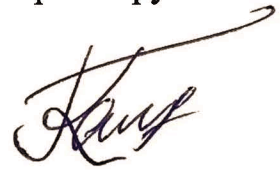


На правах рукописи



ГАЛАЕВА КСЕНИЯ ИГОРЕВНА

**МЕТОД И АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ОПАСНЫХ ВЕТРОВЫХ
МЕТЕОЯВЛЕНИЙ В СЕКТОРАХ ВЗЛЁТА И ПОСАДКИ ВОЗДУШНЫХ
СУДОВ**

Специальность 2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) на кафедре «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта».

Научный руководитель: Доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта» ФГБОУ ВО МГТУ ГА
Болелов Эдуард Анатольевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры «Управление и контроль в технических системах» (УКТС) Муромского института (филиала) ФГОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
Ростокин Илья Николаевич
Кандидат технических наук, доцент, начальник отдела №204 акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Исток» им. А.И. Шокина»
Каргашин Юрий Дмитриевич

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации (ФГУП ГосНИИ ГА)

Защита состоится «15» февраля 2023 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 42.2.001.01 на базе ФГБОУ ВО МГТУ ГА по адресу: 125993, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) и на сайте www.mstuca.ru.

Автореферат разослан « » _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 42.2.001.01
доктор технических наук, профессор



В.М. Самойленко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день влияние метеоусловий на безопасность полётов является одной из ключевых проблем авиации. Проведенный более чем за четверть века анализ авиационных инцидентов и происшествий в ГА показал, что в более 20% случаев авиационные инциденты и происшествия были связаны с неблагоприятными метеорологическими условиями. Анализ данных об авиационных событиях в период 2012-2020 гг. показал, что 34,4% авиационных событий происходили без МОП ГА при сложных метеоусловиях. Следовательно, причинами авиационных инцидентов и происшествий являются недостаточная информационная доступность для отечественных аэродромов к анализу метеообстановки, в большей степени при обнаружении чрезвычайной турбулентности и очень сильных (опасных) сдвигов ветра.

При этом метеорологические датчики, определяющие атмосферные образования, подразделяются на контактные, измеряющие параметры атмосферы в точке, и дистанционные, способные получать параметры атмосферы на некоторых площадях.

Наземный метеорологический радиолокатор является уникальным источником с высокой пространственной и временной дискретностью для анализа метеообстановки в ближней аэродромной зоне БАЗ. Наземный метеорологический радиолокатор с низкими массогабаритными характеристиками возможно использовать в стационарном и мобильном варианте в БАЗ (на временных и постоянных аэродромах и посадочных площадках, в местах чрезвычайных происшествий и др).

Анализ существующих метеорадиолокационных станций выявил **противоречие практического характера** между отсутствием в отечественных разработках наземных метеорологических радиолокаторов ближней зоны аэродрома секторного режима работы с оценкой опасных ветровых метеоявлений в секторах взлёта и посадки и необходимостью повышения ситуационной осведомлённости диспетчеров УВД и экипажей ВС о метеорологической обстановке в районе аэродрома.

Кроме того, существует объективная необходимость повышения точности оценки ветровых метеоявлений в секторах взлёта и посадки ВС. Следствием этого является **противоречие научного характера** между необходимостью повышения точности оценки ветровых метеоявлений в секторах взлёта и посадки ВС, с одной стороны, и отсутствием метода и алгоритмов оценки опасных ветровых метеоявлений (сдвигов ветра, турбулентности) в наземных метеорологических радиолокаторах ближней аэродромной зоны МРЛК БАЗ, с другой стороны.

В диссертации для разрешения указанных противоречий решается актуальная **научно-техническая задача** разработки метода и алгоритмов оценивания опасных ветровых метеоявлений в наземных МРЛК БАЗ. Актуальность научно-технической задачи обусловлена прежде всего тем, что внедрение МРЛК БАЗ в оперативную практику МОП обеспечивает:

- достоверной метеорологической информацией экипажи ВС на этапах захода на посадку, взлёта и посадки воздушного судна;
- достоверной метеорологической информацией диспетчеров управления воздушным движением (прежде всего диспетчеров старта и посадки, диспетчеров «круга» и диспетчеров «подхода»),

что позволит повысить безопасность полетов в районе аэродрома.

Кроме этого, необходимо отметить следующее:

- данные МРЛК БАЗ с высокой дискретностью в пространстве и времени могут использоваться в качестве начальных данных в моделях сверхкраткосрочного и краткосрочного прогнозов погоды, а также на этапе верификации моделей (использование данных МРЛК БАЗ позволит повысить достоверность оправдываемости метеопрогнозов);

- интерпретация предоставляемых МРЛК БАЗ метеорологических радиолокационных данных позволит детальнее изучить стадии развития и генезиса облаков вертикального развития, сопровождающихся опасными явлениями погоды;

- низкие характеристики массы и габаритов МРЛК БАЗ позволят создать мобильный вариант МРЛК, который обеспечит предоставление метеорологической информации в регионах, где отсутствует возможность или целесообразность монтажа стационарного метеорадиолокатора (например, ДМРЛ-С);

- разработка отечественного радиолокационного метеорологического комплекса ближней аэродромной зоны отвечает современным требованиям импортозамещения.

Степень разработанности темы исследования

Впервые в 1941 г. Д. Райдом была высказана гипотеза о возможности наблюдений за погодой при помощи радиолокатора, что подтвердилось на практике.

Большой вклад в основы радиометеорологии были заложены Дж. Райдом, Д. Атласом, Х. Голдштейном, А. Сигерто, А. Бентом, Д. Керром, М. Лигдом, Р. Векслером, Д. Маршалом, В. Пальмером.

С 1944 по 1950 гг. было установлено, что наличие в радиоэхе «яркой полосы» зависит от состояния фазы гидрометеоров, также был осуществлён анализ зависимостей между отражаемостью радиоэха, размерами и скоростью выпадения гидрометеоров.

В 50-х гг. XX века были получены результаты в вопросах поляризации, измерения осадков, отображения радиолокационной отражаемости, процесса флуктуации сигналов, слежения за ураганами с использованием радиолокаторов.

В 60-х гг. XX века особый интерес представляла отражаемость радиоэха гроз и града. В Советском Союзе были разработаны радиолокационные методы детектирования града, осуществлены мероприятия по градозащите. В оперативную практику СССР постепенно внедрялись метеорадиолокаторы.

Далее начали использовать методы измерения, связанные с эффектом Доплера, в результате чего впервые были получены карты ветровых параметров и характеристик (радиальная скорость, её ширина спектра, векторное поле скорости, турбулентность, горизонтальные и вертикальные сдвиги ветра).

Сегодня на сети Росгидромета в оперативную практику внедрены технически и морально устаревшие радиолокаторы МРЛ-5 и с 2008 г. метеолокаторы ДМРЛ-С, установка которых происходит с значительной задержкой ввиду их крупногабаритности, больших затрат на изготовление, наладочно-пусковые работы и эксплуатацию.

Несмотря на значительные успехи в разработке метеорологических радиолокационных комплексов, в том числе малогабаритных, по-прежнему остается нерешенной задача разработки метода и алгоритмов оценивания опасных ветровых метеорологических явлений для повышения ситуационной осведомлённости экипажей ВС, диспетчеров УВД и аэродромных служб о фактической метеообстановке в районе аэродрома. Также отсутствуют методики валидации метеоданных об опасных ветровых метеорологических явлениях для существующих МРЛК БАЗ.

Целью работы является повышение точности оценки опасных ветровых метеоявлений в секторах взлета и посадки ВС в метеорологическом радиолокационном комплексе ближней аэродромной зоны в интересах достоверной ситуационной осведомленности диспетчеров УВД и экипажей ВС.

Для достижения цели работы решается **комплекс взаимосвязанных задач:**

- 1) разработка технического облика секторного режима в МРЛК БАЗ;
- 2) разработка метода и алгоритмов оценки опасных ветровых метеорологических явлений в МРЛК БАЗ: горизонтальный и вертикальный сдвиги ветра ГСВ и ВСВ, соответственно, турбулентность EDR;
- 3) разработка методик валидации данных МРЛК БАЗ и получение результатов валидации;
- 4) разработка рекомендаций и основных положений концепции применения алгоритмов оценки опасных ветровых метеоявлений в секторном режиме метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны в интересах аэронавигационного обеспечения полётов.

Объектом исследования являются малогабаритные метеорологические радиолокационные комплексы ближней аэродромной зоны МРЛК БАЗ.

Предметом исследования являются метод и алгоритмы оценивания турбулентности и сдвигов ветра в секторах взлёта и посадки воздушных судов.

Личный вклад автора. Автором лично:

- обоснована необходимость повышения точности оценки опасных ветровых метеоявлений в секторах взлёта и посадки воздушных судов в интересах повышения ситуационной осведомлённости диспетчеров управления воздушным движением и экипажей воздушных судов и проведён анализ существующих современных требований, предъявляемых к оценке горизонтального и вертикального сдвигов ветра, турбулентности в наземных метеорологических радиолокаторах;

- обоснован технический облик секторного режима в метеорологическом радиолокационном комплексе ближней аэродромной зоны, определены его характеристики и структура обработки информации;

- разработан метод оценки опасных ветровых метеоявлений в метеорологическом радиолокационном комплексе ближней аэродромной зоны для секторного режима;

- разработан алгоритм оценки горизонтального и вертикального сдвигов ветра в метеорологическом радиолокационном комплексе ближней аэродромной зоны для секторного режима;

- разработан алгоритм оценки параметров удельной скорости диссипации турбулентной энергии в метеорологическом радиолокационном комплексе ближней аэродромной зоны для секторного режима;

- разработаны методики валидации и проведена валидация метеоданных по фактической погоде о ветровых метеоявлениях в метеорологическом радиолокационном комплексе ближней аэродромной зоны;

- разработаны рекомендации и основные положения концепции применения алгоритмов оценки опасных ветровых метеоявлений в секторном режиме метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны в интересах аэронавигационного обеспечения полетов.

В диссертационной работе применяются следующие **методы исследования:** методы теории вероятностей и математической статистики, методы статистических решений, методы математического и имитационного моделирования, методы теории метеорологической радиолокации.

Границы исследования: в работе предложены метод и алгоритмы оценивания опасных ветровых метеоявлений. Исследование в диссертационной работе ограничивается оценкой опасных ветровых явлений для секторного режима МРЛК БАЗ.

Научная новизна исследования состоит в развитии теоретических методов метеорологической радиолокации применительно к аэронавигационному обеспечению полетов. В настоящей работе впервые:

1. Обоснованы характеристики и структура обработки информации об опасных ветровых метеоявлениях в секторах взлета и посадки воздушных судов для секторного режима метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны, которые определяют технический облик секторного режима.

2. Разработан метод и алгоритмы оценки опасных ветровых метеоявлений в секторном режиме метеорологического радиолокационного комплекса БАЗ, позволяющий улучшить ситуационную осведомленность о ветровой обстановке в секторах взлета и посадки для экипажей ВС и диспетчеров УВД. В частности, разработан:

- алгоритм оценки горизонтального и вертикального сдвигов ветра в секторном режиме метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны;

- разработан алгоритм оценки параметров удельной скорости диссипации турбулентной энергии в секторном режиме метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны.

3. Разработаны методики валидации метеоданных о ветровых метеоявлениях в метеорологическом радиолокационном комплексе ближней аэродромной зоны.

4. Разработаны рекомендации и основные положения концепции применения алгоритмов оценки опасных ветровых метеоявлений в секторном режиме метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны в интересах аэронавигационного обеспечения полетов.

Практическая ценность работы состоит в том, что внедрение ее результатов в разработку существующих и перспективных метеорологических радиолокационных комплексов ближней аэродромной зоны позволит повысить ситуационную осведомленность о ветровой обстановке в секторах взлета и посадки для экипажей ВС и диспетчеров управления воздушным движением, и тем самым обеспечить заданный уровень безопасности полетов в районе аэродрома.

Самостоятельную практическую значимость имеют:

- алгоритмы оценки ветровых метеоявлений, которые могут быть использованы в метеорологических радиолокационных комплексах наземного и морского транспорта;
- методики валидации метеорологических данных, которые могут быть использованы для широкой номенклатуры метеорологических систем.

Научная значимость работы заключается в разработке метода и алгоритмов оценивания опасных ветровых метеорологических явлений, позволяющих проводить исследования мощных кучево-дождевых облаков и сопутствующих опасных явлений погоды (ливневые осадки, гроза, град, шквал, смерч), изучать поля ветра, высотного профиля ветра, сдвигов ветра и турбулентности в условиях различных синоптических ситуаций, местных особенностей и циркуляций.

Достоверность результатов основана на:

- корректном анализе реальных метеоугроз и средств метеообеспечения полетов на аэродромах различных категорий и вертолетных площадках;
- сравнительном анализе статистически значимых данных метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны и априорно достоверных (эталонных) источников метеорологических данных;
- получении корректных статистически значимых результатов валидации метеорологических радиолокационных данных метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны;
- корректном использовании методов теории вероятностей и математической статистики, методов статистических решений, методов математического и имитационного моделирования, методов теории метеорологической радиолокации.

Соответствие паспорту специальности. Работа выполнена в соответствии с пунктами: 9 - «Аэронавигационное обеспечение полётов, закономерности процессов навигации, управление движением отдельных воздушных судов и их потоков»; 10 - «Совершенствование методов использования воздушного пространства, средств радиосвязи, навигации и наблюдения для решения задач управления воздушным движением», раздела «Области исследований» паспорта специальности 2.9.6 «Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники».

Положения, выносимые на защиту:

1. Технический облик секторного режима МРЛК БАЗ (характеристики, структура обработки информации).
2. Метод и алгоритмы оценки опасных ветровых метеорологических явлений (горизонтальный и вертикальный сдвиги ветра и турбулентность) в МРЛК БАЗ.
3. Методики валидации метеорологических данных о ветровых характеристиках МРЛК БАЗ.
4. Рекомендации и основные положения концепции применения алгоритмов оценки опасных ветровых метеоявлений в секторном режиме метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны в интересах аэронавигационного обеспечения полётов.

Внедрение результатов работы. работы проводилась при выполнении НИР Учёного Совета МГТУ ГА и НИР, выполняемых АО «Бортовые аэронавигационные системы» в рамках цикла научно-практических исследований по метеорологической

радиолокации. Основные результаты диссертационной работы внедрены в АО «Бортовые аэронавигационные системы», Гидрометеорологическую службу Вооружённых Сил Российской Федерации, что подтверждено соответствующими актами. Полученные теоретические результаты приняты к использованию в учебном процессе в МГТУ ГА.

Апробация работы.

Результаты работы докладывались и обсуждались на 10 научно-технических и научно-практических конференциях, а именно: на 3 всероссийских и 6 международных конференциях.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 19 печатных работах (378 страниц), в том числе: 4 научных статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК при Минобрнауки РФ (39 страниц); 12 научных статей и тезисов, опубликованных в других изданиях (43 страницы); 1 патент (9 страниц), 2 отчёта НИР Учёного совета МГТУ ГА (287 страниц).

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, библиографического списка и приложений с содержанием иллюстраций, таблиц и формул. Основная часть работы содержит 223 страницы, 65 рисунков и 31 таблицу. Общий объём работы с приложением составляет 256 страниц. Библиографический список литературы включает в себя 145 источников. Общий объём приложения 31 страница, содержит 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, выявлены противоречия практического и научного характера в области метеорологического обеспечения полетов гражданской авиации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, определены границы исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту, и изложено краткое содержание диссертации.

В первой главе проведен анализ влияния метеообстановки и ветровых характеристик метеоявлений на безопасность полётов в районе аэродрома. Показано, как метеоусловия влияют на безопасность полётов. Проанализированы возможности современных средств и систем анализа метеообстановки в районе аэродрома. Выявлена роль метеорологической радиолокации в системе МОП ВС ГА, приведён анализ состояния системы метеорологической радиолокации в Российской Федерации. Сформулирована постановка задачи исследования.

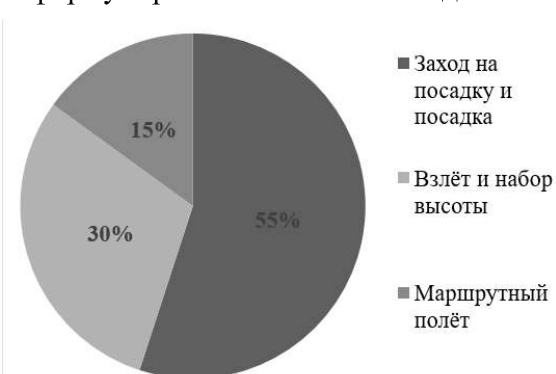


Рис. 1 – Распределение авиационных происшествий и инцидентов по этапам полёта

На сегодняшний день безопасность полётов во многом определяются метеоусловиями. Анализ авиационных происшествий и инцидентов по данным Авиаметтелекома за 2012-2020 гг. показал, что идёт неуклонный рост авиационных происшествий и инцидентов без метеообеспечения экипажей ВС при неблагоприятных метеоусловиях, 62,4% авиационных событий произошли при неблагоприятных метеоусловиях. При этом 55% авиационных происшествий и инцидентов приходится на этап посадки, а 85% на этап посадки, взлёт и набор высоты –

рис.1. Кроме того, на этапе взлёта и посадки наиболее опасными явлениями погоды являются ветровые характеристики такие как сдвиги ветра, турбулентность.

Текущий уровень метеорологического обеспечения является низкоинформационным, что особенно характерно для отдалённых регионов Российской

Федерации (Дальний Восток, Крайний Север, Арктика) на аэродромах классов Г, Д и Е, вертодромах и посадочных площадках.

В связи с этим существует потребность в повышении ситуационной осведомлённости диспетчеров УВД и экипажей ВС о метеорологической обстановке в районе аэродрома при помощи метеосредств.

Метеообеспечение полётов ГА включает в себя определение метеоявлений, параметров и характеристик при помощи контактных и дистанционных датчиков. Из них полностью определить такие опасные ветровые метеоявления в районе аэродромных площадок как сдвиги ветра, турбулентность среди контактных и дистанционных датчиков может только метеорадиолокатор.

Запланированная сеть метеолокаторов ДМРЛ-С практически не охватывает аэродромы Дальнего Востока, Крайнего Севера, а также арктические аэродромы. Очевидно, что существует потребность в создании малогабаритного метеорадиолокатора X-диапазона, способного автоматически работать вблизи аэродромов в экстремальных погодных условиях и обнаруживать опасные для авиации явления погоды от тумана до урагана.

Анализ существующих разработок метеорологических малогабаритных радиолокаторов X-диапазона показал, что они не приспособлены для решения задач метеообеспечения авиации. Для задач МОП в секторах взлёта и посадки ВС подходит только один метеолокатор WR-2100 фирмы FURUNO (Япония), однако его дальность действия 50 км не покрывает ближнюю зону аэродрома.

На сегодняшний день нет ни одного отечественного аэродромного малогабаритного метеорологического радиолокатора, который предоставляет данные об опасных ветровых метеорологических явлениях в СВиП, следовательно, необходима отечественная разработка аэродромного малогабаритного метеорадиолокатора ближней зоны аэродрома МРЛК БАЗ. Для решения задач обеспечения обнаружения опасных ветровых метеоявлений в СВиП требуется секторный режим работы МРЛК БАЗ.

Во второй главе разработан технический облик секторного режима и метода оценивания опасных ветровых метеоявлений МРЛК БАЗ. Технический облик МРЛК БАЗ включает в себя основные характеристики, режимы работы и структуру обработки информации об опасных ветровых метеоявлениях в секторах взлёта и посадки ВС.

МРЛК БАЗ представляет собой радиолокационный модуль, который осуществляет излучение, приём, предварительную обработку сигналов и их оцифровку, вторичную и третичную обработку информации и её отображение. Состав МРЛК БАЗ: приемо-передающий антенный модуль со спецвычислителем, АРМ оператора МРЛК БАЗ. Антенна – ЩАР диаметром около 760 мм. Приемо-передающий модуль – когерентный, твердотельный с возможностью формирования и обработки сложных сигналов, изменения частоты повторения импульсов, длительности интервалов когерентной обработки. Частота повторения для режимов МРЛК БАЗ присвоена из диапазонов 9330-9375 МГц, указанный диапазон официально разрешён для проведения работ в области метеорологической радиолокации Государственной комиссией по радиочастотам.

Сканирование пространства в МРЛК БАЗ осуществляется лучом ДНА МРЛС азимутально в горизонтальной плоскости, а затем переключением строки угломестно в вертикальной плоскости. Режим «Круговой обзор» является для МРЛС основным режимом обзора. В этом режиме производится обзор пространства по заданной программе. В режиме «Сектор» антенна перемещается от левой границы раstra (сектора) к правой границе и обратно. Переключение положения антенны по углу места происходит на границе раstra.

Вся обработка данных разделяется на ряд последовательно выполняемых процедур первичной обработки информации, которые отличаются назначением, начальными и конечными данными, а именно: импульсно-доплеровская обработка, измерение мощности шума, обнаружение метеоцелей, измерение радиальной скорости и радиолокационной отражаемости, расчёт интенсивности осадков, измерение параметров

турбулентности, оценка скорости ветра. Вторичная обработка базовых параметров в элементах разрешения по пространству строится на основе первичных данных и обеспечивает: построение карт метеоданных, ГПВ, ГСВ, ВСВ, EDR. Третичная обработка включает построение трёхмерных амплитудных и скоростных портретов метеоявлений, классификация их опасности.

Представлены основные данные и технические параметры МРЛК БАЗ, которые должны обеспечивать стабильность показателей качества изделия в условиях эксплуатации: ширина диаграммы направленности антенны на прием и передачу: по азимуту и углу места не более 3.3 градуса, уровень боковых лепестков излучения решётки волноводно-щелевой не более минус 25 дБ, точность позиционирования по азимуту не хуже 1°.

Разработан метод оценки опасных ветровых явлений (сдвиги ветра, турбулентность) – рис.2, заключающийся в следующем: в ходе первичной обработки информации в метеорологическом радиолокаторе ближней аэродромной зоны формируются измеренные значения радиальной скорости V и ширины спектра радиальных скоростей W в каналах дальности.

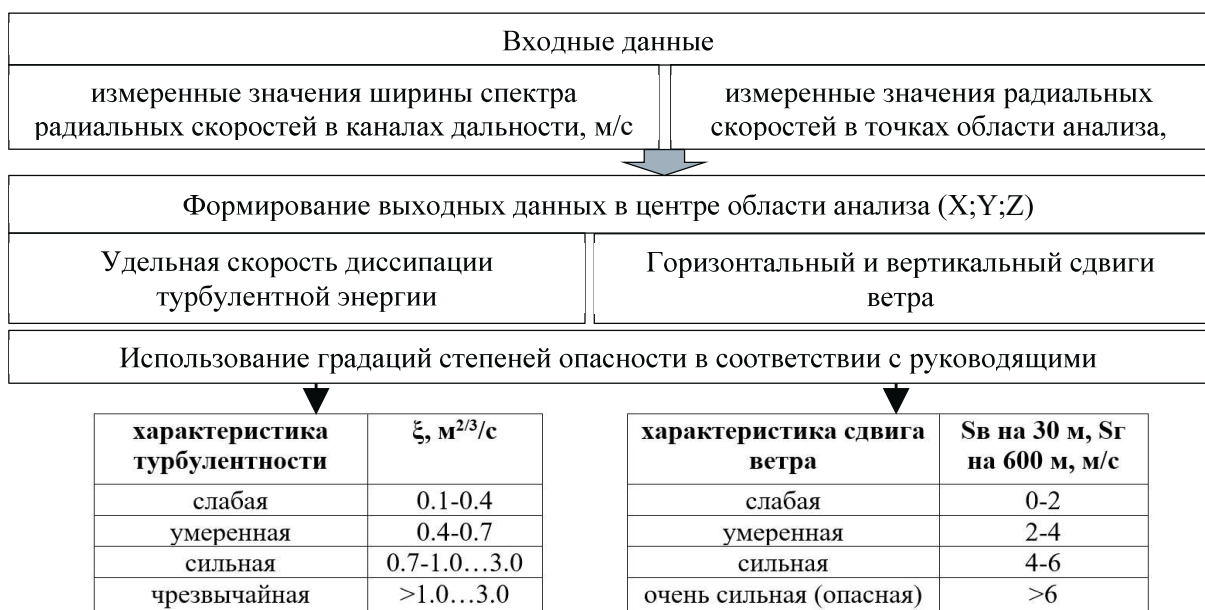


Рис.2 –Схема метода оценки опасных ветровых метеоявлений в МРЛК БАЗ

V и W являются начальными для формирования данных об удельной скорости диссипации турбулентной энергии, сдвигов ветра: горизонтального и вертикального. Далее на следующем этапе обработки информации осуществляется градация степеней опасности в соответствии с требованиями ИКАО, от слабой степени до чрезвычайной (в случае турбулентности) и от слабой до очень сильной – опасной (в случае сдвигов ветра). Преимуществом разработанного метода для оценки опасных ветровых метеоявлений является учёт не только радиальной скорости, но и её СКО – ширины спектра скоростей.

Третья глава посвящена разработкам алгоритмов оценки опасных ветровых метеоявлений для секторного режима МРЛК БАЗ: разработке алгоритма оценки удельной скорости диссипации турбулентной энергии и разработке алгоритма оценки горизонтального и вертикального сдвигов ветра.

Для оценки турбулентности в облачности в МРЛК БАЗ используется параметр EDR согласно требованиям ИКАО. Входными данными для алгоритма определения EDR являются количество каналов дальности, количество угловых и азимутальных углов, декартовы координаты точек области анализа, значения в каналах дальности V и W . Условия функционирования алгоритма – должны быть получены однозначные оценки V и W в каналах дальности, должны быть заданы общие параметры режима «Сектор». Этапами алгоритма являются: инициализация, формирование матрицы коэффициентов и вектора правой части СЛАУ, решение СЛАУ, формирование выходных данных оценок удельной скорости диссипации турбулентной энергии EDR в каналах дальности ε_m ; $m = \overline{0; M-1}$. Алгоритм реализуется согласно блок-схеме – рис.3.

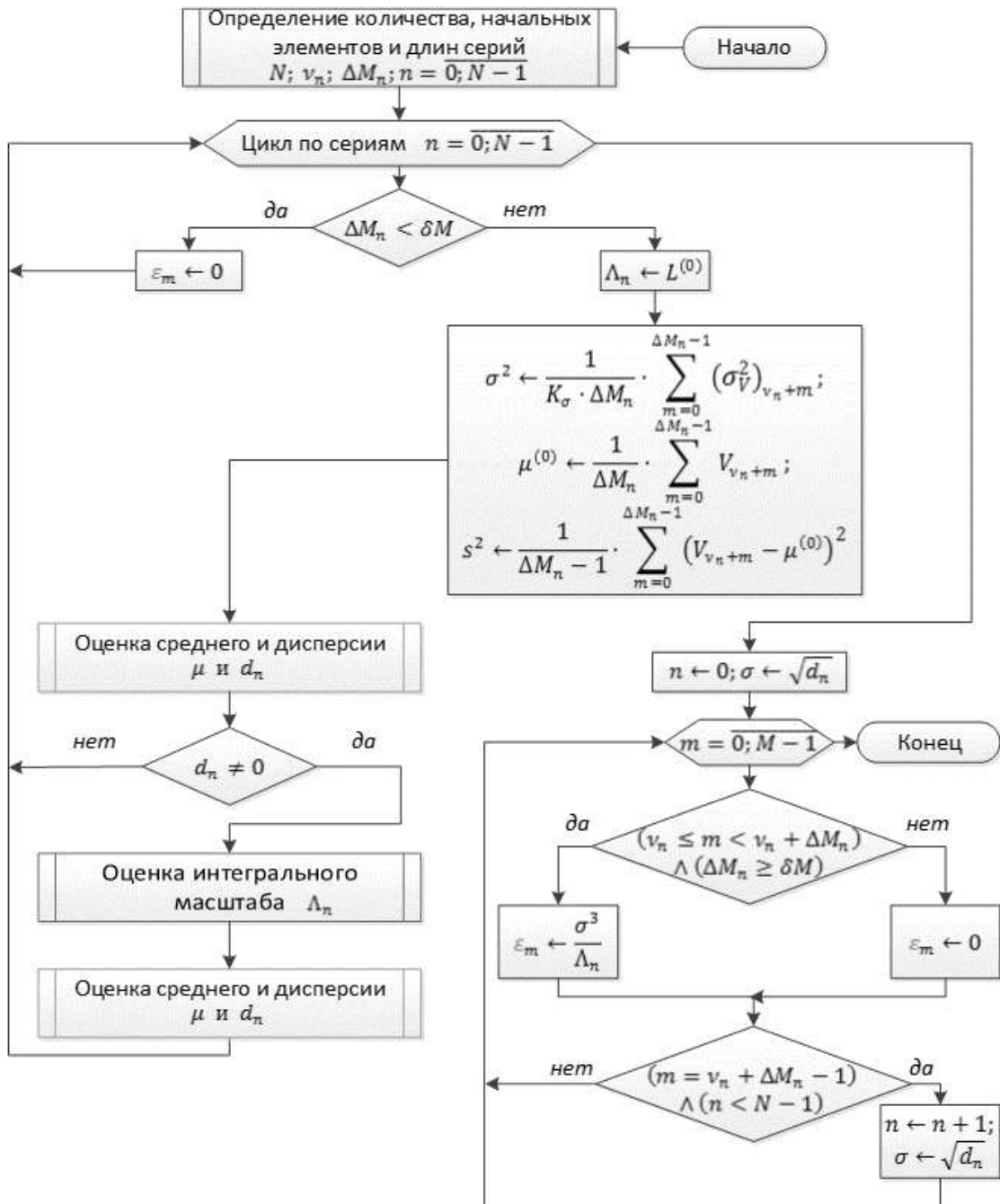


Рис.3 – Блок-схема алгоритма «Измерение параметров удельной скорости диссипации турбулентной энергии»

Выходные массивы ε_m ; $m = \overline{0; M-1}$, представляют собой оценки EDR в каналах дальности. Точность получаемых оценок может быть улучшена за счет дополнительного усреднения при разных значениях установочных углов антенны, а

также усреднения по времени (результатам обработки пачек, полученных на разных интервалах времени).

В МРЛК БАЗ были получены оценки диапазона ветровых характеристик по формуле (1):

$$\varepsilon_{EDR} = \frac{C_\varepsilon \cdot \sigma_V}{\sqrt[3]{\Lambda}} \quad (1)$$

где: $C_\varepsilon = 0.86446$ – безразмерная константа показателя турбулентности EDR; σ_V – оценка среднеквадратического отклонения для радиальной скорости на интервале расчета по дальности, м/с; Λ – оценка интегрального масштаба на интервале расчета по дальности, м.

Полученные диапазоны оценки турбулентности EDR соответствуют следующим значениям: от не более $0,1 \text{ м}^{2/3}/\text{с}$ до не менее $3 \text{ м}^{2/3}/\text{с}$. Полученные значения EDR полностью соответствуют требованиям – табл.1.

Табл. 1 – Требования к диапазону и дискретности оценок для ветровых характеристик

На горизонтальной дальности до 100 км	Удельная скорость диссипации турбулентной энергии, $\text{м}^{2/3}/\text{с}$	Горизонтальный сдвиг ветра, м/с	Вертикальный сдвиг ветра, м/с
Минимальное значение диапазона	Не более 0,1	0	0
Максимальное значение диапазона	Не менее 3	Более 6	Более 6
Дискретность оценки	Менее 0,2	Менее 0,2	Менее 0,5

Для оценивания зон сдвигов ветра при сканировании формируются оценки ВСВ и ГСВ, для этого необходимо оценить характеристики поля скорости ветра в относительно небольшой области (объеме) пространства, что представляется возможным при сканировании главного луча диаграммы направленности МРЛК БАЗ. Входными данными для алгоритма определения ГСВ и ВСВ являются количество каналов дальности, количество угловых и азимутальных углов, декартовы координаты точек области анализа, значения в каналах дальности V и W . Условия функционирования алгоритма – должны быть получены однозначные оценки V и W в каналах дальности, должны быть заданы общие параметры режима «Сектор».

При работе алгоритма последовательно выполняются следующие блоки.

1) Инициализация. Центр области анализа определяется с помощью операторов

$$d \leftarrow \frac{D[0]+D[M-1]}{2}; a \leftarrow \frac{\alpha[0]+\alpha[N-1]}{2}; b \leftarrow \frac{\beta[0]+\beta[K-1]}{2};$$

$$\begin{cases} X \leftarrow d \cdot \cos a \cdot \cos b; \\ Y \leftarrow d \cdot \sin b; \\ Z \leftarrow d \cdot \sin a \cdot \cos b. \end{cases}$$

Элементам матрицы коэффициентов R ($I \times I$) и вектора правых частей f ($I \times 1$) СЛАУ присваиваются начальные нулевые значения:

$$\text{для } i = \overline{0; I-1} \quad \begin{cases} f[i] \leftarrow 0; \\ \text{для } j = \overline{0; I-1} \quad R[i, j] \leftarrow 0. \end{cases}$$

Задаются начальные значения счетчиков метеоцелей, имеющих различные дальности и угловые положения: $p \leftarrow 0$; $q \leftarrow 0$; $s \leftarrow 0$.

2) Формирование матрицы коэффициентов и вектора правой части СЛАУ. По мере формирования оценок $V[m, n, k]$ радиальных скоростей (для различных угловых положений ГЛ ДНА при сканировании) выполняются вложенные циклы:

для $k = \overline{0; K-1}$

$q1 \leftarrow 0;$

для $n = \overline{0; N-1}$

$p1 \leftarrow 0;$

для $m = \overline{0; M-1}$

если $V[m, n, k] \neq 0$, то

$$\rho[0] \leftarrow \frac{x[m, n, k]}{D[m, n, k]}; \rho[1] \leftarrow \frac{y[m, n, k]}{D[m, n, k]}; \rho[2] \leftarrow \frac{z[m, n, k]}{D[m, n, k]};$$

$$\rho[3] \leftarrow \rho[0] \cdot (x[m, n, k] - X); \rho[4] \leftarrow \rho[0] \cdot (y[m, n, k] - Y);$$

$$\rho[5] \leftarrow \rho[0] \cdot z[m, n, k] - \frac{X \cdot \rho[2] + Z \cdot \rho[0]}{2};$$

$$\rho[6] \leftarrow \rho[2] \cdot (y[m, n, k] - Y); \rho[7] \leftarrow \rho[2] \cdot (z[m, n, k] - Z);$$

$$\rho[8] \leftarrow \rho[1] \cdot (y[m, n, k] - Y);$$

для $i = \overline{0; I-1}$

$$f[i] \leftarrow f[i] + \rho[i] \cdot V[m, n, k];$$

$$\text{для } j = \overline{i; I-1} \quad R[i, j] \leftarrow R[i, j] + \rho[i] \cdot \rho[j];$$

$p1 \leftarrow p1 + 1;$

если $p1 > p$, то $p \leftarrow p1$; если $p1 > 0$, то $q1 \leftarrow q1 + 1$;

если $q1 > q$, то $q \leftarrow q1$; если $q1 > 0$, то $s \leftarrow s + 1$;

для $i = \overline{1; I-1}$ для $j = \overline{0; i-1}$ $R[i, j] \leftarrow R[j, i]$.

В случае реализации условия ($p < P$ или $q < Q$ или $s < S$) необходимо завершить выполнение рассматриваемой процедуры с выдачей сообщения «Недостаточное количество метеоцелей».

Решение СЛАУ $R \cdot x = f$ с симметричной положительно определенной матрицей коэффициентов R реализуется путем выполнения последовательности циклов:

для $i = \overline{0; I-1}$

для $j = \overline{i; I-1}$

$s \leftarrow 0;$

если $i > 0$, то для $k = \overline{0; i-1}$ $s \leftarrow s + G[j, k] \cdot G[i, k];$

если $i = j$, то $G[j, i] \leftarrow \sqrt{R[i, i] - s}$, иначе $G[j, i] \leftarrow \frac{R[j, i] - s}{G[i, i]}$;

для $i = \overline{0; I-1}$

$s \leftarrow 0;$

если $i > 0$, то для $k = \overline{0; i-1}$ $s \leftarrow s + G[i, k] \cdot x[k];$

$$x[i] \leftarrow \frac{f[i] - s}{G[i, i]};$$

для $j = \overline{0; I-1}$

$s \leftarrow 0;$ $i \leftarrow I - 1 - j;$

если $j > 0$, то для $k = \overline{i+1; I-1}$ $s \leftarrow s + G[k, i] \cdot x[k];$

$$x[i] \leftarrow \frac{x[i] - s}{G[i, i]}.$$

Формирование выходных данных. Оценки вектора скорости $V = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \leftarrow \begin{bmatrix} x[0] \\ x[1] \\ x[2] \end{bmatrix}$ в

центре области анализа $X; Y; Z$; вертикального сдвига ветра $S_v \leftarrow \sqrt{(x[4])^2 + (x[8])^2 + (x[6])^2}$ и сдвига ветра в горизонтальной плоскости S_r , определяемого с помощью операторов являются выходными для рассмотренного алгоритма.

$$S_r \leftarrow \frac{1}{2} \left[a + b + \sqrt{(a - b)^2 + 4 \left(x[3] \cdot x[7] + \left(\frac{x[5]}{2} \right)^2 \right)^2} \right] \quad (2)$$

где: $a \leftarrow (x[3])^2 + \left(\frac{x[5]}{2} \right)^2$; $b \leftarrow (x[7])^2 + \left(\frac{x[5]}{2} \right)^2$

Приведены оценки для СКО формирования сдвигов ветра. Результаты показали, что значение шага дискретизации для вертикального сдвига ветра составляет 0,5 м/с и соответствует выдвинутым в работе требованиям – табл.1. В МРЛК БАЗ дискретность оценки ГСВ на 600 м, обеспечивает определение уровней градации опасности горизонтального сдвига ветра и составляет не более 0,2 м/с, что соответствует выдвинутым в работе требованиям – табл. 1.

В четвертой главе изложены разработанные методики валидации метеоданных, рекомендации по применению алгоритмов оценки опасных ветровых метеоявлений в секторном режиме МРЛК БАЗ.

Международные методики испытаний метеорологических радиолокаторов чаще всего включают проверку только радиолокационной отражаемости. На территории Российской Федерации методиками проверки метеорологических радиолокационных данных занимается Центральная аэрологическая обсерватория, в методиках которой информация о правилах сопоставления данных о векторе смещения облачных образований, ГПВ, ГСВ, ВСВ, EDR недостаточна или вовсе отсутствует. Показано, что разработаны методики валидации опасных ветровых метеорологических явлений.

Разработанные методики валидации для сопоставления данных об опасных ветровых метеоявлениях включают правила сравнения информации по времени, пространству и качеству. Для валидации данных сдвигов ветра, турбулентности к валидации привлекаются данные бортового журнала погоды; для сопоставления вектора смещения облачных образований производится расчёт вектора смещения, осуществляемый по характерным очагам метеорологических явлений; для сопоставления векторного поля скорости – данные радиозонда и AMDAR. В работе приведены формулы статистической обработки накопленной информации: расчет вероятности оправдавшихся и неоправдавшихся случаев – формула (3), расчет вероятности ложных тревог ВСВ и ГСВ, турбулентности МРЛК БАЗ – формула (4).

$$P_{\text{опр}} = \frac{N}{N_{\text{э}}} \cdot 100\% \quad (3)$$

где N – число случаев явлений, зафиксированных МРЛК БАЗ и совпавших с данными достоверных источников; $N_{\text{э}}$ – число случаев явлений согласно достоверным данным, выраженное в процентах.

$$P_{\text{л.т.}} = \frac{N_{\text{л.т.}}}{N_{\text{МРЛК БАЗ}}} \cdot 100\% \quad (4)$$

где $N_{\text{л.т.}}$ – общее число ложных тревог явлений по данным МРЛК БАЗ; $N_{\text{МРЛК БАЗ}}$ – общее число случаев явлений, выявленных МРЛК БАЗ, выраженное в процентах.

Приведен перечень достоверных и доступных автору источников метеорологических данных, которые привлекались для валидации метеорологических явлений, параметров и характеристик МРЛК БАЗ.

В работе приведены таблицы, статистические диаграммы для изучения результатов валидации. Пределы ошибок в оценках скорости и направления ветра, перемещения метеоявлений составили не более ± 3 м/с и не более $\pm 30^\circ$, что удовлетворяет современным требованиям. Пример сравнительного профиля направления ветра показан на рис.4.

В ходе сбора статданных было выявлено, что выборки оценок ГСВ, ВСВ, EDR являются статистически незначимыми из-за особенностей сравнения данных по времени и пространству, поэтому ранее показаны расчёты значений диапазонов и дискретности оценок для ГСВ, ВСВ, EDR, которые удовлетворяют требованиям.

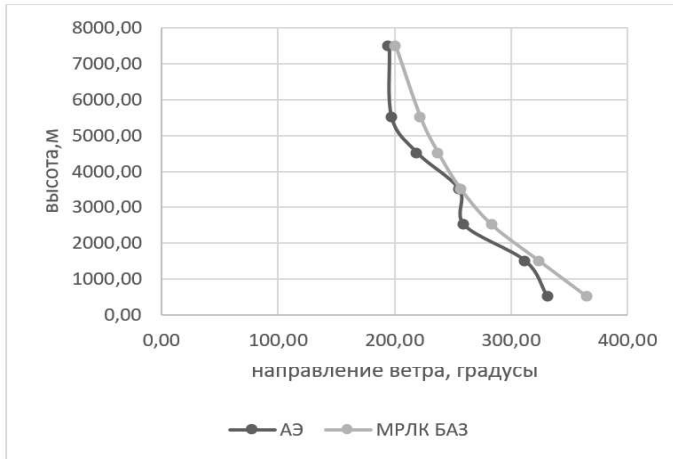


Рис.4 – Профили направления ветра АЭ «Долгопрудный» и МРЛК БАЗ «ЦВКГ им. А.А. Вишневого» от 16.09.2018 г. 12:00 UTC

Приведены практически рекомендации по использованию МРЛК БАЗ, а именно: этапы работы с метеорологическими радиолокационными данными и их графическими представлениями. В работе показано, что определение метеорологических явлений, параметров, характеристик должно быть адаптировано для конкретного региона. Например, для наиболее оптимальной работы МРЛК БАЗ на аэродроме рекомендуется размещение на удалении 100-150 м от траверза точки центра ВПП, ширина сектора в пределах СВВП.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе представлено решение актуальной, имеющей важное значение для воздушного транспорта Российской Федерации, научно-технической задачи разработки метода и алгоритмов оценивания опасных ветровых метеоявлений в наземных метеорологических радиолокационных комплексах ближней аэродромной зоны.

В ходе исследований в работе были получены следующие основные **результаты**:

1. Проведен анализ метеоугроз, влияющих на безопасность полетов в районе аэродрома и проанализирован состав и возможности современных средств метеобеспечения полетов.
2. Обоснован технический облик секторного режима работы МРЛК БАЗ, включающий характеристики и структуру алгоритмического обеспечения секторного режима.
3. Разработан метод и алгоритмы оценки опасных ветровых метеоявлений (горизонтальный и вертикальный сдвиг ветра, турбулентность) для секторного режима работы МРЛК БАЗ.
4. Разработаны методики валидации метеоданных о ветровых метеоявлениях в МРЛК БАЗ применительно к секторному режиму работы.
5. Разработаны рекомендации и основные положения концепции применения алгоритмов оценки опасных ветровых метеоявлений в секторном режиме МРЛК БАЗ в интересах аэронавигационного обеспечения полетов.

На основе полученных результатов можно сформулировать следующие **выводы**:

1. Метеоусловия оказывают значительное влияние на безопасность полётов, более 60% авиационных событий происходят при неблагоприятных метеоусловиях, в особенности при сдвигах ветра и турбулентности в секторах взлёта и посадки ВС. Анализ средств МОП показал, что для регистрации опасных ветровых метеоявлений (сдвиги ветра, турбулентность) необходим метеорологический радиолокатор МРЛК БАЗ помимо других метеорологических датчиков для задач аэронавигации. МРЛК БАЗ предоставляет ветровые данные в секторном режиме, охватывающем сектора взлёта и посадки ВС. Показано, что необходимо расширить состав метеолокаторов путём включения аэродромных малогабаритных, поскольку есть задача навигации и УВД – и без локатора БАЗ её эффективно решить невозможно.

2. Технический облик секторного режима работы МРЛК БАЗ включает в себя основные характеристики, структуру обработки информации об опасных ветровых метеоявлениях в секторах взлёта и посадки ВС. Показано, что сканирование пространства осуществляется в специализированном секторном режиме, предоставляющем данные о сдвигах ветра и турбулентности с высокой

пространственной и временной дискретностью. Обработка метеоданных разделяется на три этапа, в результате которых поочередно выполняются: на первом этапе – импульсно-доплеровская обработка, измерение мощности шума, обнаружение метеоцелей, измерение радиальной скорости, радиолокационной отражаемости; на втором этапе – построение карт метеоданных, ветровых характеристик; на третьем этапе – построение трёхмерных амплитудных и скоростных портретов метеоявлений, классификация их опасности.

3. Для оценки опасных ветровых метеоявлений в секторном режиме разработан метод и алгоритмы оценки опасных ветровых метеоявлений: после формирования оценок V и W происходит оценка турбулентности, горизонтального и вертикального сдвигов ветра, далее осуществляется их градация по степени опасности в соответствии с требованиями ИКАО. В качестве параметра турбулентности выбрана удельная скорость диссипации турбулентной энергии, оцениваются вертикальный (на 30 м) и горизонтальный (на 600 м) сдвиги ветра согласно требованиям ИКАО. Преимуществом разработанного метода для оценки опасных ветровых метеоявлений является учёт не только радиальной скорости, но и её СКО – ширины спектра скоростей. Разработаны алгоритмы оценки ветровых метеоявлений для СВиП ВС, позволяющие обеспечить высокую ситуационную осведомленность о метеообстановке в БАЗ.

4. Продемонстрировано, что для анализа достоверности полученных оценок сдвига ветра и турбулентности были разработаны методики валидации ветровых данных, которые содержат правила сравнения по времени, пространству и качеству. Анализ сформированных оценок показал, что значения полученных EDR, ГСВ, ВСВ оцениваются с требуемой дискретностью и диапазоном.

5. Разработаны практические рекомендации по использованию МРЛК БАЗ, в частности: этапы работы с метеоданными и их графическими представлениями. Показано, что определение метеорологических явлений, параметров и характеристик должно быть адаптировано для конкретного региона.

Дальнейшее направление исследований в рамках рассматриваемой научно-технической задачи связано с разработкой методов и алгоритмов обнаружения зон обледенения, скопления птиц в секторах взлета и посадки ВС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Галаева К.И., Болелов Э.А., Губерман И.Б., Ещенко А.А., Далецкий С.В. Обоснование задач, решаемых метеорологическим радиолокационным комплексом ближней аэродромной зоны/ Научный вестник ГосНИИ ГА №20 2018, С.74-81;

2. Болелов Э.А., Васильев О.В., Галаева К.И. Пространственная изменчивость профиля температуры воздуха в районе аэродрома/ Научный вестник ГосНИИ ГА, №29, 2019, С.146-154;

3. Bolelov E.A., Vasiliev O.V., Galaeva K.I., Ziabkin S.A. Analysis of the height difference of the zero isotherm according to two temperature profilers. Civil Aviation High Technologies. 2020; 23(1):19-27.

4. Галаева К.И. Анализ результатов испытаний и сертификации метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны/Научный вестник МГТУ ГА, №1, 2020, С.28-40.

Публикации в других изданиях

1. Васильев О.В., Галаева К.И., Фридзон М.Б. Метеорологический радиолокационный комплекс ближней зоны для обеспечения безопасности полетов гражданской и государственной авиации / Васильев О.В./ Научно-техническая конференция «Вопросы научной и технической поддержки совершенствования метеорологического обеспечения гражданской авиации». Метеоспектр №4, 2016. С.40-43.

2. Галаева К.И. Применение метеорологических радиолокационных станций. / Галаева К.И. / Международная научно-практическая конференция «Гражданская авиация: социально-культурные основания и инновации». Сборник научных статей. -г. Москва, -2017 г.
3. Фридзон М.Б., Васильев О.В., Галаева К.И. Применение наземных метеорологических радиолокационных станций. I Международная заочная научно-практическая конференция «Авиация: история, современность, перспективы развития» (заочно). Сборник материалов. -г. Минск, -2016 г.
4. Галаева К.И. Обоснование требований к современным метеорологическим локаторам ближней зоны аэродрома. / Галаева К.И. / XIV всероссийская научно-техническая конференция «Научные чтения по авиации, посвящённые памяти Н.Е. Жуковского». Сборник докладов. -г. Москва, -2017 г.
5. Галаева К.И., Фридзон М.Б. Обоснование требований к наземным метеорологическим локаторам ближней аэродромной зоны. Всероссийская научно-практическая конференция, посвящённая 50-летию Иркутского филиала МГТУ ГА «Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации» (заочно). Сборник трудов. -Иркутск, -2017 г.
6. Галаева К.И., Васильев О.В., Фридзон М.Б. Требования к наземным метеорологическим радиолокаторам X-диапазона. II Международная заочная научно-практическая конференция «Авиация: история, современность, перспективы развития» (заочно). Сборник материалов. -г. Минск, -2017 г.
7. Галаева К.И. Анализ этапов развития метеорологической радиолокации. / Галаева К.И. / XV всероссийская научно-техническая конференция «Научные чтения по авиации, посвящённые памяти Н.Е. Жуковского». Сборник докладов. -г. Москва, -2018 г.
8. Галаева К.И. Назначение и задачи метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны МРЛК БАЗ. / Галаева К.И. / XV всероссийская научно-техническая конференция «Научные чтения по авиации, посвящённые памяти Н.Е. Жуковского». Сборник докладов. -г. Москва, -2018 г.
9. Галаева К.И. Описание режимов работы метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны. XLIV Международная молодёжная научно-техническая конференция «Гагаринские чтения» (заочно). Сборник тезисов. -Москва, -2018 г.
10. Фридзон М.Б., Галаева К.И. Обоснование принципов построения метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны МРЛК БАЗ. /Галаева К.И./ Международная научно-техническая конференция «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», Конференция в МГТУ ГА. Сборник тезисов. -Москва, -2018 г.
11. Галаева К.И. Развитие отечественной метеорологической радиолокации. /Галаева К.И./ Международная научно-техническая конференция «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», Конференция в МГТУ ГА. Сборник тезисов. -Москва, -2018 г.
12. Галаева К.И., Болелов Э.А., Фридзон М.Б. Обнаружение сдвигов ветра в секторах взлёта и посадки воздушных судов. Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ» (заочно). Сборник тезисов. -Санкт-Петербург. -2020 г.

Соискатель:

