorological passive-active radar systems: Monograph. Murom: CPI MI VISU, 2009. 166 p.
8. *Shchukin G.G., Bulkin V.V.* Meteorological passive-active radar observations. Journal of Communications Technology and Electronics. 2011. Vol. 56. Pp. 509–530. DOI: 10.1134/S1064226911030089.
9. *Shchukin G.G., Bobylev L.P., Ilyin Ya.K.* Complex active-passive radar sounding of clouds. Trudy GGO. Iss. 411. 1978. Pp. 3–12.
10. *Golubev A.V., Gineotis S.P.* Determination of optimal technical characteristics of a passive-active meteorological radar. Republican Scientific and Technical Conference "Actual issues of radio electronics and automation". Sverdlovsk: 1984. P.7.
11. *Gineotis S.P., Falin V.V., Kostrov V.V., Bulkin V.V., Pervushin R.V., Vasiltsov I.M.* Meteorological passive-active complex. Radiometeorology: Proceedings of the VII All-Union Meeting. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. Pp. 122–124.
12. *Kostrov V.V., Bulkin V.V.* Possibility of using the "Groza" aircraft radar in radio-meteorological measurements. Measurement Techniques. 1996. Vol. 39. Pp. 204–207.
13. A.S. USSR N1344074, G 01 S 13/95, G 01 R 29/08. Meteorological radiometric system / *Gineotis S.P., Kostrov V.V., Nikolaev V.A., Pervushin R.V., Soloviev L.P., Falin V.V.* 08.06.1987.
14. *Ermakov I.V., Gineotis S.P.* Method of increasing electromagnetic compatibility in passive-active radar. Republican STC "Achievements of radio electronics and automation — to the national economy". Sverdlovsk: 1985. P. 9.
15. *Falin V.V., Pervushin R.V., Shchukin G.G., Gineotis S.P., Nikolaev V.A., Kanarekin D.B.* Airborne passive active radar station. Trudy GGO. 1991. Iss. 535. Pp. 61–65.
16. *Pervushin R.V., Gineotis S.P.* Nonlinear algorithms for detecting zones of possible icing of aircraft. Radio Engineering, Electronics, Informatics: Coll. of sci. papers. Murom: CPI MI VISU. 2002. Iss. 1. Pp. 87–89.
17. *Bulkin V.V.* Combined radar systems for meteorological purposes. Radioengineering and telecommunication systems. No. 1. 2014. Pp. 73–86.
18. *Kostrov V.V., Chekushkin V.V., Bulkin V.V.* A passive-active meteorological radar system-personal computer interface. Measurement Techniques. 2000. Vol. 43. Pp. 533–537. DOI:10.1007/BF02503545