

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технический университет гражданской  
авиации» (МГТУ ГА)

---

На правах рукописи

**ГАЛАЕВА**

**Ксения Игоревна**

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

2.9.6 «Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Научный руководитель**  
Доктор технических наук, доцент  
Болелов Эдуард Анатольевич

Москва  
2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
<b>Обозначения и сокращения</b>	5
<b>Введение</b>	7
<b>1. Обоснование необходимости повышения точности оценки ветровых характеристик в секторах взлета и посадки воздушных судов</b>	17
1.1 Анализ влияния метеообстановки и ветровых характеристик метеоявлений на безопасность полётов в районе аэродрома	22
1.2 Анализ возможностей современных средств и систем анализа метеообстановки в районе аэродрома	25
1.3 Обоснование приоритетных путей повышения точности оценки опасных ветровых метеоявлений в секторах взлета и посадки в районе аэродрома	50
1.4 Постановка задачи	56
Выводы по 1 главе	58
<b>2. Разработка технического облика секторного режима и метода оценивания опасных ветровых метеоявлений метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны</b>	62
2.1 Анализ особенностей функционирования метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны в обзорном режиме	62
2.2 Разработка технического облика секторного режима работы в метеорологическом радиолокационном комплексе ближней аэродромной зоны	73

2.3. Разработка метода оценки ветровых параметров и характеристик в метеорологическом радиолокационном комплексе ближней аэродромной зоны	84
Выводы по 2 главе	95
<b>3. Разработка алгоритмов оценки опасных ветровых метеоявлений для секторного режима метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны</b>	<b>98</b>
3.1 Разработка алгоритма оценки удельной скорости диссипации турбулентной энергии и анализ его эффективности	99
3.2 Разработка алгоритма оценки горизонтального и вертикального сдвигов ветра и анализ его эффективности	134
Выводы по 3 главе	163
<b>4. Разработка методик валидации метеоданных, рекомендаций по применению алгоритмов оценки опасных ветровых метеоявлений в секторном режиме метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны</b>	<b>165</b>
4.1. Разработка методик валидации метеорологических радиолокационных данных метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны	165
4.2. Анализ результатов валидации метеорологических радиолокационных данных метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны, полученных в ходе испытаний	179
4.3 Разработка практических рекомендаций и концепции применения алгоритмов оценки опасных ветровых метеоявлений в секторном режиме метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны	187
Выводы по 4 главе	200
<b>Заключение</b>	<b>202</b>
<b>Список использованных источников</b>	<b>210</b>

<b>Приложения</b>	224
Приложение А. Основные технические характеристики существующих наземных метеорологических радиолокационных станций X-диапазона отечественного и иностранного производства	225
Приложение Б. Базы статистических данных для сравнения ветровых характеристик по данным МРЛК БАЗ и априорно достоверных (эталонных) метеорологических источников	240
Приложение В. Расчёт точности определения сдвигов ветра	256

## Обозначения и сокращения

АМИС – автоматизированные метеорологические измерительные системы

АП – авиационные происшествия

АРМ – автоматизированное рабочее место (оператора)

АЭ – аэрологическое зондирование

БАЗ – ближняя аэродромная зона

БП – безопасность полётов

БПФ – быстрое преобразование Фурье

ВиП – взлёт и посадка

ВПП – взлётно-посадочная полоса

ВС – воздушное судно

ВСВ – вертикальный сдвиг ветра

ВСО – вектор смещения облачных образований

ГА – гражданская авиация

ГКР – Государственная комиссия по радиочастотам

ГЛ – главный лепесток антенны

ГПВ – горизонтальное поле ветра

ГСВ – горизонтальный сдвиг ветра

ДНА – диаграмма направленности антенны

ЕТР – Европейская территория России

ЖБП – Журнал бортовой погоды

ИКО – индикатор кругового обзора

ЛТ – ложная тревога

МОП – метеорологическое обеспечение полётов

МРЛК БАЗ – метеорологический радиолокационный комплекс ближней аэродромной зоны

МРЛС – метеорологическая радиолокационная станция

МФ – медианная фильтрация

МЯ – метеорологическое явление

НГО – нижняя граница облачности

НиУ – нарушения и упущения

НПК – научно-практическая конференция

НТК – научно-техническая конференция

ОрВД – Организация воздушного движения

ОЯП – опасные явления погоды

Программа «ОрВД» – программа «Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (2009-2020 гг.)»

РЛП – радиолокационные продукты

РМД – радиолокационные метеорологические данные

СВиП – сектора взлёта и посадки воздушных судов

СВП – спектрально-временной портрет

СПО – специальное программное обеспечение

ТТХ – тактико-технические характеристики

ТЯН – турбулентность ясного неба

УВД – управление воздушным движением

ФЦП – федерально-целевая программа

ЦАО – Центральная аэрологическая обсерватория

ЩАР – щелевая антенная решётка

EDR – скорость диссипации турбулентной энергии

UTC – всемирное скоординированное время

V – радиальная скорость

W – ширина спектра скоростей

Z – радиолокационная отражаемость

## Введение

**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 гражданской авиации (далее – ГА) [56] 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 метеообеспечения полётов (далее – МОП) ГА при сложных метеоусловиях. Следовательно, причинами авиационных инцидентов и происшествий являются недостаточная информационная доступность для отечественных аэродромов к анализу метеообстановки, в бóльшей степени при обнаружении чрезвычайной турбулентности и очень сильных (опасных) сдвигов ветра.

При этом метеорологические датчики, определяющие атмосферные образования, подразделяются на контактные и дистанционные. В свою очередь, контактные датчики непосредственно измеряют параметры атмосферы, дистанционные датчики получают параметры атмосферы путем их преобразования из других физических характеристик (электромагнитных, звуковых волн и др.)

В свою очередь, наземный метеорологический радиолокатор является уникальным источником с высокой пространственной и временной дискретностью для анализа метеообстановки в ближней аэродромной зоне (далее – 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 управления воздушным движением (далее – УВД) и экипажей воздушных судов (далее – 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 (далее – 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, далее указанная гипотеза была подтверждена практическим путём 20 февраля 1941 г. [104].

В июле 1942 года были получены первые данные радиолокатора о метеоцелях в виде карт, доклад о проведённых наблюдениях был опубликован в 1943 г [111]. В 1943 г. авиационный метеорологический центр США стал получать метеорологические данные радиолокационной станции Массачусетского технологического института.

Большой вклад в основы радиометеорологии были заложены Дж. Райдом, Д. Атласом, Х. Голдштейном, А. Сигерто, А. Бентом, Д. Керром, М. Лигдом, Р. Векслером [10,104,106,144-145]. Работы Д. Керра, Д. Райда и др. включали в себя данные о затухании в атмосфере электромагнитных волн, степени интенсивности радиоэха облаков и сопровождающимися ими метеоявлений.

С 1944 по 1950 гг. было установлено, что наличие в радиоэхе «яркой полосы» зависит от состояния фазы гидрометеоров [106] и рассмотрено в обзорах М. Лигда [131] и Р. Векслера [144-145], опубликованных в Компендиуме метеорологии Американского Метеорологического общества.

В 1948 г. Д. Маршаллом и В. Пальмером был осуществлён анализ зависимостей между отражаемостью радиоэха, размерами гидрометеоров, скоростью выпадения осадков [104,131,134-136].

Далее в 50-х гг. XX века были получены результаты в следующих категориях: поляризация [105], измерение осадков, отображение радиолокационной отражаемости, процесс флуктуации сигналов [135]. Также была рассмотрена возможность слежения за торнадо (ураганами) с использованием радиолокаторов.

В 60-х гг. XX века особый интерес представляла отражаемость радиоэха гроз и града [104]. В Советском Союзе были разработаны радиолокационные методы детектирования града, осуществлено несколько экспериментальных мероприятий по градозащите [20]. В оперативную практику постепенно внедрялись метеорадиолокаторы. В указанный период впервые была выпущена монография Баттана, посвящённая метеорадиолокации [108].

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

В XXI в. в ряде стран мира (на территории Российской Федерации – с 2008 г. ДМРЛ-С) доплеровские двухполяризационные метеорадиолокаторы начали внедряться в оперативную практику. Утверждалось, что двухполяризационные методы способны корректировать ослабление радиоволн гидрометеорами, и, следовательно, повысят качество измерений метеорадиолокаторов, а также позволят автоматически распознавать фазовое состояние гидрометеоров [50].

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.

Таким образом, несмотря на значительные успехи в разработке метеорологических радиолокационных комплексов, в том числе малогабаритных, по-прежнему остается не решенной 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 метео данных 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 (далее – ГСВ и ВСВ, соответственно), турбулентность (далее – 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 (далее - СВВП).

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 ближней аэродромной зоны, позволяющий улучшить ситуационную осведомленность о ветровой обстановке в секторах взлета и посадки для экипажей воздушных судов и диспетчеров управления воздушным движением. 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 метео данных 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 воздушных судов 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 [69].

**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.

**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.

#### **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.

#### **Апробация работы**

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

Доклады, сделанные по теме диссертационной работы на конференциях: XIV, XV всероссийская НТК «Научные чтения по авиации, посвящённые памяти Н.Е. Жуковского», были признаны лучшими и поощрены памятными дипломами.

В 2017 г. НИР на тему: «Метеорадиолокационный комплекс БАЗ» получила поддержку в конкурсе на соискание грантов Ученого совета МГТУ ГА на проведение фундаментальных, поисковых и прикладных НИР.

В 2018 г. НИР на тему: «Анализ результатов работы метеорадиолокационного комплекса БАЗ» получила поддержку в конкурсе на соискание грантов Ученого совета МГТУ ГА на проведение фундаментальных, поисковых и прикладных НИР.

#### **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) [14, 24, 31, 112]; 12 научных статей и тезисов, опубликованных в других изданиях (43 страницы) [18, 25-30, 32-34, 97-98]; 1 патент (9 страниц) [17], 2 отчёта НИР (287 страниц) [3, 53].

**Реализация результатов** 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.

#### **Структура и объём диссертационной 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.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю доктору технических наук, доценту Э. А. Болелову, коллективу кафедры «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта» МГТУ ГА и сотрудникам АО «Бортовые аэронавигационные системы» за ценные замечания и предложения на всех этапах диссертационной работы.



## Глава 1. Обоснование необходимости повышения точности оценки ветровых характеристик в секторах взлета и посадки воздушных судов

Сегодня на территории России функционируют 247 гражданских аэродрома и вертодрома [38], 42 аэродрома из которых относятся к классам Д, Е, т.е. это аэродромы местных воздушных линий, где номенклатура средств метеорологического обеспечения полётов не соответствует метеоугрозам. Помимо указанного общего числа аэродромов и вертодромов на территории Российской Федерации функционируют в качестве «посадочных площадок» 59 малооборудованных аэродромов и вертодромов – рисунок 1.1.



Рисунок 1.1 – Диаграмма гражданских аэродромов и вертодромов, включённых в государственный реестр, и иных аэродромов и вертодромов не в государственном реестре (действующих в статусе «посадочных площадок»)

Как правило, малооборудованные аэродромы и вертодромы расположены в отдаленных регионах Российской Федерации: на Дальнем Востоке, Крайнем Севере [50,60].

Текущая проблема заключается в низких информационных возможностях оценок векторного поля скорости, вектора смещения облачных образований, а также таких опасных метеорологических явлений, как турбулентность, сдвиг ветра, шквал, смерч, что прямо или косвенно влияет на безопасность полётов.

Безопасность полётов зависит как от метеорологических условий, так и от качества метеорологического обеспечения полётов ГА. Порядок метеорологического обеспечения при подготовке и выполнении полётов ГА РФ приведен в документах [94-96]. В настоящей работе безопасность полётов рассматривается в зависимости влияния на неё метеорологических условий и качества метеорологического обеспечения полётов ГА.

Сначала рассмотрим влияние метеоусловий на безопасность полётов (далее – БП).

Согласно отчётам ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» за 2012-2013, 2015, 2017-2020 гг. [2] произошло 225 авиационных событий, 8 из которых проходили при сложных (неблагоприятных) метеоусловиях и при неоправдавшемся прогнозе погоды – таблица 1.1.

Таблица 1.1 – Данные об авиационных событиях за период 2012-2013, 2015, 2017-2020 гг.

период	2012	2013	2015	2017	2018	2019	2020	Всего
авиационные события	26	75	19	47	27	31	28	253
авиационные события при сложных (неблагоприятных) метеоусловиях	18	11	17	39	26	25	22	158
авиационные события при неоправдавшемся прогнозе погоды (метеоусловия сложные, неблагоприятные)	2	1	1	1	1	2	0	8

период	2012	2013	2015	2017	2018	2019	2020	Всего
авиационные события при неоправдавшемся прогнозе погоды (простые метеоусловия)	0	0	0	0	0	0	0	0
авиационные события без метеообеспечения полётов ГА (а также информация о получении метеоконсультации экипажем перед вылетом отсутствует)	8	31	13	15	11	17	18	113
авиационные события без метеообеспечения полётов ГА при сложных (неблагоприятных) метеоусловиях (а также информация о получении метеоконсультации экипажем перед вылетом отсутствует)	4	9	13	15	11	17	18	87

Таким образом, метеоусловия косвенно и напрямую влияют на безопасность полётов, 62,4% авиационных событий произошли при сложных (неблагоприятных) метеоусловиях, 34,4% авиационных событий происходили без МОП ГА при сложных метеоусловиях.

В настоящее время наблюдаются недостаточные информационные возможности (для анализа метеообстановки, при обнаружении опасных ГСВ, ВСВ, EDR) на некоторых отечественных аэродромах, в особенности в отдалённых регионах Российской Федерации. В свою очередь, текущий уровень метеорологического обеспечения полётов ГА в отдалённых регионах Российской Федерации напрямую влияет на БП ВС, которые обслуживаются аэродромами и вертолетными площадками, малооборудованными метеорологическими средствами. Следовательно, необходимо развитие метеорологического обеспечения полётов ГА в том числе и на малооборудованных аэродромах и вертодромах Российской Федерации.

Далее рассмотрим влияние качества метеорологического обеспечения на безопасность полётов ГА. Метеоинформация предоставляется метеорологическими органами на разных этапах взлета. Одними из основных

функций метеорологических органов являются приём, обработка, хранение, передача потребителям метеорологических данных, обмен метеоинформацией с другими органами, наблюдение в районе ответственности ЕС ОрВД за метеорологическими условиями, влияющие на БП ВС, выпуск предупреждений по воздушным трассам, проходящим через район ответственности [36].

Список метеоинформации для представления эксплуатантам и экипажам ВС представлена в источнике [59], в число которых входят данные наземных метеорадиолокаторов.

Осуществляется следующее предоставление метеоинформации эксплуатантам и экипажам ВС: с борта ВС проводятся и передаются регулярные наблюдения при наборе высоты и полете по маршруту; специальные и нерегулярные наблюдения на любом этапе полета [59]. Регулярные наблюдения проводятся при полете по маршруту в установленных пунктах и передаются с борта ВС при помощи речевой связи. Специальные наблюдения проводятся с борта всех ВС в тех случаях, когда наблюдаются опасные явления погоды в соответствии с перечнем [59].

Аэродромным метеорологическим органом выпускаются предупреждения о ГСВ, ВСВ, включающие данные о наблюдаемом/ожидаемом ГСВ, ВСВ, который может представлять опасность при заходе на посадку или при взлете.

Для наблюдения за фактической погодой при обеспечении точных заходов на посадку применяются автоматизированные метеорологические измерительные системы (далее - АМИС). АМИС обеспечивают автоматизированное измерение, сбор, обработку, распространение и отображение в режиме реального времени метеопараметров, которые влияют на посадку и взлет.

Аэродромный метеорологический орган составляет прогноз для посадки ВС TREND, состоящий из краткого изложения ожидаемых изменений метеопараметров: скорости и/или направления ветра, видимости, явлений погоды, облачности, и прилагающийся к местной регулярной/специальной сводке, к сводке METAR или SPECI.

Несмотря на существующий регламент предоставления метеоинформации заинтересованным пользователям, представленный в источнике [59], сегодня до сих пор существует проблема взаимодействия метеорологических органов с органами УВД. Подтверждением этих слов является авиакатастрофа самолёта RRJ-95B, произошедшая 05.05.2019 г. [74]. Согласно предварительному отчёту по результатам расследования авиационного происшествия [74] и транспортному надзору-расследованию (проведенному Ивановым К. И.) ВС стало неуправляемым ещё в воздухе, после удара молнии. Однако метеоинформация о наблюдавшейся грозовой деятельности, выпущенная метеорологическим органом, не была получена ни экипажем, ни диспетчером, что говорит о явной проблеме взаимодействия метеорологического органа и органа УВД. Следовательно, возникает вопрос о ситуационной осведомленности экипажа в районе аэродрома.

Также в источнике [9] было продемонстрировано, что существующая технология взаимодействия служб обслуживания воздушного движения и авиационной транспортной системы имеет ряд существенных недостатков, влияющих на пропускную способность аэродрома, расход топлива ВС, безопасность полётов. В свою очередь, недостатки в текущем взаимодействии между метеорологическими органами и органами обслуживания воздушного движения дополнительно способствует ухудшению безопасности полётов ВС.

При этом согласно аэронавигационному плану в период с 2013 по 2019 гг. планировалось обеспечение более гибкой организации воздушного пространства, улучшение ситуационной осведомленности и совместного принятия решений, использование оптимальных траекторий в динамичном режиме [37]. Однако указанная выше авиакатастрофа является подтверждением обратного: ситуационная осведомленность экипажа, органов УВД метеорологическим органом до сих пор является низкой. При этом на 80% авиакатастроф в России приходится ошибки, сделанные персоналом авиакомпаний [7, 11].

## 1.1 Анализ влияния метеообстановки и ветровых характеристик метеоявлений на безопасность полётов в районе аэродрома

Проблема обеспечения безопасности полётов в последнее время приобрела острую форму, поскольку усложняются авиационная техника и задачи, решаемые ею.

Анализ данных показывает, что значительная часть авиационных происшествий объясняется упущениями в организации и руководстве полетами, нарушениями установленных правил полетов, недостатками в методике обучения и подготовке летного и инженерно-технического состава, отсутствием его дисциплины [6].

Согласно [6] основной причиной авиационных происшествий являются ошибки летного состава, при этом в 6-7% случаев причинами авиационных происшествий (далее –АП) являются нарушения и упущения (далее - НиУ) в том числе и в метеорологическом обеспечении полетов – таблица 1.2:

Таблица 1.2 – НиУ, повлёкшие за собой АП

№ п/п	НиУ, повлёкшие за собой АП	%
1	Ошибки летного состава	40-60
2	НиУ в организации полётов	16-24
3	НиУ при руководстве полетами и управлением воздушным движением	10-16
4	НиУ в инженерно-авиационном обеспечении полетов	8-11
5	НиУ в метеорологическом, радиотехническом, медицинском обеспечении полетов	6-7
6	НиУ в аэродромно-техническом обеспечении полетов	3-6

Согласно [6] наиболее аварийными этапами полёта ВС являются заход на посадку и посадка, ниже представлен рисунок 1.2 со статистическими значениями распределения авиационных происшествий для различных этапов полета:

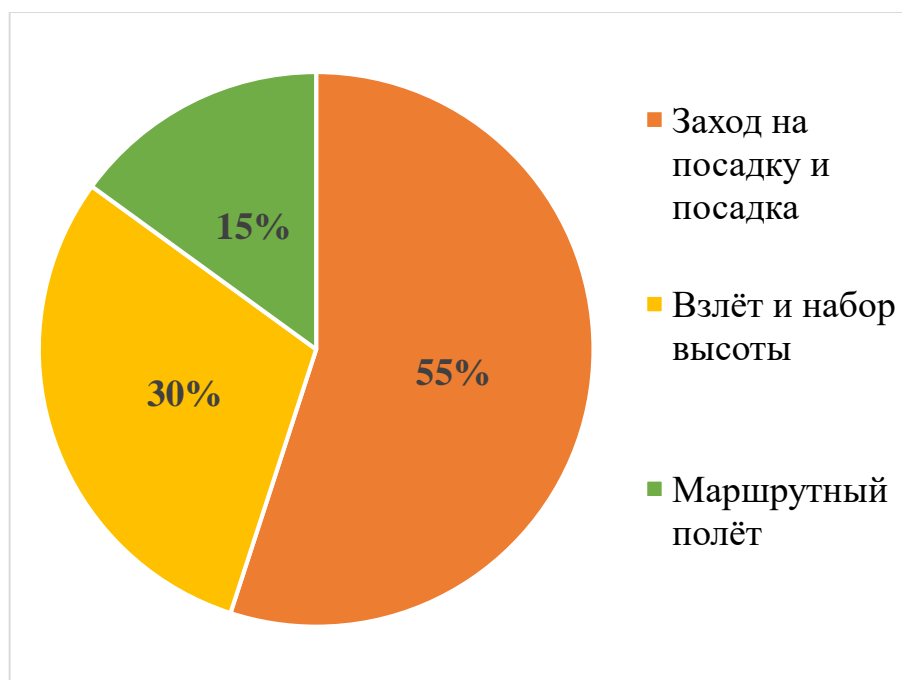


Рисунок 1.2 – Распределение авиационных происшествий по этапам полёта

Приведенные на рисунке 1.2 данные согласуются с информацией, приведенной в отчетах по безопасности полётов, выпущенных ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» – более 50% случаев авиационных происшествий ВС приходилось на этап полёта. В меньшей степени авиационные происшествия происходят по маршруту следования ВС 13%, и на этапе взлёта 8%. Авиационные происшествия ВС по маршруту следования происходили после того, как самолёты и вертолёт зацепляли линии электропередач, железобетонные столбы, пилоты не справлялись с управлением, наблюдалась техническая неисправность ВС в процессе полёта.

В таблице 1.3 исключены случаи авиационных происшествий (вошедшие в общую выборку авиационных происшествий таблицы 1.1), маршрут и этап полёта авиационных происшествий которых были неизвестны, в большинстве случаев это полёты частных вертолёт и самолёт.

В таблице 1.3 продемонстрировано распределение авиационных происшествий по этапам полёта в 2012-2013, 2015, 2017-2020 гг. согласно отчётам ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» [2].

Таблица 1.3 – Распределение авиационных происшествий по этапам полёта в 2012-2013, 2015, 2017-2020 гг.

период	2012	2013	2015	2017	2018	2019	2020
взлёт	2	4	1	4	5	2	3
маршрут	2	14	2	5	3	5	3
посадка	19	7	12	35	14	22	16
посадка ниже минимума дальности видимости на аэродроме	11	1	7	23	5	10	2
поражение разрядом атмосферного электричества при посадке	0	0	2	9	0	5	6
выкатывание ВС при посадке	0	0	1	2	4	3	1
поражение разрядом атмосферного электричества при взлёте	0	0	1	2	2	1	1

В большинстве случаев причиной авиационных происшествий на этапе посадки ВС является посадка ВС ниже минимума по дальности видимости (а также ввиду тумана, ливневых осадков), также наличие сдвигов ветра и турбулентности на аэродромах – 47%, на втором месте – поражение разрядом атмосферного электричества при посадке – 17%, на третьем месте – выкатывание ВС при посадке – 9% (всюду указаны процентные соотношения от общего числа авиационных происшествий на этапе посадки). Другие метеорологические причины авиационных происшествий при посадке – технические.

Следует отметить, что с точки зрения безопасности полётов особого внимания требуют аэродромы, находящиеся в горных, приморских районах ввиду их климатических особенностей и местных циркуляций.

Кроме того, часто имеют место быть производственные происшествия. Так, например, 17.03.2015 г. вертолёт Ми-8МТВ-1 был повреждён порывами сильного ветра 20 м/с, из-за отсутствия надлежащей швартовки на стоянке [2]. 30 мая 2018 года Вертолёт Robinson был повреждён конструкциями ангара в результате воздействия сильного ветра [2]. 04.01.2020 г. во время вынужденной стоянки вертолёт Ми-8Т из-за наземного обледенения получило повреждения ветровыми нагрузками [2]. 08.04.2020 г. под воздействием ветровой нагрузки произошёл срыв



ВС Ан-2 со швартовочного крепления с последующим переворотом самолета через правую сторону, 17.06.2020 г. вертолёт Ми-8Т, находящийся на стоянке посадочной площадки Салым, был поврежден порывом шквалистого ветра [2]. 12.07.2020 при порыве ветра в грозу самолёт Ан-2 сорвало с места стоянки, в результате чего ВС столкнулось с деревянным забором на посадочной площадке Хомустах [2].

Таким образом, с метеорологической точки зрения на уровень безопасности полётов влияют:

- недостаток в метеорологической информации, описывающей условия погоды;
- недостаточная ситуационная осведомлённость экипажа в районе аэродрома ввиду проблемы взаимодействия метеорологических органов и органов УВД;
- осложняющие безопасность полётов ВС климатические особенности (в том числе местные атмосферно-циркуляционные особенности, вызывающие опасные явления погоды) аэродромов, размещённых вблизи гор, морей.

## 1.2 Анализ возможностей современных средств и систем анализа метеобстановки в районе аэродрома

МОП ГА включает в себя определение метеорологических явлений, параметров и характеристик, получаемое при помощи дистанционных и контактных метеорологических датчиков [13, 81-82].

Метеорологические средства классифицируются на точечные (измерение атмосферных параметров, явлений и характеристик только в точке установки метеорологического средства) и площадные (определение параметров атмосферы

на определённой площади). Ниже представлена классификация только тех метеорологических датчиков, которые определяют ветровые характеристики (горизонтальное поле ветра (далее – ГПВ), вектор смещения облачных образований (далее – ВСО), ГСВ, ВСВ и EDR), и могут быть установлены на аэродромных площадках или вблизи аэродромов – в соответствии с указанными во Введении границами исследования.

В настоящее время оперативно работают следующие датчики, измеряющие характеристики ветра: контактные (взаимодействуют непосредственно с атмосферой, производят метеорологические измерения на наземных метеостанциях, принято считать эталонными); дистанционные датчики.

Информация о контактных и дистанционных датчиках, определяющих ветровые характеристики, приведена в таблице 1.4 согласно источникам [4-5,8,16,44,71,75-76,78,91,93,102,128-129].

Кроме того, для задач МОП ГА могут быть использованы данные метеорологических спутников, акустических локаторов – содаров, тех метеорологических средств, которые не устанавливаются на аэродромных площадках [46,48]. Как видно из таблицы 1.4, единственным метеорологическим датчиком, который всепогодно определяет все указанные ветровые характеристики является метеорологический радиолокатор.

Для предоставления метеоинформации службе УВД, с целью обеспечения безопасности взлёта и посадки (далее - ВиП) воздушных судов, на аэродроме используют КРАМС – комплексные радиотехнические аэродромные метеостанции, они автоматически измеряют помимо давления, температуры воздуха и почвы, влажности воздуха, высоты облаков, метеорологической оптической дальности видимости, количества осадков ещё и ГПВ, а также обрабатывают данные указанных параметров, отображают на дисплее, формируют метеорологические сообщения, регистрируют и архивируют их [49]. В состав станции могут входить все датчики, соответствующие сертификационным требованиям к метеорологическому оборудованию на аэродромах.

Таблица 1.4 – Контактные и дистанционные датчики, определяющие скорость и направление ветра, вектор смещения облачных образований, сдвиги ветра, турбулентность (показано знаком «+»)

Тип датчиков	Наименование датчика	Скорость и направление ветра	Вектор смещения облачных образований	Сдвиг ветра <sup>1, 2</sup>	Турбулентность
Контактные датчики	Анемометры (чашечные, крыльчатые или лопастные, термоанемометр или ультразвукового типа)	+		+ <sup>3</sup> (в случае разнесения в пространстве)	
	Радиозонды	+		+ <sup>4</sup>	
Дистанционные датчики	Метеорологические доплеровские радиолокаторы	+	+ <sup>5</sup>	+	+
	Радарные ветровые профайлеры	+		+	+
	Импульсные ветровые лидары (работа только в условиях ясного неба)	+		+	+

<sup>1</sup> Сдвиг ветра может быть определён визуально только при наличии прочих метеоявлений, указанных в [72], например: шквалистое облако впереди надвигающейся линии шквалов; вирга (свисающие столбы испаряющегося в воздухе дождя); пыль, поднимаемая фронтом порывов впереди линии шквалов – указанный метод является неточным.

<sup>2</sup> Система оповещения о ГСВ, ВСВ на малых высотах LLWAS специально создана для обнаружения ГСВ, ВСВ на малых высотах и включает в себя датчики приземного ветра в стратегических точках по периметру аэродрома и блоки микропроцессоров и дисплеев.

<sup>3</sup> Система разнесённых анемометров называется системой предупреждения о сдвиге ветра на малых высотах [70,72].

<sup>4</sup> Сдвиг ветра также может определяться методом радиозондирования с существенным ограничением: поскольку полученные параметры, определяемые радиозондом, представляют средние значения ветра в последовательных слоях атмосферы, то фактический сдвиг ветра между различными высотами может быть и не определён.

<sup>5</sup> Вектор смещения облачных образований может быть определён только теми метеорологическими средствами, которые представляют данные на некоторых площадях (метеорологические радиолокаторы).

Тип датчиков	Наименование датчика	Скорость и направление ветра	Вектор смещения облачных образований	Сдвиг ветра <sup>1, 2</sup>	Турбулентность
	Бортовые комплексные системы сбора данных AIDS	+		+	+

Согласно источнику [49] по состоянию на 01.03.2017 г. станции «КРАМС-4» (одной из трёх разновидностей КРАМС) установлены на 114 аэродромах, вертодромах, 61 вертолётных площадках, судах и буровых платформах в РФ и странах СНГ с разными комплектациями.

Далее представлены технические характеристики датчиков в станциях КРАМС-4 различных модификаций, определяющих параметры и характеристики ветра – таблица 1.5. [49].

В станции КРАМС-4 использованы следующие датчики, определяющие ветровые характеристики: контактные измерители скорости и направления ветра ИПВ-01, контактные анемометр и флюгер WAA151/252 и WAV151/252 соответственно, контактный датчик ветра WM30, дистанционные ультразвуковые преобразователи скорости и направления воздушного потока WMT700 и WMT702, контактный анеморумбометр «Ветромер-1». Важно заметить, что как правило, в наземные станции КРАМС входят контактные датчики, предоставляющие измерения только в точке “in situ” за исключением WMT700 и WMT702, которые относятся к дистанционным датчикам, но определяют скоростные характеристики также в точке. Для исследований масштаба мезо- (что актуально для авиации) и синоптических анализов указанных датчиков, производящих измерения в точке, недостаточно несмотря на потенциально возможную высокую плотность станций. Следовательно, необходимы такие метеорологические средства, которые определяют метеорологические явления, параметры и характеристики на некоторых площадях вблизи аэродромных площадок, в противном случае системы КРАМС-4 без метеорологических радиолокационных станций сильно ограничены в возможностях метеобеспечения полётов.

Таблица 1.5 – Метрологические и технические характеристики датчиков в станциях КРАМС-4 различных модификаций

Наименование характеристики	Значения характеристики
Диапазон измерений скорости воздушного потока (ИПВ-01), м/с	От 0,5 до 60
Пределы допускаемой погрешности измерений скорости воздушного потока: -абсолютной от 0,5 до 6 м/с, м/с; -относительной свыше 6 до 60 м/с, %	$\pm 0,5$ $\pm 5$
Диапазон измерений направления воздушного потока (ИПВ-01), °	От 0 до 360
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений направления воздушного потока, °: - от 0,5 до 1 м/с; - свыше 1 до 60 м/с	$\pm 10$ $\pm 3$
Диапазон измерений скорости воздушного потока (WAA151/252), м/с	от 0,5 до 60
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений скорости воздушного потока, м/с	$\pm(0,4+0,035 \cdot V)$ , где V – измеренная скорость воздушного потока
Диапазон измерений направления воздушного потока (WAV151/252), °	От 0 до 360
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений направления воздушного потока, °	$\pm 3$
Диапазон измерений скорости воздушного потока (WM30), м/с	от 0,5 до 60
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений скорости воздушного потока, м/с	$\pm(0,5+0,04 \cdot V)$ , где V – измеренная скорость воздушного потока
Диапазон измерений направления воздушного потока (WM30), °	От 0 до 360
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений направления воздушного потока, °	$\pm 3$
Диапазон измерений скорости воздушного потока (WMT702), м/с	от 0,5 до 60
Пределы допускаемой погрешности измерений скорости воздушного потока: -абсолютной от 0,5 до 7, м/с -относительной свыше 7 до 60 м/с,%	$\pm 0,2$ $\pm 3$
Диапазон измерений направления воздушного потока (WMT700), °	От 0 до 360
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений направления воздушного потока, °	$\pm 2$
Диапазон измерений скорости воздушного потока (Ветромер-1), м/с	От 0,7 до 55

Наименование характеристики	Значения характеристики
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений скорости воздушного потока, м/с	$\pm(0,3+0,05 \cdot V)$ , где $V$ – измеренная скорость воздушного потока
Диапазон измерений направления воздушного потока (Ветромер-1), °	От 0 до 360
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений направления воздушного потока, °	$\pm 3$

Минимальный состав метеооборудования ВПП (направлений) точного захода на посадку I категории и захода на посадку по приборам должен соответствовать таблице 1.6, взятой из источника [61]:

Таблица 1.6 – Минимальный состав метеооборудования ВПП (направлений) точного захода на посадку I категории и захода на посадку по приборам

Метеооборудование	ВПП (направления) точного захода на посадку I категории	ВПП (направления) захода на посадку по приборам классов		
		А, Б, В	Г	Д, Е
1. Измерители-регистраторы видимости для одного и двух направлений ВиП ВПП, комплект	3	3	2	-
2. Щиты-ориентиры видимости, комплект: для одного направления ВиП ВПП; для двух направлений ВиП ВПП	- -	- -	1 2	1 1
3. Измерители высоты нижней границы облаков (вертикальной видимости) для одного и двух направлений ВиП ВПП, комплект	1	1	1	1
4. Дистанционные измерители высоты нижней границы облаков (вертикальной видимости), комплект: для одного направления ВиП ВПП; для двух направлений ВиП ВПП	1 2	1 2	1 2	- -
5. Измерители параметров ветра, комплект: для одного направления ВиП ВПП; для двух направлений ВиП ВПП	1 2	1 2	1 2	1 1
6. Измерители атмосферного давления аэродрома, шт.	1	1	1	1
7. Измерители температуры и влажности воздуха для аэродрома, комплект	1	1	1	1
8. Средства отображения метеоинформации (блоки индикации)	1	1	1	1

Минимальный состав метеоборудования ВПП (направлений) точного захода на посадку II и IIIА категорий соответствует таблице 6.2 источника [61] и представлен в таблице 1.7:

Таблица 1.7 – Минимальный состав метеоборудования ВПП (направлений) точного захода на посадку II и IIIА категорий

Метеоборудование	Количество направлений ВиП ВПП точного захода на посадку II и IIIА категорий	
	одно	два
1. Специализированные ЭВМ, обеспечивающие автоматические вычисления и выдачу на средства отображения и регистрации видимости, дальности видимости на ВПП, высоты нижней границы облаков (вертикальной видимости), параметров ветра, атмосферного давления, температуры и влажности воздуха, комплект.	2, из них 1 резервный	2, из них 1 резервный
2. Первичные измерительные преобразователи видимости, комплект	3	3
3. Первичные измерительные преобразователи высоты нижней границы облаков (вертикальной видимости), комплект	1	2
4. Измерители высоты нижней границы облаков (вертикальной видимости), комплект	1	1
5. Первичные измерительные преобразователи параметров ветра, комплект	1	2
6. Первичные измерительные преобразователи атмосферного давления, шт.	1	1
7. Первичные измерительные преобразователи температуры и влажности воздуха, комплект	1	1
8. Средства отображения метеоинформации (блоки индикации)	1	1
9. Средства регистрации выдаваемой метеоинформации, шт.	1 <sup>6</sup>	1

Согласно [61] обязательным к установке на гражданских аэродромах являются: измерители видимости, атмосферного давления, температуры и влажности воздуха, измерители (в том числе дистанционные) высоты нижней границы облаков, измерители параметров ветра.

<sup>6</sup> Если в составе метеоборудования имеются персональные компьютеры, они могут использоваться в качестве средств регистрации выдаваемой метеоинформации.

Контактные датчики производят измерения параметров температуры, влажности воздуха, ветра, давления и устанавливаются на наземных метеорологических станциях (в том числе автоматических) – далее НМС.

Измерения нижней границы облачности, видимости производят либо визуально наблюдатель на метеорологической станции, либо дистанционные датчики (облакомеры, метеорологические радиолокаторы).

Таким образом, перечисленные контактные и дистанционные метеорологические датчики, производящие обязательные измерения в соответствии с источником [59,61], при установке на аэродроме будут предоставлять заинтересованным пользователям актуальные данные об атмосферных параметрах и характеристиках.

Кроме того, в документе [61] указано, что метеорологический радиолокатор рекомендуется также включать в состав метеорологического оборудования аэродромов. Таким образом, метеорадиолокатор, являющийся источником метеорологических площадных данных, наряду с измерителями видимости, атмосферного давления, температуры и влажности воздуха, высоты нижней границы облачности (далее – НГО), параметров ветра, относится к числу оборудования, рекомендуемого к установке на аэродромных площадках.

В настоящее время качество контактных датчиков остается на высоком уровне, монтаж и эксплуатация таких метеорологических средств относительно просты. Это утверждение подтверждается и практическими данными: в ходе анализа установленных метеорологических средств на аэродромах гражданской авиации РФ за период 2011-2018 гг. было выявлено следующее: как правило, структурами Росгидромета устанавливаются контактные датчики ввиду их доступности и простоты по монтажу. В таблице 1.8 показаны параметры технического переоснащения авиаметеорологических подразделений РФ силами ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета»:



Таблица 1.8 – Параметры технического переоснащения авиаметеорологических подразделений на территории РФ, осуществляемого организацией ФГБУ «Авиаметтелеком»

		2015		2016		2017		2018		2019 <sup>7</sup>	
метеосредство/количество	-измерители видимости LT31, FS11, FD12P	34	-датчики видимости LT31 - видеокамеры	6 1	измерители дальности и видимости - видеокамеры	7 4	измерители дальности видимости - видеокамеры	28 9	видеокамеры	12	
	Облакомеры ДВО-2	12	Облакомеры ДВО-2	30	Облакомеры ДВО-2	24	Измерители и высоты облаков	25			
	-облакомер CL31	11	-облакомер CL31	14	-облакомер CL31	2	- облакомеры ДВО-2	9			
	-измерители высоты НГО	31	-датчик облачности СТ25К	2			- Комплекты датчиков высоты облаков	4			
							- Измерители и высоты облаков CL-31	9			
	Нефелометры FS11	11	Нефелометры FS11	22	Нефелометры FS11	10	Нефелометры FS11	19	Нефелометры FS11	1	
	-АМИС-РФ, КРАМС-4 -КРАМС-4 (датчики в составе)	13 6	-АМИС - КРАМС-4 (датчики в составе)	8 4	АМИС	3	-АМИС - КРАМС-4 (датчики в составе)	11 4			

<sup>7</sup> Указано только для Камчатского филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» за 2019 год, для других филиалов данных в свободном доступе не имеется.

2015		2016		2017		2018		2019 <sup>7</sup>	
-датчик давления РТВ330 -барометры рабочие сетевые БРС-1М-2	16 1	-датчик давления РТВ330 - барометры рабочие сетевые БРС-1	11 10	Электронный барометр БРС-1 - Цифровые барометры РТВ330 - Барометры рабочие сетевые -барометр БРС-1М-1	3 5 2 1	Датчики атмосферного давления Электронные барометры БРС-01-01М Барометры рабочие сетевые -Датчики давления РТВ330	8 20 4 5	Электронные барометры БРС-01-01М	4
-комплект датчика температуры и влажности НМР155 -термометры -гигрометры	12 83 1	- датчики температуры и влажности НМР155 -датчики температуры почвы -датчики для измерения температуры и влажности - термометры ТМ-1, ТМ-2, ТМ-4 - гигрометры М-19	18 73 3 64 26	комплект датчика температуры и влажность и НМР155 - термометры - гигрометры - измеритель влажности и температуры НМР45D	3 752 2 1	-датчики температуры и влажности - измерители температуры и влажности воздуха НМР155 -гигрометр М-19	8 7 13	комплект датчика температуры и влажность и НМР155	10
-измерители параметров ветра WAA/WAV151, ИПВ-01.01 -системы измерения параметров ветра WAA/WAV151	8	-датчик скорости и направления ветра ИПВ-01.01 - анемометры М63М-1	17 7	Измерители скорости и направления воздушного потока - анеморум	1	Датчики параметров ветра - Измеритель параметров ветра ИПВ-01.01	24 16	Анемометр М-63М-1	2

2015		2016		2017		2018		2019 <sup>7</sup>	
- Измеритель параметров ветра ИПВ-01.01 - анеморумб ометры М- 83	21  2	-системы измерения параметров ветра WAA/ WAV151 - анеометр ы МС-13	7  13	бометры М63М-1 - Измерите ль параметр ов ветра ИПВ- 01.01 -датчики ветра WA151	2  10  2	- Анеморумб ометр М- 63М-1 -Датчик ветра М- 127	4  5		
Рабочие станции метеорологи ческой автоматизир ованной радиолокаци онной сети МАРС	5	АМИИС	1	Система АМИИС- ЯМАЛ	1	АМС «Сайма»	1		
Осадкомер Третьякова	2	Пираномет р СМР6	2	Фотометр ФИ-4	3	Гелиограф «Пеленг ВК-05»	1		
ДМРЛ-С снегомер	3 2	ДМРЛ-С	1	МТР-5	1	МТР-5	2		
Грозопеленг атор TSS928	1					Грозопелен гатор TSS928	1		
						Наземная станция спутниково й связи	4	Наземная станция спутнико в	2

Однако до сих пор существует проблема низкой плотности метеорологических станций в Российской Федерации [39], в результате чего не удаётся произвести полный анализ синоптических процессов над интересующей территорией, и на основании него создать метеорологический прогноз высокой оправдываемости, что непосредственно влияет на БП ВС. К тому же контактные датчики производят измерения параметров и явлений атмосферы в одной точке.

Следовательно, существует потребность в увеличении плотности сети обязательных датчиков и ввода метеорологических средств, позволяющих определять явления и параметры атмосферы на интересующей площади. Таким образом, на основании требований к перечню обязательных метеорологических датчиков [61] необходимо разработать рекомендованный состав метеорологических датчиков, куда войдут перечисленные выше контактные метеорологические средства и площадные метеодатчики.

К таким площадным датчикам относятся метеорологические радиолокаторы. Метеоролокатор предоставляет данные об атмосферных фронтальных системах, ВГО и НГО, ГПВ, осадках и влажности в разрешении 3-D. Следовательно, метеорологический радиолокатор является единственным прибором, с помощью которого можно определить структуру облачности [19,103,113,118,132,136], что может способствовать улучшению качества анализа фактической погоды и прогнозов погоды для нужд авиации. Например, зная структуру грозового облака можно спрогнозировать дальнейшее его состояние: развитие, либо диссипацию. Ни одно другое метеорологическое средство не способно с такой высокой детализацией в пространстве и времени предоставлять метеорологические данные. В свою очередь, площадные данные метеолокаторов о ветровых характеристиках (особенно сдвиги ветра и турбулентность в СВиП ВС) напрямую влияют на БП ВС.

В качестве примера показана система оповещения о сдвиге ветра и турбулентности в международном аэропорте Гонконга – таблица 1.9, в которой на первую позицию как основополагающее метеорологическое средство по определению сдвигов ветра и турбулентности вынесен аэродромный доплеровский метеорологический радиолокатор.

Таким образом, рекомендованный состав метеорологических датчиков на аэродромах и вертодромах может включать в себя обязательные вышеуказанные контактные датчики, облакомеры и метеорологические радиолокаторы.

Таблица 1.9 – Система оповещения о сдвиге ветра и турбулентности в международном аэропорту Гонконга в Чек Лапоке

№ п.п.	Метеорологические датчики
1	Аэродромный доплеровский метеорадиолокатор TWDR (определение параметров всепогодно на площадях)
2	Сеть анемометров (определение параметров в точке)
3	Метеорологические буи на водной поверхности, позволяющие наряду с другими метеопараметрами измерять скорость и направление ветра (определение параметров в точке)
4	Ветровой профилометр (определение параметров в точке)
5	Лидар (определение параметров только в условиях ясного неба)

Современные контактные датчики, облакомеры имеют высокую точность, просты в монтаже и эксплуатации. Существующие метеорологические радиолокаторы обладают высокой дискретностью в пространстве и времени, качественно предоставляют широкий спектр метеоданных на некоторых площадях, однако эксплуатация и монтаж существующих метеолокаторов является ресурсоемким.

В настоящее время аэродромный метеорологический орган выпускает информацию о метеорологических явлениях, параметрах и характеристиках при ВиП ВС, а также по маршруту следования ВС в формате сводок – кодов.

Согласно [59] в регулярные, специальные и выборочные специальные сводки включается следующая метеорологическая информация: дальность видимости на ВПП в случае необходимости, явления погоды, направление и скорость ветра у поверхности земли, видимость, форма и высота НГО, температура воздуха и точки росы, атмосферное давление, явления предшествующей погоды, прогноз для посадки типа «ТРЕНД», а также дополнительная информация о явлениях погоды, имеющих оперативное значение, коэффициенте сцепления, форме облачности, закрытии облаками гор и сопков, любая другая информация, которую можно использовать внутри страны.

Существуют сводки фактической погоды METAR, SPECI и прогноза погоды TAF.

В период полётов сводки METAR составляются регулярно через каждые 30 минут и через 1 час при отсутствии полётов, наблюдения проводятся только во время полётов в аэропортах с некруглосуточной работой.

Специальные наблюдения SPECI и включение указанной метеоинформации в сводки проводятся при ухудшении или улучшении погоды.

Сводки с прогнозами TAF составляются с периодом действия 9 или 12 часов, (дополнительно – на 6, 18 или 24 часа). Каждые 3 часа создаются прогнозы на 6...12 часов, каждые 6 часов – на 18 и более часов. Прогнозы выпускаются заблаговременно, до начала их действия должно пройти не менее 1 часа.

Сводки SIGMET обновляются каждые 6 часов для маршрутов, не обеспеченных автоматизированными штурманскими расчётами.

Таким образом, указанные метеосводки с их заблаговременностью зачастую не могут полностью обеспечить безопасность полётов без метеорологического радиолокационного поля. Например, развитие опасных для авиации нисходящих порывов под основанием кучево-дождевой облачности может наблюдаться от 3 до 30 минут [19]. В свою очередь, другие метеорологические средства, кроме метеолокатора, не могут обеспечить наблюдение за указанным явлением с высокой пространственной и временной дискретностью. Также заметим, что при наличии метеорологических радиолокационных данных, они также включаются в указанные метеосводки.

Итак, метеорологический радиолокатор – единственное метеорологическое средство, предоставляющее в совокупности уникальные данные о метеорологических явлениях, параметрах и характеристиках (в том числе и ветровых: сдвиги ветра, турбулентность, вектор смещения облачных образований) с высоким пространственным и временным разрешением на обширной территории. Анализ погодных условий на аэродромах и по маршруту следования ВС остается неполным без перечисленных данных метеолокатора, что прямо и косвенно влияет на рост авиационных происшествий. Следовательно, данные метеорологического радиолокатора необходимо использовать в оперативной практике аэродромным службам, поскольку нет никаких других метеорологических средств - аналогов,

которые непрерывно и с высоким пространственным разрешением позволяют на некоторой площади определять целый спектр метеорологических явлений, параметров и характеристик (даже современные разработки автоматических метеостанций с высокой точностью не способны решить эти проблемы).

Как было показано ранее, метеорологический радиолокатор среди прочих метеорологических систем, устанавливаемых на аэродромных площадках, имеет ряд преимуществ. Однако в настоящее время не все метеорологические радиолокаторы, работающие оперативно на территории Российской Федерации, отличаются высокой точностью, простотой в монтаже и эксплуатации.

Таким образом, необходимо проанализировать существующие метеорадиолокаторы, оперативно работающие на территории РФ.

Существующие метеорологические радиолокаторы, обслуживаемые структурами Росгидромета, отличаются тактико-техническими характеристиками и делятся на следующие диапазоны [20]:

- X-диапазон (8-12 ГГц);
- C-диапазон (4-8 ГГц);
- S-диапазон (2-4 ГГц).

Ниже представлена сравнительная таблица 1.10 указанных радиолокационных частотных диапазонов, которые чаще всего применяются в метеорологической радиолокации.

Таблица 1.10 – Характеристики радиолокационных диапазонов

Радиолокационный диапазон	Номинальная длина волны, см	Минимальный диаметр антенны, м	Частотный диапазон, ГГц
X-диапазон	3,2	0,75	8-12
C-диапазон	5,3	3,70	4-8
S-диапазон	10	7,00	2-4

S-диапазон используют для обнаружения интенсивных осадков. Частотный диапазон C способен обнаруживать осадки умеренной и сильной степени интенсивности. Заметим, что диаметр капель, выпадающих из слоисто-дождевой и кучево-дождевой облачности, составляет от сотых долей миллиметра до единиц

сантиметра [40]. Таким образом, ни S-диапазон, ни C-диапазон с длинами волн 10 и 5,3 см соответственно не способны обнаружить опасные явления для авиации, такие как туманы, низкую слоистообразную и слоисто-дождевую облачность. Для обнаружения туманов, обложных и ливневых осадков, выпадающих из низкой слоисто-дождевой и кучево-дождевой облачности, более пригодным следует признать использование X-диапазона. В свою очередь использование X-диапазона в метеорологической радиолокации показало, что с высокой оправдываемостью диагностируются не только туманы, обложные и ливневые осадки разной степени интенсивности, но и такие опасные явления погоды как грозы, град, шквал, смерч.

Другое преимущество применения X-диапазона – использование малых антенн, способствующих реализации стационарного и мобильного варианта метеорадиолокатора для работы в БАЗ. Возможное применение метеорадиолокаторов БАЗ: для МОП крупных и небольших городов, аэродромов с последующим объединением в единую метеорологическую сеть [27,31].

Далее рассмотрим существующие метеорологические радиолокационные станции, оперативно работающие в Российской Федерации.

Сегодня на территории РФ (сети Росгидромета) работают технически и морально устаревшие некогерентные локаторы поколения МРЛ-5, и доплеровские локаторы ДМРЛ, внедрение которых с 2008 г. происходит с значительной задержкой.

Внедрение доплеровских локаторов ДМРЛ-С производства ОАО «ЛЭМЗ» [41] происходит по 2 федерально-целевым программам (далее – ФЦП) [92]:

- «Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (2009-2020 гг.)» - далее – программа «ОрВД» - план установки 100 единиц ДМРЛ-С;

- программа «Геофизика» - план установки 40 единиц ДМРЛ-С.

Эффективный рабочий радиус обзора ДМРЛ-С составляет 200 км, пересечение зон обзора отдельных метеолокаторов ДМРЛ-С для образования единой зоны перекрытия не должно происходить на удалениях более 150-170 км [42].



Начало развертывания метеорологических радиолокаторов сети ДМРЛ-С приходится на 2011 г., планируемой год окончания развертывания сети – 2020 г.

Также в документе [92] сказано, что в состав сети ДМРЛ-С могут входить оперативно работающие и внедряющиеся метеорологические радиолокаторы в другими тактико-техническими характеристиками.

К концу 2020 года запланирована эксплуатация 140 единиц ДМРЛ-С на территории Российской Федерации – рисунок 1.3.

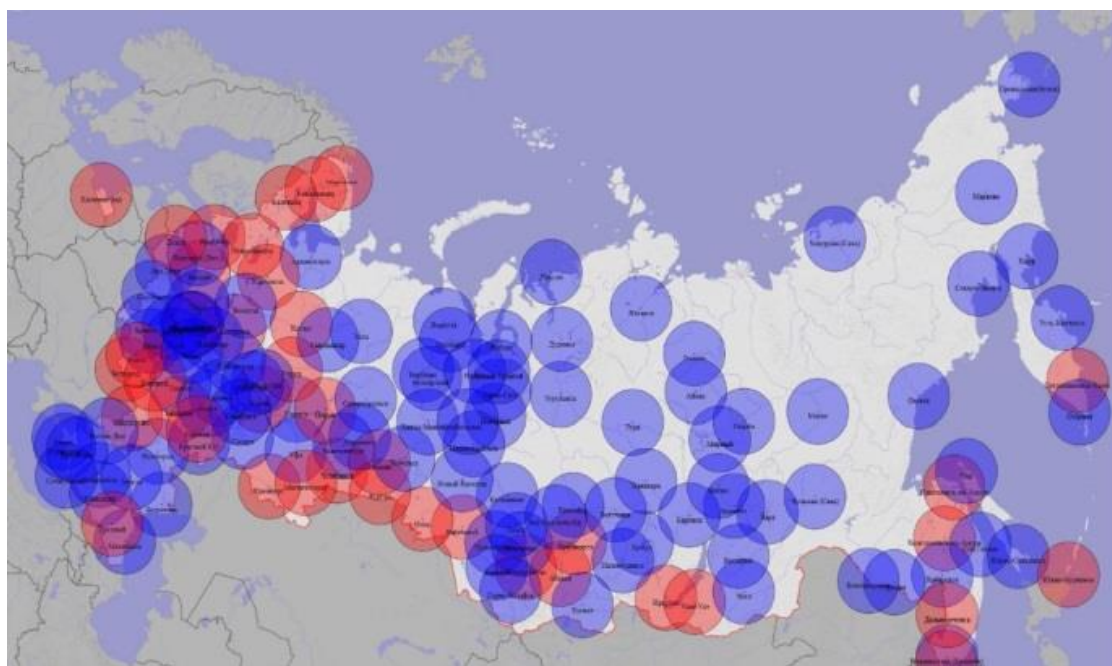


Рисунок 1.3 – План сети ДМРЛ Росгидромета  
на конец 2020 г с радиусом обзора 250 км.

Красным цветом показаны радиусы действия радиолокаторов, которые устанавливаются по ФЦП «Геофизика», синим – по ФЦП «ОрВД»

Однако к октябрю 2022 г. в РФ внедрено всего 51 единица, в свою очередь Росгидромет оперативно получает информацию только от 39 единиц ДМРЛ-С [101] – рисунок 1.4. На карте (рисунок 1.4) видно, что ЕТР почти вся покрыта сетью локаторов ДМРЛ-С, чего нельзя сказать о восточной части страны, где установка локаторов только планируется.

Задержка в установке новых единиц ДМРЛ-С в существующую сеть метеолокаторов Росгидромета связана с их дороговизной, крупногабаритностью, и как следствие, с трудностями на этапах монтажа и эксплуатации. Разработка и внедрение локаторов поколения ДМРЛ-С требует больших затрат на изготовление, наладочно-пусковые работы и эксплуатацию.

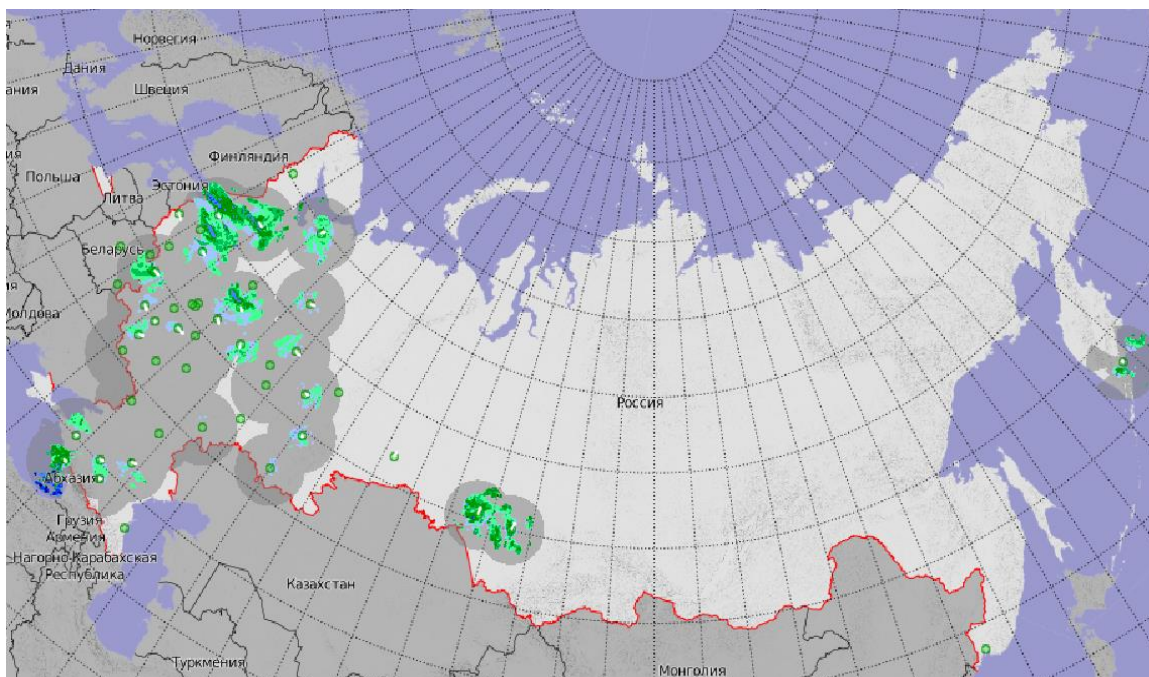


Рисунок 1.4 – Состав сети ДМРЛ-С Росгидромета, октябрь 2022 г. Пункты ДМРЛ-С показаны зелёными точками.

Кроме того, запланированные места установки ДМРЛ-С выбирались с учётом следующих позиций [92]:

- распределение плотности населения в РФ;
- наличия аэропортов (в соответствии с ФЦП «ОрВД») и объектов транспортной инфраструктуры (Транссибирская магистраль) [92].
- установка метеорологического радиолокатора на направлении преобладающего западного переноса воздушных масс на Европейской территории России.

При детальном анализе мест установки метеорологических радиолокаторов ДМРЛ-С (из 140 единиц), можно сказать, что Европейская часть РФ почти

полностью покрыта зонами ответственности радиолокаторов, чего нельзя сказать о восточной части страны. Также заметим, что в режиме «Скорость» ДМРЛ-С имеет вдвое меньший радиус обзора, что уменьшает плотность покрытия территории РФ данными ДМРЛ-С.

Таким образом, согласно плану развёртывания ДМРЛ-С ЕТР и небольшая часть восточных регионов России будут покрыты радиолокационными метеорологическими данными, чего нельзя сказать о северных регионах: в Российской Арктике согласно плану установки ДМРЛ-С планируется установка только одной единицы ДМРЛ-С, что лишает перспективного арктического региона метеорологических данных.

Кроме того, при выборе мест установки ДМРЛ-С учитывалось наличие только крупных аэродромов. Если посмотреть на рисунок 1.3 – видим, что далеко не все аэродромы предлагается снабдить ДМРЛ-С, а если и предлагается, то только для крупных аэродромов. Таким образом, для аэродромных площадок отдалённых регионов это требование не выполняется.

Заметим, что пересечение зон обзора происходит на дальности по горизонтали 150 км при расстоянии между ДМРЛ-С в 300 км. При этом, высота расположения оси диаграммы направленности антенны (далее – ДНА) выходит за границу 1 км уже на дальности по горизонтали в 100 км, тем самым ухудшая оценку ветровых параметров и характеристик. Таким образом, необходимо увеличивать плотность сети локаторов ДМРЛ-С, однако эта необходимость по экономическим соображениям трудновыполнима [43].

Выделим также другие недостатки ДМРЛ-С (с точки зрения авиации):

1) высокие масса и габариты и, как следствие, невозможность размещения в компактном виде на аэродромных площадках, в том числе и для сезонного использования. Мобильный вариант ДМРЛ-3 производства ОАО «ЛЭМЗ» существует, однако временное и сезонное использование такого крупногабаритного локатора слишком затратно;

2) необходимость высоковольтного источника питания (около 10 кВ);

3) ДМРЛ-С не является аэродромным радиолокатором (не предназначен для работы в зоне ответственности аэродрома [36]), а также создан не для аэродромных метеорологических органов. Сейчас обслуживание метеорологических радиолокаторов осуществляет Центральная аэрологическая обсерватория – структура Росгидромета. Однако ДМРЛ может использоваться различными метеослужбами, в том числе аэродромными метеорологическими органами.

Таким образом, запланированная сеть метеорологических радиолокаторов ДМРЛ-С, имеющих ряд недостатков, не будет охватывать аэродромы Крайнего Севера, Дальнего Востока, где существует потребность использования необслуживаемых метеорологических радиолокаторов, т.к. зачастую специалисты по эксплуатации соответствующего оборудования отсутствуют. Следовательно, важно использовать автоматические метеорологические средства.

Так, например, перспективы промышленного и социального развития Арктической зоны РФ, в том числе и организации судоходства по Северному морскому пути, во многом зависят от создания развитой инфраструктуры сбора данных, освещения метеорологической обстановки о состоянии Арктической зоны РФ. Сегодня в Арктической зоне Российской Федерации работает одна доплеровская радиолокационная станция ДМРЛ-С, расположенная в г. Архангельске. Малое число запланированных к установке ДМРЛ на территории Российской Арктики обуславливается низкой плотностью населения в указанном регионе, малым числом аэропортов. В то же время, в зимнее полугодие над незамерзающими морями Арктики формируются полярные мезоциклоны, диаметр которых, как правило, не превышает 500 км [139]. Полярные мезоциклоны обладают большой энергией неустойчивости, вызывают сильнейшие осадки и ураганные ветры и могут перемещаться в другие климатические пояса и области Российской Федерации [51]. По причине небольших размеров и неустойчивого характера полярные мезоциклоны сложно диагностировать и прогнозировать. Создание автоматизированной радиолокационной сети на базе малогабаритных метеорологических радиолокационных комплексов и других средств контроля

метеобстановки позволит выявлять и прогнозировать развитие полярных мезоциклонов, что приведет к повышению оправдываемости метеорологических прогнозов по всей территории РФ.

Таким образом, сегодня существует потребность в создании малогабаритного метеоро радиолокатора, способного автоматически работать вблизи аэродромов в экстремальных погодных условиях. При этом малогабаритные метеорологические радиолокаторы работают в X-диапазоне (с длиной волны 3.2 см): именно такое значение сантиметровых длин волн позволяет создать радиолокационную антенну диаметров менее 2 метров, обеспечив малые габариты метеорологического радиолокатора – как было показано в таблице 1.10, а X-диапазон способен определять опасные явления погоды с точки зрения авиации: осадки обложные и ливневые, которые ухудшают видимость, грозы, град, шквал, смерч, сдвиги ветра, турбулентность [95].

В свою очередь, существующая сеть Росгидромета может включать в себя метеорологические радиолокаторы с разными ТТХ. Подходящим вариантом при этом является установка малогабаритных радиолокаторов между «крупногабаритными», которые определяют такой же перечень метеопараметров. Недостатком малогабаритных радиолокаторов является худшая разрешающая способность и метеорологический потенциал (значения которых существенно не влияют на качество представления метеоданных), преимуществом – меньшая стоимость, и, как следствие, более реальная возможность установки. Метеорадиолокаторы малых габаритов с дальностью действия 100 км способны охватить те участки, не включённые в сеть Росгидромета. Согласно [60] эффективность работы малогабаритных метеорадиолокаторов является высокой на дальностях 100 км.

Схожий опыт внедрения метеорадиолокаторов с разными ТТХ существует в странах Западной Европы и США. Например, в США объединенная сеть включает метеорологические радиолокаторы с параболическими антеннами и аэронавигационные с веерной диаграммой направленности антенны [107,109,115,124,126]. На территории Европы внедряются 225 радиолокаторов

различного производства, работающих по разным программам наблюдений согласно [138]. Часть из них являются доплеровскими, поляризационными [138]. Из 225 радиолокаторов в сеть входят 16 локаторов X-диапазона – рисунок 1.5. 31 метеолокатор работает в S-диапазоне, 178 – в C-диапазоне.

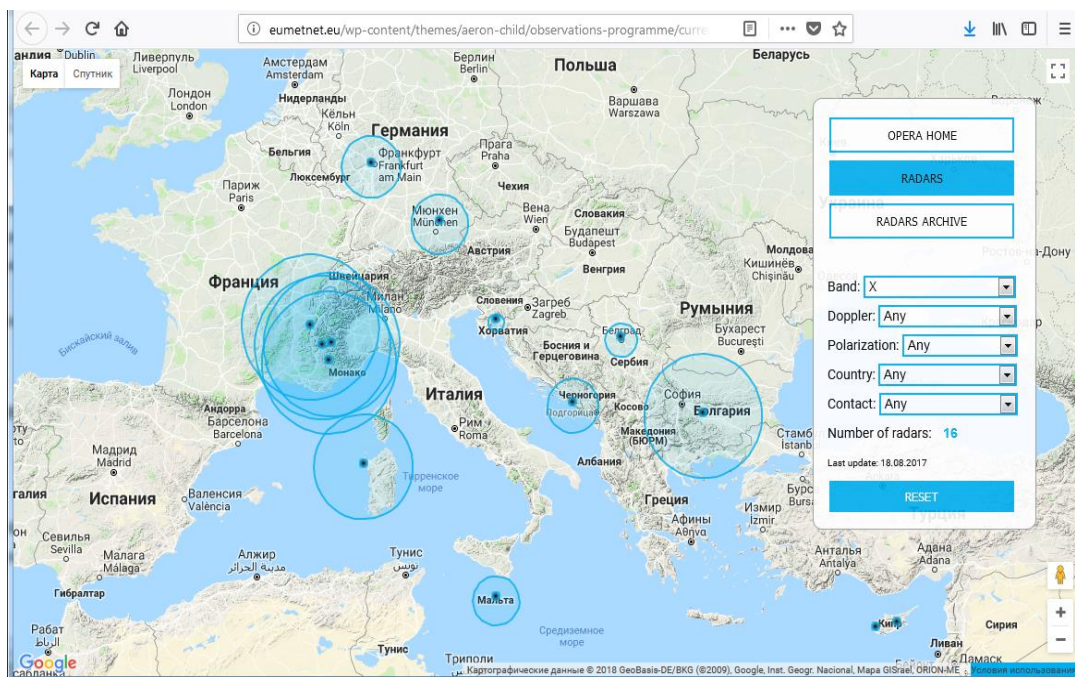


Рисунок 1.5 – Карты метеорологических радиолокаторов X-диапазона в Западной Европе

Итак, объединение различных метеорологических радиолокаторов в сеть имеет положительный опыт, который показал свою эффективность на примере работы в странах Европы, США. В свою очередь, сеть метеорологических радиолокаторов продлевает период наблюдения до нескольких часов в зависимости от условий погоды.

Таким образом, предлагается разработка мобильной малогабаритной метеорологической радиолокационной станции на базе существующей сети Росгидромета. Такая сеть, охватывающая различные регионы (в том числе отдаленные регионы благодаря МРЛК БАЗ) позволит обеспечить широкомасштабное метеорологическое наблюдение, увеличить период прогнозирования (до нескольких часов), а также ассимилироваться в региональные

и/или локальные модели сверхкраткосрочного и краткосрочного прогнозов погоды и произвести верификацию численных моделей прогноза погоды на основе метеорологических радиолокационных данных [45,120,130]. В свою очередь низкие массогабаритные характеристики радиолокационных станций позволят быстро производить позиционирование (ориентировка на север), монтировать, демонтировать малогабаритные метеорологические доплеровские радиолокаторы.

Далее рассмотрены особенности характеристик отечественных и иностранных метеорологических радиолокационных станций ближней аэродромной зоны (локаторы X-диапазона) – аналогов разрабатываемого МРЛК БАЗ.

Заметим, что количество разрабатываемых метеорадиолокационных станций в БАЗ среди российских производителей на порядок меньше иностранных аналогов.

Далее рассмотрим современные особенности построения наземных метеолокаторов ближней аэродромной зоны.

Сводные материалы об основных технических характеристиках отечественных и иностранных аналогов МРЛК БАЗ указаны в таблице 1.11, более подробная информация о существующих метеорологических радиолокационных станциях X-диапазона, как отечественного, так и иностранного производства, представлены в приложении А.

На основании информации, приведённой в таблице 1.11, выделим особенности наземных метеолокаторов БАЗ:

- масса указанных станций изменяется до 200 кг, что делает процедуру монтажа/демонтажа сложной, увеличивая при этом стоимость таких работ. Ряд систем использовать на аэродроме ресурсоёмко, т.к. они крупногабаритны;
- используются параболические антенны;
- все рассмотренные метеорологические радиолокаторы в таблице 1.11 не относятся к аэродромным, т.е. их основным назначением не является метеорологическое обеспечение полётов ГА.

Таблица 1.11 – Сравнительная характеристика метеорологических радиолокационных станций X-диапазона

№ п.п.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
МРЛ\Параметр (характеристика)	РЛС «Контур-К»	ДМРЛ-3	WR10X	E700XD	EMPAR X band	RXM-25	SSWR-X100D	CINRAD/XD	HYDRIX® radar	WR-2100	QXP-120P
	отечественные РЛС		иностраные РЛС								
Частотный диапазон	X-диапазон										
Дальность, км	100	125	100	150	150	до 50	150	100	150	50	60
Ширина ДНА, °	4,2 x 4,2	2,2 x 2,2	3,2 x 3,2	3,3 x 3,3	3,8 x 3,8	1,4x 1,4	1,2x 1,2	1,0x1,0	1,5x 1,5	2,7x2,7	3,0 x 3,0
Вес, кг	60	-	100	170	100	100-150	100-150	100-150	200	68	<70
Размеры, см	диаметр – 125 высота – 100	диаметр – 200	диаметр – 90 высота – 130	диаметр – 75	диаметр - 120 высота - 150	диаметр – 180	диаметр – 200	диаметр – 240	диаметр – 160	диаметр – 100	диаметр – 90
Тип антенны	ЩАР	Параболическая		ЩАР	Активная антенна с электр.скан-ием	Параболическая					
Производитель	ООО «Контур-НИРС»	НПО «ЛЭМЗ»	Eldes Lassen International (Италия)	EWR Radar Systems (США)		Ridgeline Instruments Inc. (США)	TOSHIBA (Япония)	BEIJING METSTAR RADAR CO.,LTD (Китай)	NOVIMET S.A.(Франция)	FURUNO (Япония)	MetaSensing
Назначение (аэродромный/неаэродромный) <sup>8</sup>	неаэродромный	неаэродромный	неаэродромный	неаэродромный	неаэродромный	неаэродромный	неаэродромный	неаэродромный	неаэродромный	Неаэродромный	Неаэродромный
режим «Сектор»	нет	нет	нет	нет	да	нет	нет	да	нет	да	нет

<sup>8</sup> Под аэродромным метеорологическим радиолокатором подразумевается метеорологическое средство, которое в первую очередь создано для обеспечения метеоинформацией аэродромного метеорологического органа, а во вторую очередь для метеообеспечения других заинтересованных пользователей.



Более того, специализированный режим «Сектор», столь важный для предоставления данных о сдвигах ветра и турбулентности, представлен только в трёх из десяти рассмотренных метеолокаторах: EMPAR X band, CINRAD/XD, WR-2100, из которых к малогабаритным относится только WR-2100.

По своим массогабаритным характеристикам нас устраивают только 3 метеорологических радиолокатора (весом до 100 кг), а именно: РЛС «Контур-К», WR-2100, QXP-120P.

Далее целесообразно проанализировать малогабаритные метеолокаторы РЛС «Контур-К», WR-2100, QXP-120P с точки зрения их использования для задач навигации и УВД в отдалённых регионах Российской Федерации.

Метеорологический радиолокатор WR-2100 обладает дальностью действия 50 км, т.е. не покрывает ближнюю зону аэродрома (100 км), что делает критичным использование WR-2100 на аэродромных площадках в особенности в отдалённых регионах Российской Федерации. Аналогично метеолокатор QXP-120P, обладающий дальностью действия 60 км, не покрывает БАЗ. Кроме того, два указанных метеорологических радиолокатора разработаны не для аэродромного метеорологического органа, они не являются аэродромными. Следовательно, их использование на аэродромных площадках невозможно.

РЛС «Контур-К» является некогерентным метеорологическим радиолокатором, следовательно, данные о ветровых характеристиках он не сможет предоставить. Также в РЛС «Контур-К» отсутствует секторный режим обзора. Таким образом, зоны ВиП ВС при использовании локатора РЛС «Контур-К» останутся без данных о сдвигах ветра, турбулентности, векторном поле скорости и векторе смещения облачных образований.

Соответственно, сегодня нет ни одного аэродромного малогабаритного метеорологического радиолокатора, который предоставляет данные о ветровых характеристиках в секторном обзоре.

Следовательно, необходимо определить, какие задачи будет решать МРЛК БАЗ и рассмотреть требования к малогабаритному метеорадиолокатору БАЗ что отражено в п.1.3.

Таким образом, необходима отечественная разработка малогабаритного (весом до 100 кг) мобильного метеорадиолокатора БАЗ, для создания указанной метеорологической системы необходимо решить следующие задачи:

-рассмотреть требования к малогабаритным мобильным метеорологическим радиолокаторам, в особенности требования к интерпретации метеорологических данных;

-определить решаемые задачи метеорадиолокационного комплекса БАЗ;

-представить решения задач по алгоритмическому обеспечению малогабаритного мобильного метеорологического радиолокатора.

### 1.3 Обоснование приоритетных путей повышения точности оценки опасных ветровых метеоявлений в секторах взлета и посадки в районе аэродрома

Согласно требованиям ИКАО [85] система ОрВД помимо других задач использует метеоданные при анализе и оценке согласованных целевых уровней экологических характеристик, также ожидается, что у ОрВД будет доступ к более точным и своевременным метеорологическим и климатическим данным. Предполагается, что статистические данные о метеоусловиях будут предоставляться для целей перспективного стратегического планирования и согласования спроса и пропускной способности. Также подразумевается, что стратегическая оценка имеющейся информации – включая общесистемные данные и потоках движения, пропускной способности аэродромов и действующих ВПП, метеоинформацию и информацию об организации потоков, будет способствовать принятию пользователями воздушного пространства решения о том, когда, где и как выполнять полёты.

Согласно [37] безопасность полётов имеет наивысший приоритет.

Одним из преимуществ развития метеорологического обеспечения для системы ОрВД является расширение возможностей идентификации, прогнозирования и представления данных о неблагоприятных погодных условиях [36]. В источнике [37] указаны области совершенствования характеристик метеорологического обеспечения аэронавигационной системы с 2013 по 2031 и последующие годы – таблица 1.12.

Таблица 1.12 – Области совершенствования характеристик метеорологического обеспечения аэронавигационной системы в период 2013-2031 и последующие годы

Период реализации	Области совершенствования характеристик
2013-2019	метеоинформация, способствующая повышению уровня эксплуатационной эффективности и безопасности полётов, а именно: обеспечение гибкой организации воздушного пространства, повышение степени ситуационной осведомленности и совместного принятия решений, для осуществления в динамичном режиме планирования использования оптимальных траекторий (прогнозы, предупреждения по аэродрому, регулярные и специальные наблюдения)
2019-2025	принятие оптимальных эксплуатационных решений на основе использования комплексной метеоинформации, т.е. метеорологической информации с возможностью использования автоматизированных процессов принятия решений или средств (полномасштабная интеграция информации ОрВД и метеоинформации)
2025-2031	нет
2031 и последующие годы	принятие оптимальных эксплуатационных решений на основе использования комплексной метеорологической информации, а именно: метеоинформация, обеспечивающая возможность использования вспомогательных бортовых и наземных автоматизированных средств принятия решений для незамедлительной реализации стратегии смягчения последствий воздействия неблагоприятных метеоусловий (тактический обход опасных метеорологических условий в течение 0-20 минут; более интенсивное использование бортовых возможностей для определения метеопараметров, в т.ч. турбулентности и других характеристик ветра; отображение метеоинформации в целях повышения ситуационной осведомлённости).

Таким образом, согласно [37] для задач навигации и УВД на этапах круг, посадка, взлёт необходимо такое метеорологическое средство, данные которого

используются в метеорологических прогнозах, фактическом анализе погоды. Кроме того, одной из характеристик, реализация которой планируется в 2031 и последующие годы, является тактический обход опасных метеоусловий до 20 минут, что из всех метеорологических средств может обеспечить только метеолокатор.

При этом минимальный состав радиолокационных метеорологических данных (далее – РМД) включает следующие позиции: карты метеорологических явлений, интенсивности осадков и накопленного количества осадков.

Указанные РМД рассчитываются на основании радиолокационной отражаемости, под которой понимают амплитуду отражённого от метеорологической цели сигнала в каналах дальности [83].

В свою очередь, рассмотренные в п. 1.2 метеорадиолокаторы БАЗ в редких случаях первоочередно решают задачи метеообеспечения полётов гражданской авиации. Наблюдение за опасными явлениями погоды для авиации является основным назначением МРЛК БАЗ.

В свою очередь, МРЛК БАЗ должен отвечать требованиям, приведённым в источниках в части пространственной, временной, качественной выдачи информации, в части разработки метода и алгоритмов оценки ГСВ, ВСВ, EDR [1,54,68,80-85,94-96]. В п.2.3 произведено разделение на следующие задачи: разработка метода и алгоритмов оценки ГСВ, ВСВ, EDR, которые отвечают требованиям, что также приведено в работе автора [31].

Таким образом, проведённый анализ существующих метеорадиолокаторов X-диапазона показал, что необходима отечественная разработка метеорадиолокационной станции БАЗ.

В свою очередь, разработки создания метеорадиолокатора БАЗ отсутствуют, а радиолокаторы X диапазона (МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5 [20]) уже морально и технически устарели.

МРЛК БАЗ должен соответствовать следующему:

Во-первых, использование современного твердотельного передатчика с мощностью до 100 ватт в импульсе, обеспечивающего экологическую безопасность и повышающего надежность МРЛК БАЗ и комплекса в целом.

Во-вторых, МРЛК БАЗ с щелевой антенной решёткой (далее – ЩАР), в отличие от аналогов с параболическими антеннами, должен иметь более высокий коэффициент использования поверхности при меньшем весе, не ухудшая при этом качество предоставления метеорологической информации.

В-третьих, малые габариты упростят монтаж/демонтаж МРЛК БАЗ.

В-четвертых, использование твердотельного когерентного передатчика обеспечит оценку ветровых и турбулентных характеристик метеоявлений, значительно расширяющих информационные возможности МРЛК БАЗ.

В-пятых, осуществляется реализация возможности получения конечных радиолокационных данных, что не требует от потребителя покупки отдельного программного обеспечения.

Согласно источникам [1,59,68,80] метеорорадиолокационные станции, используемые для штормового оповещения, должны отвечать следующим требованиям:

1. метеорологические радиолокаторы должны предоставлять метеорологическую информацию о зонах, перемещении и эволюции облачных образований и осадков, которая должна удовлетворять требованиям различных пользователей (для оценки синоптической ситуации, прогноза погоды);
2. должен осуществляться экспорт данных в международный код FM-94 BUFR (далее – код BUFR) [122], данные в коде BUFR должны передаваться потребителям по каналам связи;
3. метеорологический радиолокатор должен оперативно предоставлять информацию об облаках и сопровождающихся с ними атмосферных явлениях (в том числе опасных);
4. метеорологические радиолокационные данные должны отображаться на картографическом фоне с возможностью выбора масштаба (как для

метеорологических радиолокационных данных, так и для картографического фона);

5. должно быть предусмотрено изменение и смена картографической подложки;

6. радиолокационная метеорологическая информация должна включать:

- сечения облачности и осадков по горизонтали и вертикали;
- интенсивность и сумму накопленных осадков;
- скорость и направление смещения облачных систем;
- представление данных в форме анимации;
- области и контуры с метеорологическими явлениями.

Кроме того, согласно требованиям ИКАО необходимо получать информацию о турбулентности в единицах кубического корня из скорости затухания вихря (EDR) [84], а также оценивать вертикальный (на 30 или на 100 м) и горизонтальный (на 600 м) сдвиги ветра [20-21,55,84].

7. диапазон измерения радиоэхо облаков и осадков должен производиться от уровня земли до высоты 20000 метров с шагом 250 метров;

8. должна быть предусмотрена возможность вывода на экран автоматизированного рабочего места оператора (далее – АРМ) штормовых предупреждений и прогноза погоды;

9. должно осуществляться определение скорости и направления ВСО.

Таким образом, рассмотренные требования основных национальных и отечественных документов к метеорологической информации должны быть реализованы в МРЛК БАЗ.

**Требования к программно-вычислительным комплексам метеорологических радиолокаторов.** Рассмотрим требования, предъявляемые к программно-вычислительным комплексам метеорологических радиолокационных станций [1,59,68,80]. Требования из вышеуказанных источников были обобщены и объединены в ряд следующих позиций:

1. автоматизированная (автоматизированная как минимум, автоматическая как максимум) обработка радиолокационных данных, формирование метеорологической радиолокационной информации на выходе;

2. циклы обзоров радиолокатора должны обновляться в автоматическом режиме с периодом от 10 до 180 минут и выдаваться в сеть в коде BUFR. Согласно [59] в период полётов метеорологические радиолокационные наблюдения каждый час и через 3 часа вне полётов. Таким образом, диапазон периода выдачи радиолокационной метеорологической информации, согласно рассмотренным требованиям, должен варьироваться в диапазоне от 10 до 180 минут. Заметим, что выдача метеорологической радиолокационной информации с малой временной дискретностью является приоритетной, т.к. благодаря метеорологической информации с малым временным шагом можно выявить и спрогнозировать такие мезомасштабные явления погоды, как грозы, град, шквал, смерч и ветровые характеристики (векторное поле ветра, сдвиги ветра, турбулентность) [19];

3. циклы наблюдений метеорологической радиолокационной информации должны формироваться в сроки, кратные 10 минутам: т.е. в 00, 10, 20, 30, 40, 50 минут каждого часа;

4. циклы наблюдений метеорологической радиолокационной информации должны формироваться во всемирном скоординированном времени (далее – UTC);

5. время передачи данных, под которым понимается разность между временем получения данных и временем поступления данных потребителю, не должно превышать 5 минут;

6. должна быть предусмотрена возможность архивации получаемых данных (минимальный срок хранения метеорологической информации – 30 суток).

Таким образом, программно-вычислительный комплекс МРЛК БАЗ должен отвечать перечисленным требованиям.

## 1.4 Постановка задачи

Как было указано в таблице 1.1 62,4% авиационных происшествий случаются при неблагоприятных метеоусловиях, значительная часть которых происходит при наличии сдвига ветра и турбулентности. Особый интерес представляет разработка режима работы «Сектор», который позволит получать данные о сдвигах ветра и турбулентности с высоким пространственным и временным разрешением.

В свою очередь, разработки метода и алгоритмов оценивания опасных ветровых метеоявлений в метеорологических радиолокационных радиолокаторах на сегодняшний день отсутствуют. Так, например, в ДМРЛ-С, ныне оперативно работающем на территории РФ, метод оценки сдвигов ветра и турбулентности основывается лишь на определении радиальной скорости, без её среднеквадратичного отклонения (далее – СКО) – ширины спектра радиальных скоростей, что не позволяет достоверно определять сдвиги ветра и турбулентность. В свою очередь, оценка ветровых метеоявлений особенно востребована на малооборудованных аэродромах. Итак, проанализировав безопасность полётов, неидеальное взаимодействие между метеослужбами и УВД, напрашивается вывод, что необходим аэродромный метеорологический малогабаритный радиолокатор МРЛК БАЗ с алгоритмами сдвигов ветра, турбулентности и опасных метеоявлений для местных воздушных линий.

Выделим приоритетные пути развития МРЛК БАЗ на основании анализа существующих метеорадиолокационных станций БАЗ:

- 1) расширение информационных возможностей (внедрение алгоритмов о ветровых параметрах и характеристиках);
- 2) обеспечение метеоинформацией МОП ВС в режимах «Обзор» и «Сектор». Режим «Сектор» позволит получать более детализированные данные о ВСВ, ГСВ на этапах ВиП ВС;



- 3) применение МРЛК БАЗ в мобильном и стационарном варианте благодаря низким массогабаритным характеристикам, его возможное использование в местах чрезвычайных происшествий и на посадочных площадках;
- 4) применение ЩАР, имеющая лучший по сравнению с параболическими антеннами коэффициент использования поверхности;
- 5) применение твёрдотельного когерентного приёмопередающего модуля (позволит получать данные о  $V$  и  $W$ , а также их производных: ГПВ, ВСВ, ГСВ, EDR);
- 6) использование режима «Сектор» и получение для него в СВиП более точных ветровых характеристик;
- 7) расширение номенклатуры решаемых задач, например, оценка орнитологической обстановки и др.

На основании задач, требований и приоритетных путей развития работы МРЛК БАЗ можно выделить следующие его преимущества:

- 1) не требует технического обслуживания (предлагаются только визуальные методы контроля без применения средств измерений, что исключает расходы на поверку средств измерений);
- 2) малые габариты и вес метеорологической радиолокационной станции МРЛК БАЗ обеспечивают простоту установки;
- 3) принятые конструктивные решения: применение ЩАР в диапазоне частот 10 ГГц, объединение высокочастотной части приемопередатчика и ЩАР в единый моноблок значительно уменьшает размеры и массу антенной системы, что позволяет упростить волноводный тракт и привод антенны, тем самым, повысив надежность (например, некоторые случаи сбоев ДМРЛ-С в большей части связаны с приводом антенны);
- 4) диапазон 10 ГГц не попадает в область воздействия радиоизлучения от широко распространенных Wi-Fi роутеров, работающих в диапазоне 5 ГГц;
- 5) применение твердотельного усилителя мощности повышает стабильность выходной мощности, исключает необходимость высоковольтного источника питания.

**Выводы по 1 главе:**

Метеоусловия косвенно и напрямую влияют на безопасность полётов, 62,4% авиационных событий произошли при сложных неблагоприятных метеоусловиях. Текущий уровень метеорологического обеспечения является низкоинформационным в отдалённых регионах Российской Федерации (Дальний Восток, Крайний Север-Арктика), на гражданских аэродромах класса Д, Е, иных аэродромов и вертодромов, действующих в статусе «посадочных площадок». Таким образом, необходимо повысить ситуационную осведомлённость 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 ГПВ, ВСО, ВСВ, ГСВ, EDR может только метеорадиолокатор. Помимо других датчиков измерения атмосферных параметров, метеорадиолокатор как источник метеорологических радиолокационных площадных данных относится к числу оборудования, рекомендуемого к установке на аэродромных площадках. Данные указанных датчиков входят в различные сводки, выпускаемые аэродромным метеорологическим органом. В период 2011-2019 гг. структурами Росгидромета контактных датчиков по сравнению с дистанционными устанавливались на два порядка больше в силу высокого качества, простоты монтажа и эксплуатации первых. Существующая проблема низкой плотности метеостанций с контактными датчиками в Российской Федерации не позволяет произвести полный анализ синоптических процессов над интересующей территорией, оценить опасные ветровые метеоявления в районе аэродрома. Следовательно, необходимо увеличивать плотность сети обязательных датчиков и вводить в эксплуатацию метеосредств, позволяющие определять в том числе опасные ветровые метеоявления и параметры на интересующей площади в районе аэродромных площадок, т.е. метелокаторы.

Существующие метеорологические радиолокаторы, обслуживаемые структурами Росгидромета различны по тактико-техническим характеристикам и частотным диапазонам (X-, C-, S-диапазоны), при этом только локаторы X-диапазона с использованием антенн наименьшего диаметра могут обнаруживать весь спектр опасных для авиации метеоявлений: от тумана до шквала.

В РФ оперативно работают радиолокаторы следующих поколений: технически и морально устаревшие некогерентные радиолокаторы МРЛ-5; доплеровские поляризационные радиолокаторы ДМРЛ-С, внедряются в рамках ФЦП с 2008 г. с значительной задержкой ввиду их дороговизны, крупногабаритности, трудностей на этапах монтажа и эксплуатации. ДМРЛ-С не является аэродромным локатором.

Запланированная сеть метеолокаторов ДМРЛ-С не охватывает аэродромы Дальнего Востока, Крайнего Севера. Несмотря на очевидные перспективы промышленного и социального развития Арктической зоны РФ, в том числе судоходства по Северному морскому пути, где наблюдаются полярные мезоциклоны с сильнейшими осадками и ураганными ветрами, в указанном регионе запланирована только одна доплеровская радиолокационная станция ДМРЛ-С.

Таким образом, существует потребность в создании малогабаритного метеорадиолокатора X-диапазона, способного автоматически работать вблизи аэродромов в экстремальных погодных условиях. Существующая сеть Росгидромета может включать метеолокаторы с разными тактико-техническими характеристиками на примере стран Западной Европы и США.

Рассмотренные особенности характеристик отечественных и иностранных метеорологических радиолокационных станций показали, что: в большинстве случаев применяются параболические антенны, которые в сравнении с ЩАР, имеют более низкий коэффициент использования поверхности антенны при большем весе; рассмотренные метеорадиолокаторы не являются аэродромными, их основным назначением не является метеобеспечение полётов гражданской авиации; используется высокая мощность рассмотренных РЛС, что не

обеспечивает экологическую безопасность и надёжность станций в целом; массогабаритные характеристики рассмотренных метеорологических радиолокационных станций изменяются до 200 кг, что делает процесс монтажа сложным, при этом увеличивая стоимость таких работ; специализированный режим «Сектор» представлен только в 3 рассмотренных РЛС, из которых к малогабаритным относится только WR-2100. Однако метеорадиолокатор WR-2100 с дальностью действия 50 км не покрывает БАЗ; количество разрабатываемых метеорадиолокационных станций в БАЗ российского производителя на порядок меньше иностранных аналогов.

Таким образом, сегодня нет ни одного аэродромного малогабаритного метеорологического радиолокатора, который предоставляет данные об опасных ветровых метеорологических явлениях в секторном обзоре. Следовательно, необходима отечественная разработка малогабаритного мобильного метеорадиолокатора ближней зоны аэродрома.

Рассмотренные существующие требования, которые предъявляются к метеорологическим радиолокаторам, как то: требования к пространственной и временной выдаче информации, состав и форма данных полностью выполняются в МРЛК БАЗ. Назначение МРЛК БАЗ – оценка ОЯП в первую очередь для нужд аэродромного метеорологического органа.

Кроме того, необходимо решение дополнительных задач: создание алгоритмов ГСВ, ВСВ и EDR.

Важнейшим этапом постановки научно-технической задачи, состоящей в разработке метода и алгоритмов оценивания опасных ветровых метеоявлений, их методик валидации в метеорадиолокационном комплексе БАЗ является ее разделение на совокупность следующих взаимосвязанных подзадач, которые требуют решения:

- разработка технического облика, режимов работы, структуры алгоритмического обеспечения режима работы «Сектор» метеорадиолокационного комплекса БАЗ;

- разработка метода и алгоритмов оценивания опасных ветровых метеорологических явлений, а именно: EDR, ГСВ, ВСВ;
- разработка методик валидации данных, анализ результатов валидации данных, разработка практических рекомендаций по применению МРЛК БАЗ;
- разработка рекомендаций по применению алгоритмов оценки опасных ветровых метеоявлений в секторном режиме МРЛК БАЗ.

## **Глава 2. Разработка технического облика секторного режима и метода оценивания опасных ветровых метеоявлений метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны**

В п. 1.2 было показано, что современные метеорологические радиолокаторы не предоставляют данные о сдвигах ветра и турбулентности в режиме «Сектор», хотя получение данных о сдвигах ветра и турбулентности с высоким пространственным и временным разрешением является особым интересом для аэродромных служб.

Кроме режима «Сектор» в МРЛК БАЗ разработан также режим «Метео» или круговой обзор, который характерен для всех метеолокаторов ближней зоны аэродрома, рассмотренных в п. 1.2. Далее перечислим основные задачи и характеристики режимов работы МРЛК БАЗ.

### **2.1 Анализ особенностей функционирования метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны в обзорном режиме**

МРЛК БАЗ предназначен для автоматического анализа метеорологической обстановки в районе аэродрома.

Задачи, решаемые МРЛК БАЗ:

1. оценка метеоявлений и их классификация в режимах «Обзор», «Сектор» в БАЗ;
2. оценка зон EDR, ГСВ, ВСВ с приоритетом в СВиП ВС;

МРЛК БАЗ представляет собой радиолокационный комплекс, который осуществляет излучение зондирующих радиоимпульсов, приём, 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 – щелевая антенная решетка ЩАР диаметром около 760 мм для обеспечения ширины диаграммы направленности в пределах 3 градусов.

Приемо-передающий модуль – когерентный, твердотельный с возможностью формирования и обработки сложных сигналов, изменения частоты повторения импульсов, длительности интервалов когерентной обработки.

Вычислительная система МРЛК БАЗ с учетом готового спецвычислителя построена следующим образом:

1. Спецвычислитель решает следующие задачи: формирование зондирующих сигналов, оцифровка и свертка (при необходимости) принятых сигналов, децимация, взвешивание, стробирование по каналам дальности, формирование когерентных пачек на приеме с учетом стробирования, спектральный анализ, передача результатов обработки в вычислитель МРЛК БАЗ.

2. Вычислитель МРЛК БАЗ в составе АРМ решает следующие задачи:

– вторичная обработка: пороговая обработка, измерение параметров, измерение дальности, угловых координат, скорости;

– третичная обработка: построение 3-х мерных амплитудных и скоростных портретов метеоявлений, классификация их опасности. Оценивание опасных зон сдвига ветра, турбулентности.

Задачи, решаемые АРМ МРЛК БАЗ:

1. управление функционированием и режимами (подрежимами) работы МРЛС;

2. отображение метеорологической обстановки в районе аэродрома (в том числе и в 3-х мерном варианте);

3. информационное взаимодействие с внешними источниками и потребителями (группа руководства полетами и др.) информации.

Метеорологические образования имеют цветовую кодировку в зависимости от их интенсивности.

Передача информации на сопрягаемый АРМ для вывода на экран одной из выбранной карты радиолокационных метеоданных МРЛК БАЗ, которая получена из принятого объемного файла, происходит автоматически. Оператором на экран выводятся любые карты из объемного файла, хранящегося в архиве. В АРМ МРЛК БАЗ существует режим «анимации», который последовательно выводит на экран карты для выбранного оператором отрезка времени.

Заметим, что с помощью интерфейса МРЛК БАЗ оператору можно самостоятельно устанавливать режимы и программы работы. Под программой работы будем понимать совокупность значений параметров, определяющих пространственно-временные характеристики работы МРЛК БАЗ (масштаб дальности, значения углов места, для растрового обзора левая и правая границы сектора) и вид излучаемого сигнала (простой или сложный сигналы). Таким образом, алгоритм обзора пространства по углу места задается оператором в зависимости от решаемой задачи и особенностей метеорологической обстановки в конкретный момент времени.

Также при помощи интерфейса можно устанавливать параметры расписания работы МРЛК БАЗ для задания суточного режима работы МРЛК БАЗ с целью согласования работы с другими радиоэлектронными системами в пункте его размещения. Например, включение МРЛК БАЗ на аэродроме со сложным радиоэлектронным полем производится в определённые промежутки времени каждого часа.

Сканирование пространства в МРЛК БАЗ осуществляется лучом ДНА антенны МРЛС (рисунок 2.1) последовательным просмотром азимутально в горизонтальной плоскости, а после переключением строки угломестно в вертикальной плоскости.



В МРЛК БАЗ существуют четыре режима работы радиолокационной станции:

- «Готовность»;
- «Контроль»;
- «Круговой обзор» или режим «Метео»;
- «Растровый обзор» или режим «Сектор».

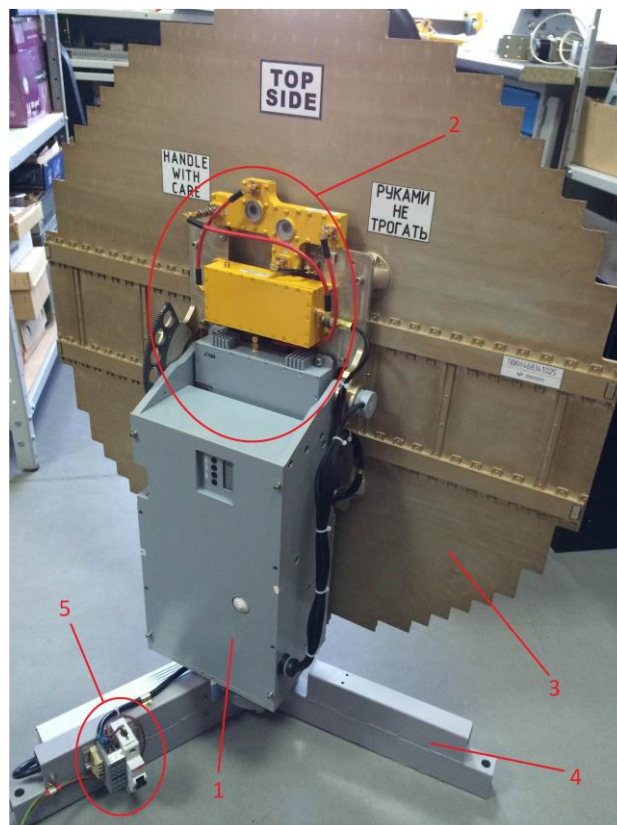


Рисунок 2.1– Внешний вид МРЛС без радиопрозрачного колпака (вид сзади)

- 1 – поворотная платформа; 2 - приемопередающий модуль;  
3 – антенная решетка; 4 – основание; 5 – автомат защиты сети (АЗС)

Режим «Готовность» включается автоматически после подачи питающего напряжения. В режиме «Готовность» СВЧ-излучение выключено. Антенна устанавливается и удерживается в нулевом положении по азимуту и углу места. В

режиме «Готовность» производится проверка исправности блоков МРЛС, не требующая включения сверхвысокой частоты (СВЧ).

В режиме «Контроль» производится полная проверка работоспособности МРЛС.

Режим «Круговой обзор» является для МРЛС основным режимом обзора. В этом режиме производится обзор пространства по заданной программе. Алгоритм обзора пространства по углу места задается оператором в зависимости от решаемой задачи и особенностей метеобстановки в конкретный момент времени.

В режиме «Растровый обзор» антенна перемещается от левой границы растра (сектора) к правой границе и обратно – рисунок 2.2. Переключение положения антенны по углу места происходит на границе растра.

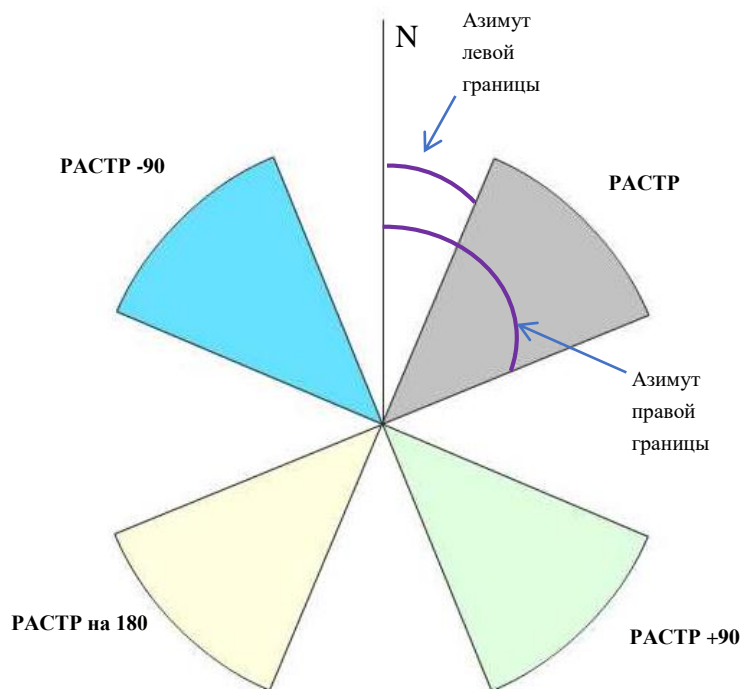


Рисунок 2.2– Варианты управления положением растра

Платформа поворотная с антенной осуществляет круговое движение по азимуту. При этом на каждый оборот может изменяться угол места согласно программе, заданной оператором.

При работе МРЛС возможно использование двух видов сигналов:

- сложный сигнал;
- простой сигнал.

Сложный сигнал (тринадцатиеlementный код Баркера) используется при режимах работы МРЛС «Круговой обзор» и «Растровый обзор». В данных режимах производится обзор пространства по заданной программе с излучением фазоманипулированных сигналов длительностью импульсов 19,5 мкс. При этом доступен только один масштаб дальности – 55 км.

Простой сигнал (импульсная модуляция несущей) используется при режимах работы МРЛС «Круговой обзор» и «Растровый обзор». В данных режимах производится обзор пространства по заданной программе с излучением импульсно-модулированных сигналов различных длительностей и периодов.

Частота повторения для режимов «Метео», «Сектор» может быть присвоена из диапазона 9330-9375 МГц. Указанный диапазон официально разрешён для проведения работ в области метеорологической радиолокации в соответствии с источником [66].

Решением Государственной комиссии по радиочастотам (далее – ГКР) №12-15-05-1 [65] с изменениями ГКР от 24 октября 2013 года №13-21-08-4 [64], от 22 июля 2014 г. №14-26-12 [63] установлены технические характеристики радиоэлектронных систем, работающих в диапазоне радиочастот 9200-9500 МГц, в таблице 2.1 приведены эти значения и дополнительные МРЛК БАЗ.

Таблица 2.1 – Технические характеристики радиоэлектронных систем в диапазоне радиочастот 9200-9500 МГц

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра	МРЛК БАЗ
1.	Радиослужба	Радиолокационная	Радиолокационная
2.	Полоса радиочастот	9200-9500, МГц	9330-9375 МГц
3.	Мощность радиопередатчика импульсная, не более	47 дБВт	20 дБВт
4.	Длительность импульсов	0.1...4200 мкс	2...32 мкс
5.	Ширина ДНА на уровне -3 дБ, не более	В гор. плоскости 10°	В гор. 3.25°
		В верт. 35°	В верт. 3.25°
6.	Коэффициент усиления антенны, не более	38 дБ	34 дБ

Решением от 16 апреля 2014 года № 14-23-04 [62] Государственная комиссия выделила полосы радиочастот 2935-2965 МГц и 9550-9650 МГц для метеорологических радиолокационных станций нового поколения.

В МРЛК БАЗ для режима «Метео» реализован последовательный одноканальный обзор пространства, метод обзора пространства – круговой.

Информация о типе сигнала, дальности действия, длительности импульса, периодов повторения, разрешающей способности по дальности для МРЛК БАЗ представлена в таблице 2.2, всюду указаны параметры для присвоенной частоты 9331 МГц.

Таблица 2.2 – Периоды повторения, длительности импульсов, разрешающая способность по дальности режима «Метео» МРЛК БАЗ

тип сигнала	простой (импульсная модуляция)			
	10	20	25	50
дальность действия, км	10	20	25	50
период 1, мкс	243	243	495	495
период 2, мкс	243	243	594	594
длительность импульса, мкс	2,1	2,1	4,125	8,1
разрешающая способность по дальности, м	315	315	618,75	1215

Обработка режима «Метео» содержит следующие этапы обработки сигнала:

- получение и обработку первичной обработки информации, поступающей от метеорологической радиолокационной станции (МРЛС);
- вторичная обработка информации с организацией циклов формирования конических сечений отражаемости (далее – Z), V и W с задаваемыми программно количеством конических сечений и угломестными значениями;
- третичная обработка информации для построения 2D и 3D изображений пространственных распределений характеристик метеоявлений и

классификации их по степени опасности, а также отображения информации, поступающей от нескольких локаторов, объединённых в сеть МРЛ;

- построение карты местных отражений и их фильтрации в процессе дальнейшей работы комплекса;
- обобщение данных по зоне обзора;
- предоставление оперативной и архивной информации на картографическом фоне на мониторах АРМ МРЛК;
- отключение излучения антенны в заданных секторах по азимуту;
- установка режимов работы передатчика, приёмника и системы первичной обработки данных МРЛК;
- управления антенной угломестно и азимутально по командам программ, заданных оператором;
- сопряжения и информационного обмена МРЛК БАЗ с внешними потребителями;
- получения первичной оперативной информации, касающейся технического состояния отдельных узлов комплекса.

Работу МРЛК БАЗ обеспечивает специальное программное обеспечение (СПО), устанавливаемое в рабочей станции АРМ МРЛК.

Структура СПО АРМ МРЛК состоит из четырёх основных компонентов:

- графический интерфейс пользователя;
- модуль аппаратного интерфейса пользователя;
- программные модули обработки информации (три модуля);
- хранилище метеорологических радиолокационных данных (два модуля)

(рисунок 2.3):

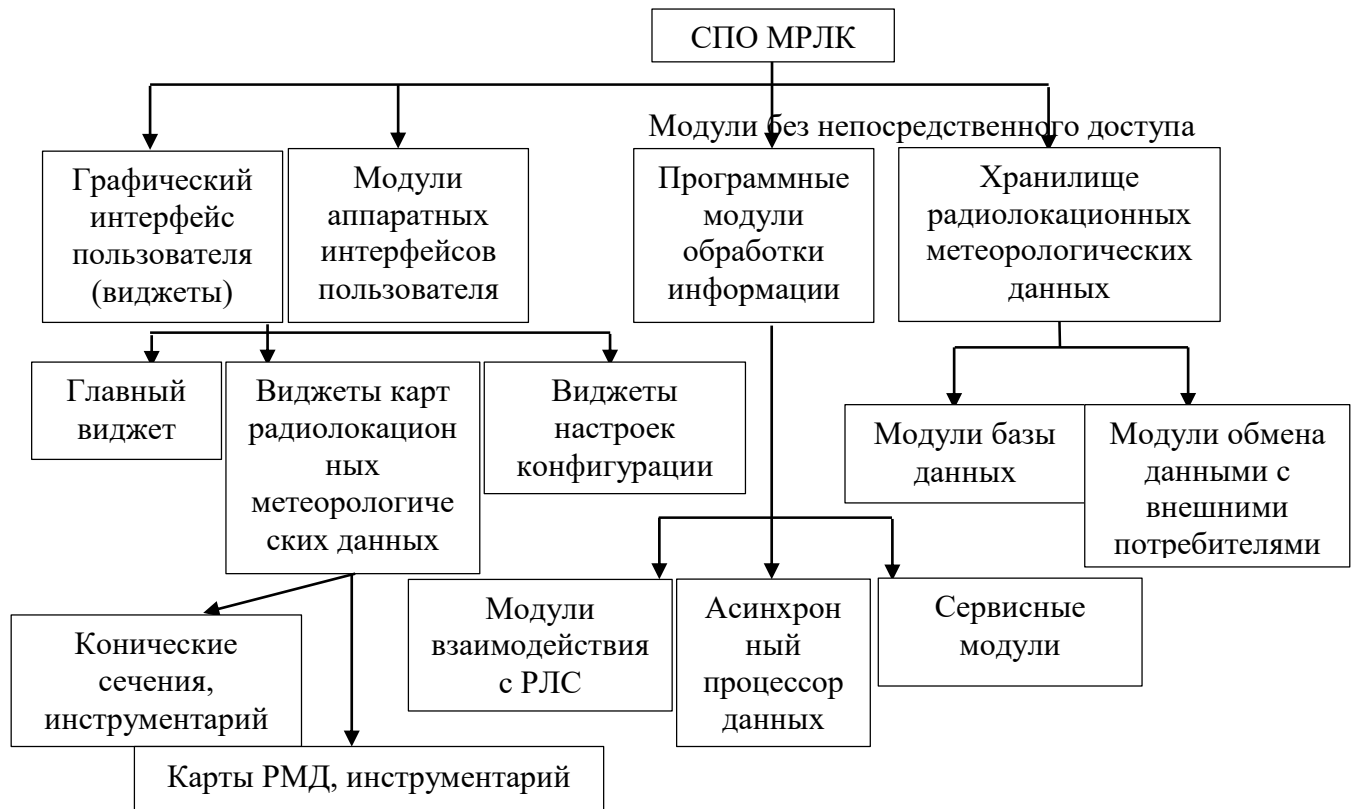


Рисунок 2.3 – Структура СПО АРМ МРЛК

В специальное программное обеспечение интегрированы коды следующих программ для ЭВМ, имеющих свидетельства о государственной регистрации:

- «Контроль состояния и исправности наземной метеорологической РЛС ближней зоны»;
- «Управление настройками радиолокационного модуля наземной метеорологической РЛС ближней зоны»;
- «Управление настройками СПО наземной метеорологической РЛС ближней зоны»;
- «Управление вычислительным процессом СПО наземной метеорологической РЛС ближней зоны»;
- «Приём и первичная обработка сигналов»;
- «Вторичная обработка сигналов, формирование метеорологических данных целей, данных диаграмм и сечений»;
- «Третичная обработка формуляров метеорологических данных целей»;
- «Индикация».

Общее взаимодействие с пользователем осуществляют аппаратный интерфейс и графический интерфейс пользователя. Аппаратный интерфейс включает в себя устройства взаимодействия, обеспечивающие получение и выдачу информации. Графический интерфейс состоит из комплекса виджетов. Виджетом является базовая единица интерактивного графического обмена информацией АРМ МРЛК и пользователя. На нём располагаются элементы управления формой представления данных, управления конфигурацией СПО и предоставления данных различных форматов.

Графический интерфейс СПО включает следующие типы виджетов:

- главный виджет программы;
- виджеты карт радиолокационных метеорологических данных (РМД): конические сечения с инструментарием; карты РМД с инструментарием;
- виджеты настроек конфигурации.

Главный виджет программы обеспечивает работу СПО и доступ к данным работы СПО. Виджеты карт радиолокационных метеорологических данных предоставляют инструментарий работы с данными и отображения результатов работы. Виджеты настроек конфигурации обеспечивают ввод, вывод и изменение параметров работы РЛС и конфигурации МРЛК БАЗ.

Программные модули обработки информации и хранилище радиолокационных метеорологических данных относятся к элементам структуры СПО, скрытым от непосредственного доступа пользователя. Параметры их работы управляются с помощью виджетов настроек конфигурации.

Программные модули обработки информации включают:

- модули взаимодействия с МРЛС;
- асинхронный процессор данных;
- сервисные модули.

Модули взаимодействия с МРЛС обеспечивают соединение с ней по локальной сети обмена данными, формирование команд управления и их передачу, приём и накопление «сырых» радиолокационных данных и приём данных состояния. Асинхронный процессор данных реализует цикл обработки данных с

импульсно-доплеровской обработкой сигналов, формированием данных конических сечений и карт радиолокационных метеорологических данных за текущий цикл. Сервисные модули обеспечивают расчёт параметров СПО и согласованное их изменение по командам пользователя, регистрацию различных данных и контроль состояния СПО.

Хранилище принимает информацию, полученную в асинхронном процессоре данных, сохраняет её в базе данных с помощью соответствующих программных модулей. Через виджеты графического интерфейса и модули аппаратных интерфейсов из хранилища осуществляется выборка и согласованное предоставление информации пользователю. Модули обмена данными с внешними потребителями обеспечивают преобразование внутренних данных СПО в необходимый формат, соединение и передачу этих данных внешним потребителям.

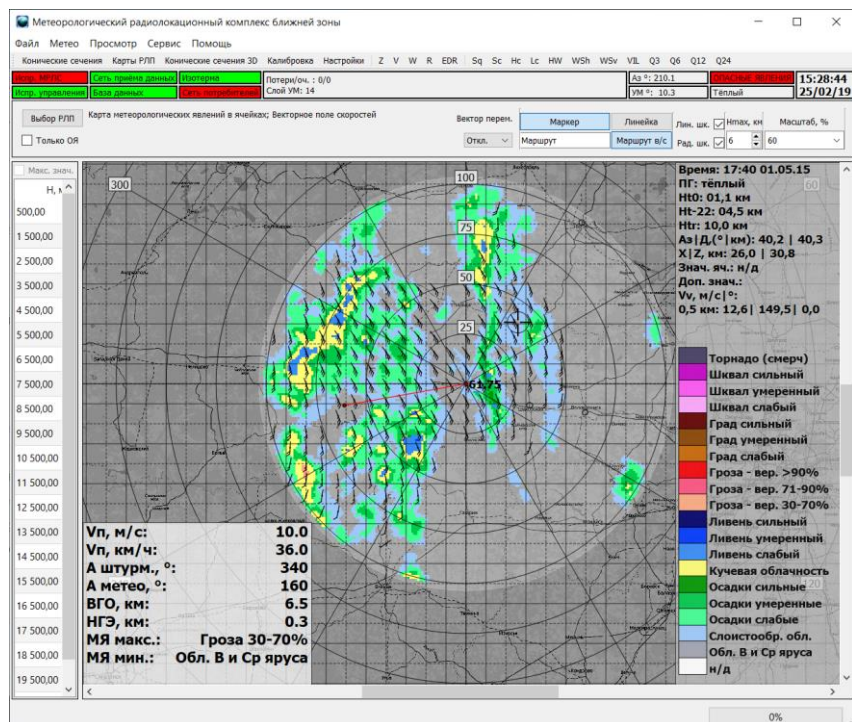


Рисунок 2.4 – Карта метеорологических явлений в ячейках и векторное поле скоростей в режиме работы «Метео»

Основа обработки сигналов МРЛК БАЗ – когерентная цифровая обработка комплексного спектра радиоэха. Энергетический спектрально-временной портрет



радиоэха содержит в себе информацию о распределении в пространстве мощности отраженного сигнала, радиальной скорости движения метеорологических объектов и ширине спектра скоростей внутри разрешаемого объёма. Динамика изменений этих параметров в пространстве и времени отражает свойства метеорологических объектов и качество происходящих в нем процессов.

Примеры отображения метеорологических радиолокационных данных для режима «Метео» представлены на рисунке 2.4.

## 2.2 Разработка технического облика секторного режима работы в метеорологическом радиолокационном комплексе ближней аэродромной зоны

В МРЛК БАЗ для режима «Сектор» реализован последовательный одноканальный обзор пространства, метод обзора пространства – секторный.

Периоды повторения, длительности импульсов, разрешающая способность по дальности, особенности обработки, структура СПО АРМ МРЛК для режима «Сектор» идентичны режиму «Метео», описанному в п. 2.1.

Для оценивания сдвигов ветра при сканировании атмосферы в режиме «Сектор» формируют оценки среднего значения ГПВ, ГСВ, ВСВ.

Этапы обработки радиолокационного сигнала в режимах «Метео» и «Сектор» были указаны в п. 2.1.

Отображение обработанной информации осуществляется на мониторе из состава АРМ МРЛК БАЗ. СПО МРЛК БАЗ устанавливается на рабочей станции МРЛК БАЗ, осуществляя контроль работоспособности комплекса, управление работой, обработку сигналов и вывод результатов работы на экран монитора.

Вид представления радиолокационных данных для режима «Сектор» представлены на рисунке 2.5.

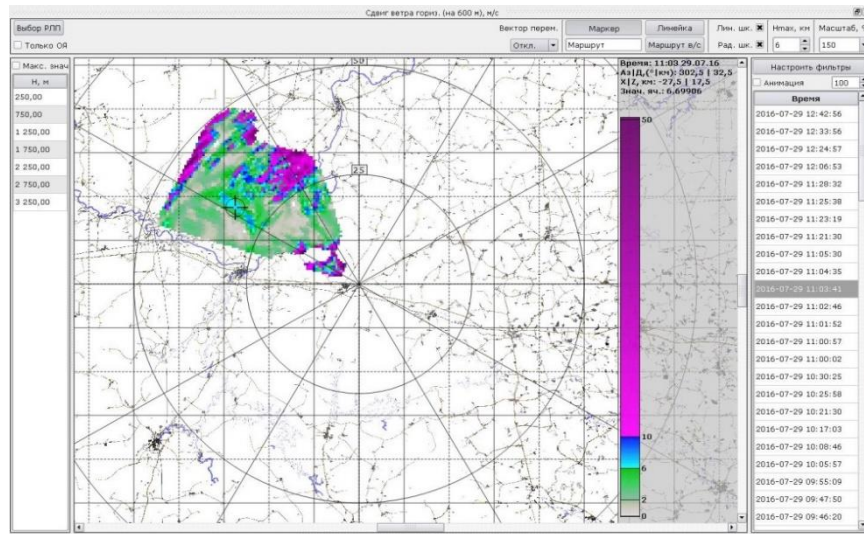


Рисунок 2.5 – Карты горизонтального сдвига ветра в режиме «Сектор»

Под первичными данными будем понимать объемные файлы, которые хранят координаты наблюдений и характеристики  $Z$ ,  $V$ ,  $W$ . Далее используя первичные данные, строится трёхмерная модель атмосферы, которая используется для построения вторичных РМД. При этом качество атмосферной модели зависит от количества углов места в программе сканирования (или количества конических сечений).

Исходя из рисунка 2.6 при перемещении луча ДНА от (а) до положения (б) мощность в приемнике будет изменяться по закону изменения интенсивности отражений в накрытых диаграммой направленности ячейках. При непрерывном сканировании ДНА РЛС и угловом дискрете получения информации  $\theta_{\text{ДНА}}$  значения в соседних ячейках по азимуту будут разными – в соответствии с обозначениями на рисунке 2.6 эта разница есть увеличение  $Z$ . Сформированные данные для рисунка 2.6 от (а) до положения (б) показаны на диаграммах рисунка 2.7 (а) и (б).

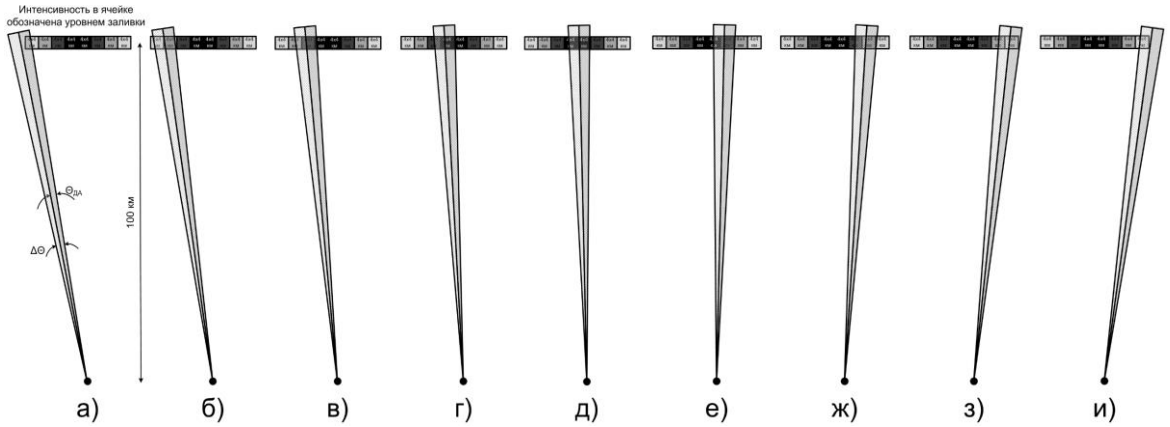


Рисунок 2.6 - Схема сканирования пространства МРЛК БАЗ

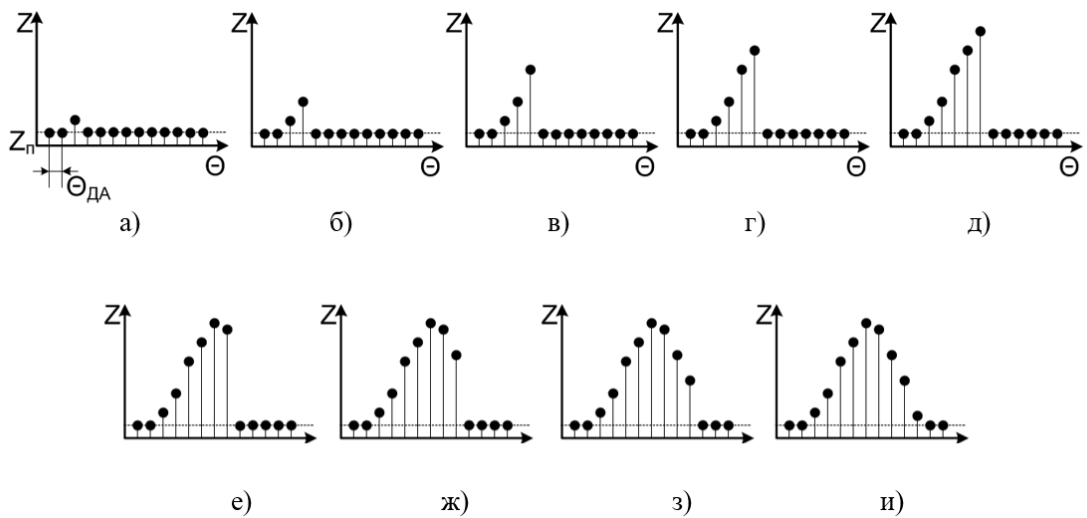


Рисунок 2.7 – Диаграммы значений сканирования при сканировании с дискретностью  $\theta_{\text{ДН}}$

При перемещении луча ДН от (б) до положения (в) на рисунке 2.6 из-за увеличения условной интенсивности отражений ячеек, также увеличится  $Z$  во всех азимутальных ячейках, расположенных через дискрет  $\theta_{\text{ДН}}$ . Сформированные данные для рисунка 2.6 от (б) до положения (в) показаны на диаграммах рисунка 2.7 (б) и (в).

По аналогии, при сканировании как показано на рисунке 2.6 от (в) до (и), через положения (г), (д), (е), (ж), (з), данные в соседних угловых ячейках по азимуту будут отражать изменение сигнальной обстановки с учетом увеличения и

последующего уменьшения интенсивности отражений ячеек. Сформированные данные для рисунка 2.6 от (в) до положения (и) показаны на диаграммах рисунка 2.7 от (в) до (и).

Из аналогии, по указанному описанию формирования данных радиолокационной отражаемости  $Z$  следует, что аналогичным образом формируются данные физических характеристик  $V$  и  $W$ . При этом на рисунке 2.7 обозначение оси  $Z$  в диаграммах заменяются на обозначение  $V$  или  $W$ . Характерное изменение значений в отсчетах по угловым позициям, может отличаться, но общий порядок формирования данных соблюдается.

Указанные положения справедливы для пространственно-протяженных реальных данных [40]. Особенная ситуация возникает при наличии одной стационарной максимальной ячейки в пике интенсивности, например, для рисунка 2.6 (д). При этом в данных возникнет, соответствующее, расширение максимума по азимуту по ширине диаграммы направленности. Частота наблюдения подобной ситуации для метеорологических образований значительно меньше по сравнению с пространственно-протяженными [40]. И с учетом практически постоянного перемещения метеорологических образований [40] практически всегда соблюдаются условия для указанного выше формирования данных в конических сечениях МРЛК БАЗ.

Следовательно, из принципа обеспечения безопасности по максимальным значениям пропуск метеорологической информации по сигналам опасных данных будет отсутствовать. Также, из указанного описания следует, что пространственное разрешение в том числе и в горизонтальной плоскости  $\theta_{\text{дна}}$  равно  $1,625^\circ$ .

Радиолокационная отражаемость  $Z$ , на основании которой строятся вторичные и третичные РМД, зависит от мощности отраженного сигнала. Настоящая работа базируется на тех радиолокационных основах, изложенных в [40,89], а именно на выводе уравнения радиолокации для определения метеорологических целей.

Далее просканированную область пространства, которая формирует ответное радиоэхо, будем называть импульсным объемом.

К вторичным РМД отнесём следующую метеорологическую информацию: карты метеорологических явлений в ячейках и контурах, верхняя и нижняя граница облачности, скорость диссипации турбулентной энергии, интенсивность осадков, накопленное количество осадков за определённый интервал времени, горизонтальный и вертикальный сдвиги ветра, векторное поле скоростей, вектор перемещения облачных образований.

Построение карт осуществляется как в декартовой системе координат, так и в географической системе координат. При построении карт в декартовых координатах данные линейных массивов последовательно заносятся в декартову систему координат. При построении карт в географических координатах в настройках АРМ МРЛК БАЗ осуществляется ввод географических координат положения комплекса, после чего происходит пересчёт полярных координат в географические.

Вся обработка данных разделяется на ряд последовательно выполняемых процедур первичной обработки информации, которые отличаются назначением, начальными и конечными данными (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Процедуры первичной обработки информации

№ п.п.	Процедура	Назначение	Входные данные	Выходные данные
1	Импульсно-доплеровская обработка	Сжатие по задержке и доплеровская фильтрация	Массив отсчетов комплексной огибающей отраженного сигнала	Результаты БПФ в каналах
2	Измерение мощности шума (выполняется в ясную погоду)	Определение мощности шумовых отсчетов и порога обнаружения	1Результаты БПФ в каналах дальности. 2Вероятность ложной тревоги	1Мощность шумовых отсчетов. 2Порог обнаружения
3	Обнаружение метеоцелей	1Пороговая обработка результатов БПФ. 2 Оценка мощности сигнала в каналах дальности	1Результаты БПФ в каналах дальности. 2Порог обнаружения. 3Мощность шумовых отсчетов	Оценка мощности отраженного сигнала в каналах дальности

№ п.п.	Процедура	Назначение	Входные данные	Выходные данные
4	Измерение V	Оценка V в каналах дальности	1 Результаты БПФ в каналах дальности. 2 Порог обнаружения 3 Мощность шумовых отсчетов. 4 Оценка мощности отраженного сигнала в каналах дальности	Оценка V в каналах дальности
5	Измерение Z	Оценка Z с учетом ослабления сигнала на трассе в каналах дальности	1 Оценка мощности отраженного сигнала в каналах дальности. 2 Параметры атмосферы	Оценка Z в каналах дальности
6	Расчёт интенсивности осадков	Оценка интенсивности осадков в виде дождя, снега и града	Оценка отражаемости в каналах дальности	Оценка интенсивности осадков в каналах дальности
7	Измерение параметров турбулентности	Определение параметров турбулентности в каналах дальности	1 Оценка радиальной скорости в каналах дальности. 2 Оценка ширины спектра скорости в каналах дальности	Оценка скорости диссипации турбулентной энергии в каналах дальности
8	Оценка скорости ветра	Определение характеристик поля скорости ветра в области анализа	1 Оценка радиальной скорости в каналах дальности. 2 Оценка ширины спектра скорости в точках области анализа	1 Оценка вектора скорости в центре области анализа. 2 Вертикальный сдвиг ветра и сдвиг ветра в горизонтальной плоскости

Измерение мощности шума включает определение средней мощности шумовых отсчётов и порога обнаружения по результатам БПФ в каналах дальности для указанной вероятности ложной тревоги (далее – ЛТ). Измерения выполняются в отсутствие отражений от метеоцелей. Для исключения обработки отражений от земли необходимо установить минимальную дальность обработки большую, чем дальность прямой видимости до наземных объектов, а также использовать

максимально возможный угол наклона. Точность оценок может быть улучшена за счёт дополнительного усреднения при разных значениях установленных углов антенны, а также усреднения по времени (результатам обработки пачек импульсов, полученных на разных интервалах времени).

Обнаружение метеоцелей осуществляется с помощью пороговой обработки результатов БПФ. На выходе формируются оценки суммарной мощности отраженного сигнала в каналах дальности.

Выполнение процедур 4-8, указанных в таблице 2.3 непосредственно обеспечивает решение задач МРЛК БАЗ с требуемым качеством.

Измерение отражаемости  $Z$  производят по оценке суммарной мощности отраженного сигнала с учётом ослабления сигнала на трассе распространения. Получаемые значения  $Z$  используются для расчёта интенсивности осадков.

Для обеспечения оценивания вектора скорости ветра и параметров турбулентности определяют радиальную скорость ветра в каналах дальности. При оценке характеристик скоростей движения элементарных отражателей можно воспользоваться тем фактом, что если  $Z$  однородна в пределах элемента разрешения или если  $Z$  и скорость являются некоррелированными величинами, то нормированный выборочный энергетический спектр соответствует плотности вероятности для радиальных скоростей. Тогда оптимальной оценкой радиальной скорости является первый центральный момент энергетического спектра отражённого сигнала.

Входными данными и параметрами при выполнении процедуры «Измерение параметров турбулентности» являются:

- оценка  $V$  и  $W$  в каналах дальности;
- минимальная длина серии метеоцелей;
- ожидаемое среднее значение интегрального масштаба продольной корреляции турбулентных пульсаций скорости ветра;
- интервал дискретизации нормированного коэффициента продольной корреляции скорости ветра;

– значения нормированного коэффициента продольной корреляции скорости ветра, которые хранятся в заранее подготовленном массиве (файле).

Особенностью процедуры является многократное использование основных алгоритмов:

– алгоритм определения количества начальных элементов и длин серий из входного массива оценок радиальных скоростей. Он формирует непересекающиеся серии метеоцелей. При этом выполняются условия:

а) все элементы серии соответствуют обнаруженным метеоцелям в каналах дальности;

б) длина серий выбирается для достижения разумного компромисса между статистической точностью формируемых оценок и погрешностью, обусловленной медленными пространственными изменениями параметров локально изотропной турбулентности;

в) длины серий выбираются максимально возможными для заданного входного массива радиальных скоростей, т.е. обеспечивается статистическая обработка параметров максимального количества метеоцелей;

– алгоритм решения системы линейных алгебраических уравнений с невырожденной симметричной треугольной матрицей коэффициентов, полностью определяемой её первым столбцом. Он возвращает кроме вектора решения  $x$ , значение определителя, используемого в блоке оценки интегральных масштабов. Элементы матрицы коэффициентов порождаются значениями нормированного коэффициента продольной корреляции скорости;

– алгоритм оценки среднего значения и дисперсии. Он возвращает максимально правдоподобные оценки математического ожидания (далее –  $m$ ) и СКО (далее –  $\sigma$ ) значений радиальной скорости для каждой серии;

– алгоритм оценки интегрального масштаба. Он определяет для каждой серии значение, максимизирующее логарифм функции правдоподобия.

Выходные массивы представляют собой оценку скорости диссипации турбулентной энергии (EDR) в каналах дальности. Точность формируемой оценки может быть улучшена за счёт дополнительного усреднения при разных значениях



установочных углов антенны, а также усреднения по времени (результатам обработки пачек импульсов для разных временных диапазонов).

Структура первичной обработки информации представлена на рисунке 2.8:



Рисунок 2.8– Структура первичной обработки РМД

Спектрально-временной портрет (далее – СВП) формируется на выходе блока БПФ без пороговой обработки. Далее для заданной вероятности ЛТ определяется уровень мощности шумов и порог обнаружения.

В блок медианной фильтрации (далее – МФ) поступают отсчеты СВП. Квантование значений мощности в фильтрах используется для снижения вычислительных затрат МФ и учитывает порог обнаружения и среднюю мощность шумов, реализуя тем самым и пороговую обработку. Апертуры МФ согласованы на подавление сигналов одиночных целей по частоте и дальности.

СВП в значениях мощности восстанавливается после МФ из квантованных значений. В блоки алгоритмов оценки мощности,  $V$ ,  $W$  по каналам дальности

поступает СВП, что далее формирует конические сечения мощности,  $V$  и  $W$  в зоне обзора МРЛК БАЗ для заданного положения антенны.

Для расчета ГПВ, EDR и ГСВ, ВСВ в блоки алгоритмов оценки  $Z$  направляются конические сечения мощности,  $V$  и  $W$ . Полученные РМД поступают в программные блоки регистрации, третичной обработки и индикации.

Далее в третичной обработке информации осуществляется классификация метеоявлений, формирование ВСО.

В 1 разделе работы было сказано, что МРЛК БАЗ должен отвечать требованиям надёжности. Ниже представлены основные технические параметры МРЛК БАЗ, обеспечивающие стабильность показателей качества изделия в условиях эксплуатации.

1) ширина диаграммы направленности антенны на прием и передачу: по азимуту и углу места не более 3.3 градуса. Эти параметры обеспечивают необходимые пространственные характеристики системы, т.е. параметры угловой разрешающей способности, количество положений луча для обеспечения требуемого сектора обзора, точности определения угловых координат, а также габаритные характеристики, определяемые размером излучающего раскрыва;

2) уровень боковых лепестков излучения решётки волноводно-щелевой не более минус 25 дБ. Этот параметр обеспечивает пространственную помехозащищенность системы;

3) сектор сканирования: по углу места  $0...90$  градусов, по азимуту  $\pm 1$  градус. Этот параметр обеспечивает минимальное время обзора выбранного пространственного сектора, скорость выдачи данных о радиолокационной обстановке;

4) точность позиционирования по азимуту не хуже  $1^\circ$ . Этот параметр обеспечивает точностные характеристики МРЛК БАЗ.

Заметим, что основной задачей настоящей работы является разработка алгоритмического обеспечения МРЛК БАЗ, а именно: обработка и интерпретация полученного полезного сигнала от гидрометеорологических образований. Следовательно, предпочтительным является вариант скорейшего изготовления

базового (обязательно когерентного) образца метеорологической радиолокационной станции. В настоящей работе рассматривались только отечественные производители метеорологических радиолокационных станций, поскольку разрабатываемый МРЛК БАЗ должен удовлетворять современным требованиям импортозамещения. Анализ современного рынка метеорологических радиолокационных станций отечественных производителей, предложенный в п. 1.2, показал, что наиболее подходящим для базового образца МРЛК БАЗ следует признать радиолокационную станцию «Контур-К» [57]. Причём для предъявляемых задач к МРЛК БАЗ указанный базовый образец необходимо доработать, сделав его когерентным.

Вторичная обработка базовых параметров в элементах разрешения по пространству обеспечивает:

- построение карт метеорологических данных (скорости диссипации турбулентной энергии, верхней и нижней границы радиоэха);
- построение векторного поля скоростей перемещения;
- построение карт метеорологических явлений, сдвигов ветра и турбулентностей.

Данные о  $Z$ ,  $V$  и  $W$  являются начальными для построения вторичных данных МРЛК БАЗ. Ниже приведена таблица 2.4, в которой представлена зависимость построения вторичных данных от первичных. Знаком «+» в таблице 2.4 отмечены те первичные данные, которые используются при построении вторичных данных МРЛК БАЗ.

Заметим, что в настройках СПО МРЛК БАЗ осуществлена реализация изменения прозрачности для вторичных РМД. Также в СПО осуществлена возможность отображения сразу нескольких слоев данных. Такая реализация в интерфейсе позволит накладывать различные карты друг на друга с разной прозрачностью и одновременно фиксировать различные метеопараметры для рассматриваемой засветки.

Таблица 2.4 – Основы построения вторичных данных МРЛК БАЗ

Вторичные данные МРЛК БАЗ	Первичные данные МРЛК БАЗ		
	Z	V	W
Метеорологические явления в ячейках и контурах	+	+ (для определения шквала, смерча)	
ВГО	+		
НГО	+		
Интенсивность осадков	+		
Накопленное количество осадков	+		
ГПВ	+	+	
ГСВ	+	+	+
ВСВ	+	+	+
EDR	+	+	+
ВСО (алгоритм по «центру масс»)	+		
ВСО (алгоритм по «радиальной скорости»)		+	

### 2.3 Разработка метода оценки ветровых параметров и характеристик в метеорологическом радиолокационном комплексе ближней аэродромной зоны

Основное предназначение МРЛК БАЗ: оценивание и классификация опасных метеоявлений вблизи аэродрома с приоритетом в секторах взлета и посадки. При оценке ветровых характеристик согласно требованиям ИКАО необходимо сформировать информацию о турбулентности атмосферы в единицах кубического корня из скорости затухания вихря (EDR), а также оценивать вертикальный (на 30 или на 100 м) и горизонтальный (на 600 м) сдвиги ветра [20-21,84]. Оценка данных ветровых характеристик в настоящее время производится как количественно, так и качественно в виде опасности явления.

Так, в таблице 2.5 представлена градация сдвига ветра по классификации ИКАО, с помощью которой можно качественно оценивать опасность сдвига ветра [55].

Таблица 2.5 – Градация ГСВ и ВСВ по классификации ИКАО

<b>ВСВ на 30 м или ГСВ на 600 м, м/с</b>	<b>ВСВ на 100 м, м/с</b>	<b>Характеристика сдвига ветра</b>
0-2	0-6,5	слабый
2-4	6,5-13	умеренный
4-6	13-20	сильный
>6	>20	очень сильный

При этом ГСВ, ВСВ одной интенсивности могут по-разному воздействовать на ВС, а экипаж воздушного судна, в свою очередь, будет давать субъективную оценку воздействия сдвига ветра на ВС, поэтому актуальна и количественная оценка ГСВ, ВСВ.

Входными данными для расчета сдвига ветра являются следующие радиолокационные данные в конических сечениях:  $V$  и  $W$ . Ширина спектра радиальных скоростей – мера распределения значений скорости в пределах импульсного объёма. В случае наблюдения, так называемого уширения спектра (когда значения  $W$  завышены) можно говорить о наличии сдвига ветра и/или турбулентности в той или иной точке пространства. Усреднение (оценка) сдвига ветра в МРЛК БАЗ происходит на линейных масштабах.

В МРЛК БАЗ построение сдвигов ветра осуществляется для различных уровней высоты, причём конкретные значения этих уровней могут настраиваться оператором при помощи специального программного обеспечения. Настройка высотных уровней для сдвигов ветра удобна тем, что оператор может рассматривать поля сдвигов ветра на интересующих его высотах, выбранных, например, в соответствии с особенностями местной циркуляции атмосферы в конкретном регионе/пункте.

Что касается турбулентности, то под этим термином согласно [99] понимают наличие неупорядоченности течения, разные величины которого хаотично

изменяются в пространстве и времени. Заметим, что метеорологический радиолокатор способен обнаружить турбулентность только при наличии облачности. В свою очередь в атмосфере наблюдается и так называемая турбулентность ясного неба, которая может быть обнаружена при помощи лидара. Симбиоз метеорологических систем метеолокатор/лидар позволит определять турбулентность при любых погодных условиях – при наличии облачности/ясного неба соответственно.

Как и для сдвига ветра, входными данными для расчёта турбулентности будут являться радиальная скорость и ширина спектра радиальных скоростей. При наличии турбулентности наблюдается уширение спектра, поскольку она вызвана произвольным радиальным движением капель дождя. Как было замечено выше, сдвиг ветра может также вызвать подобные хаотичные радиальные движения цели, но по сравнению с турбулентностью, при наличии сдвига ветра будут различия в скоростях падения капель дождя различных размеров. Когда ширина спектра превышает порог незначительной, слабой турбулентности, на индикаторе МРЛК БАЗ сигнал будет в виде зоны турбулентности.

Важно заметить, что ИКАО регламентировано получение для ВС информации о турбулентности в единицах кубического корня из скорости затухания вихря (EDR) [54]. Ниже представлены градации турбулентности согласно пп.2.6.2-2.6.3 документа ИКАО [54] – таблица 2.6:

Таблица 2.6 – Градация EDR по классификации ИКАО

Характеристика турбулентности	EDR, м <sup>2/3</sup> /с
нулевая	≤0,1
слабая	0,1-0,4
умеренная	0,4-0,7
сильная	>0,7

Как и для сдвига ветра, характер воздействия турбулентности на воздушной судно во многом также определяется его аэродинамикой (площадью крыла), весом, размерами и т.д., что определяет необходимость ее количественной оценки.

При количественной оценке рассматриваемых ветровых (да и любых других) измеряемых параметров необходимо определить диапазон и дискретность (влияющую на точность) измерений. В таблице 2.7 представлены требования к диапазонам и дискретности оценок турбулентности в единицах EDR и ГСВ, ВСВ в соответствии с существующими требованиями, предъявляемыми к метеорологическим датчикам при оценке ветровых характеристик [1,54,68,80-85,94-96].

Таблица 2.7 – Требования к диапазонам и дискретности оценок ветровых характеристик

На горизонтальной дальности до 100 км	Удельная скорость диссипации турбулентной энергии, $m^{2/3}/c$	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

Таким образом, разрабатываемый метод по входным сигналам в виде значений радиальной скорости и ширины спектра сигнала, отраженного от обнаруженных метеообъектов в каждом канале дальности для конических сечений, должен на выходе сформировать оценки горизонтального, вертикального сдвигов ветра и турбулентности с заданными диапазоном и дискретностью в ячейках выбранного размера в декартовых координатах. Далее предусматривается градация ГСВ, ВСВ и турбулентности по степени опасности. Выходная информация отображается на индикаторе МРЛК БАЗ в виде контуров опасности ГСВ, ВСВ и турбулентности для выбранных оператором горизонтальных или вертикальных сечений (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 – Схема метода оценки опасных ветровых метеорологических явлений (ГСВ, ВСВ, EDR) в МРЛК БАЗ

Последовательность операций разрабатываемого метода заключается в виде первичной обработки сигналов, а также вторичной обработки информации.

Первичная обработка сигналов предполагает следующее (рисунок 2.10):

- накопление отраженного сигнала, формирование пачек, получение спектра сигнала в каждом канале дальности для каждого углового положения антенны (в так называемых «конических сечениях»);
- фильтрация импульсных помех, формирование порога, оценка значений мощности и обнаружение сигнала в каждом канале дальности.
- оценка значений  $V$  и  $W$  для всех каналов дальности, в которых обнаружен сигнал;
- расчет турбулентности в результате обработки скоростных параметров в «сигнальных» ячейках;
- формирование выходных векторов отражаемости, радиальных скоростей и турбулентности для заданного углового положения антенны.



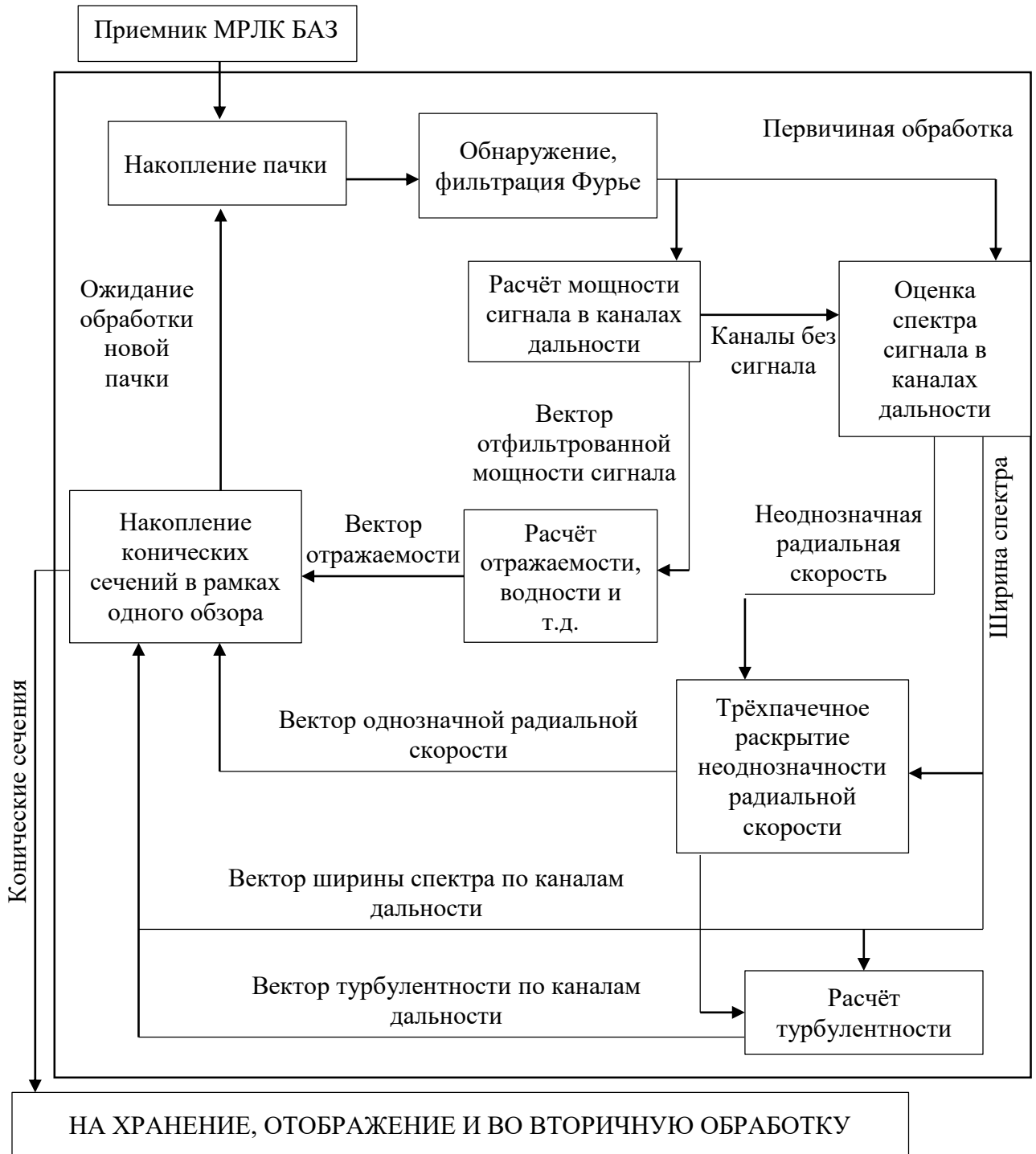


Рисунок 2.10 – Первичная обработка сигналов в МРЛК БАЗ

Особенность данного этапа является обработка нескольких подряд идущих пачек сигналов для устранения неоднозначности по радиальной скорости. Кроме того, турбулентность оценивается для серий, обнаруженных в каналах дальности сигналов, методом корреляционного анализа. Детально разработанный алгоритм оценки турбулентности будет показан позже. Отображение информации в МРЛК

БАЗ возможно уже по результатам первичной обработки, так как все конические сечения в результате полного цикла обзора формируют трехмерную матрицу метеорологических параметров – рисунки 2.11-2.13:

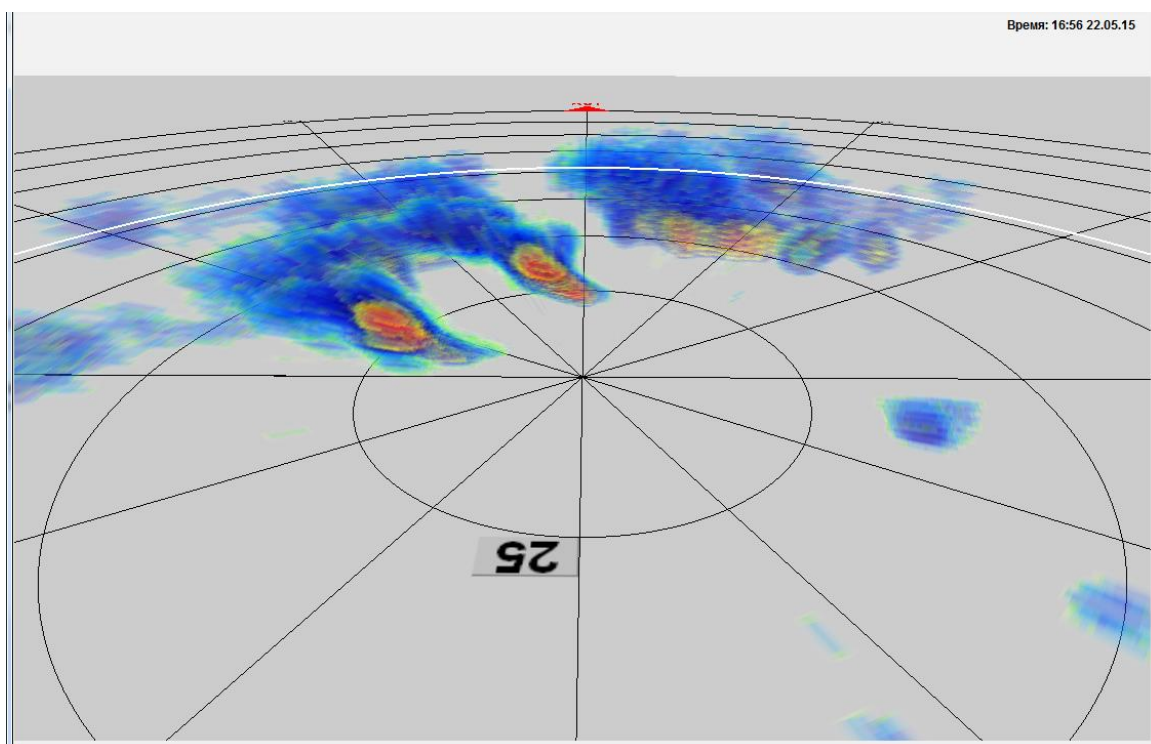


Рисунок 2.11 – Трёхмерное представление радиолокационной отражаемости

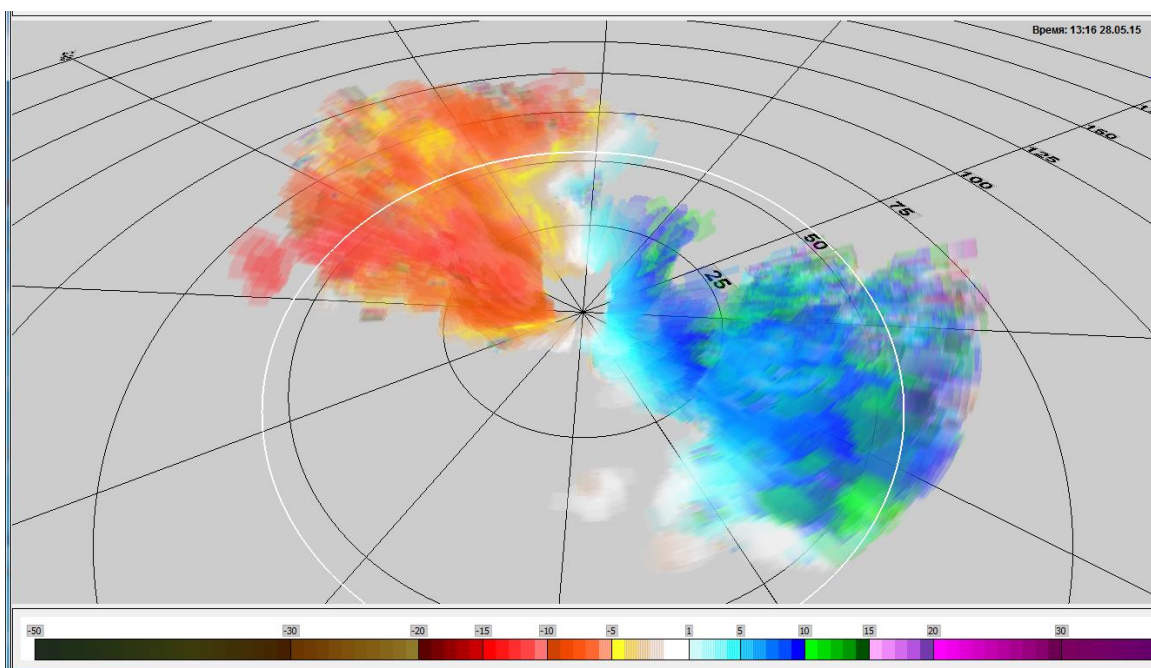


Рисунок 2.12 – Трёхмерное представление радиальной скорости

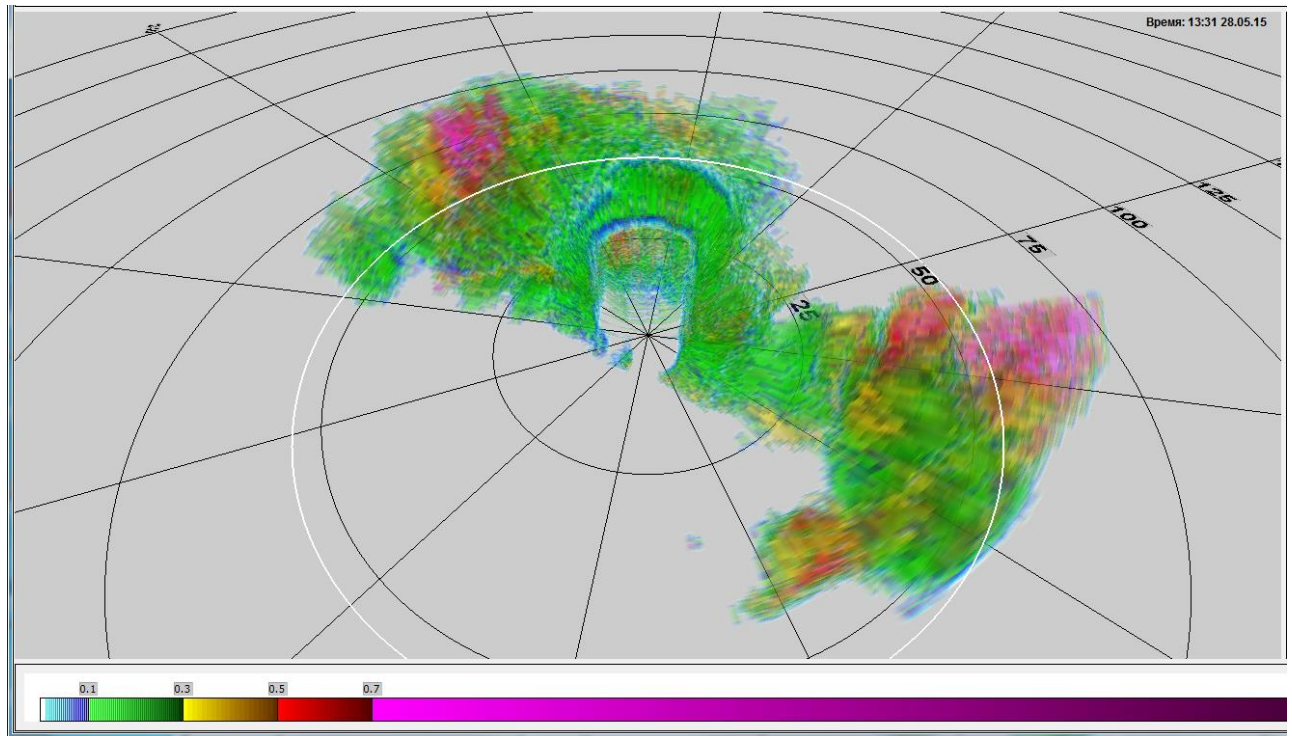


Рисунок 2.13 – Трёхмерное представление EDR

Вторичная обработка информации предполагает следующее (рисунок 2.14):

- формирование декартова пространства в координатах  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  относительно РЛС с размером ячеек  $1 \times 1 \times 1$  км;
- значение метеопараметра для центра ячейки формируется в результате усреднения всех измерений, попавших в ячейку;
- расчет промежуточных значений метеопараметров производится через градиент между соседними точками как по вертикали; так и по горизонтали;
- формируются карты метеоявлений с оконтуриванием, градацией опасности и их любые сечения.

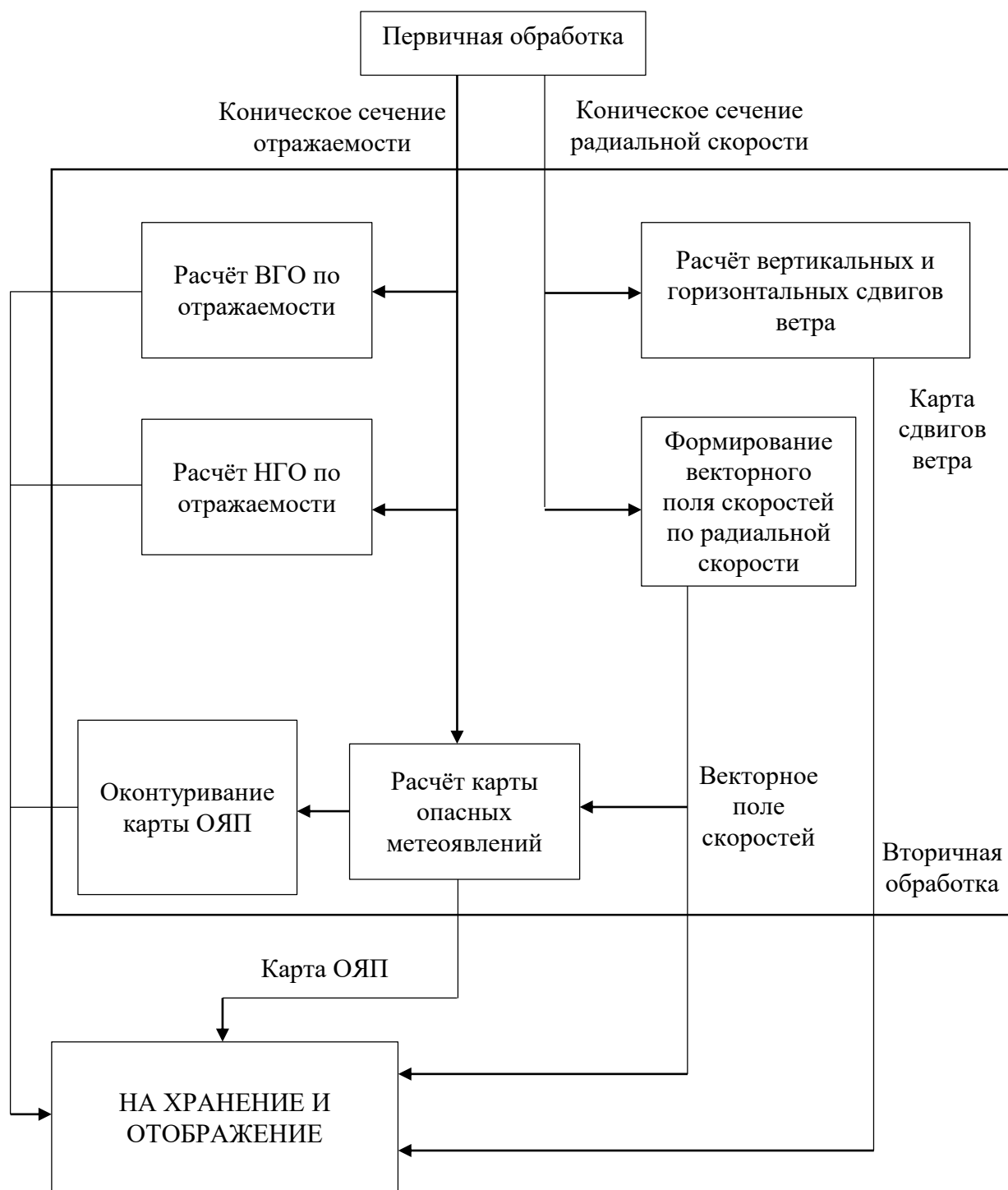


Рисунок 2.14 – Вторичная обработка информации в МРЛК БАЗ

При формировании карт сдвигов ветра имеются некоторые особенности. В МРЛК БАЗ сдвиг ветра может быть оценен как изменение значения скорости на интервале 30 м по вертикали и 600 м по горизонтали. Последовательность операций представлена на рисунке 2.15. Особенностью алгоритма является решение систем линейных дифференциальных уравнений.

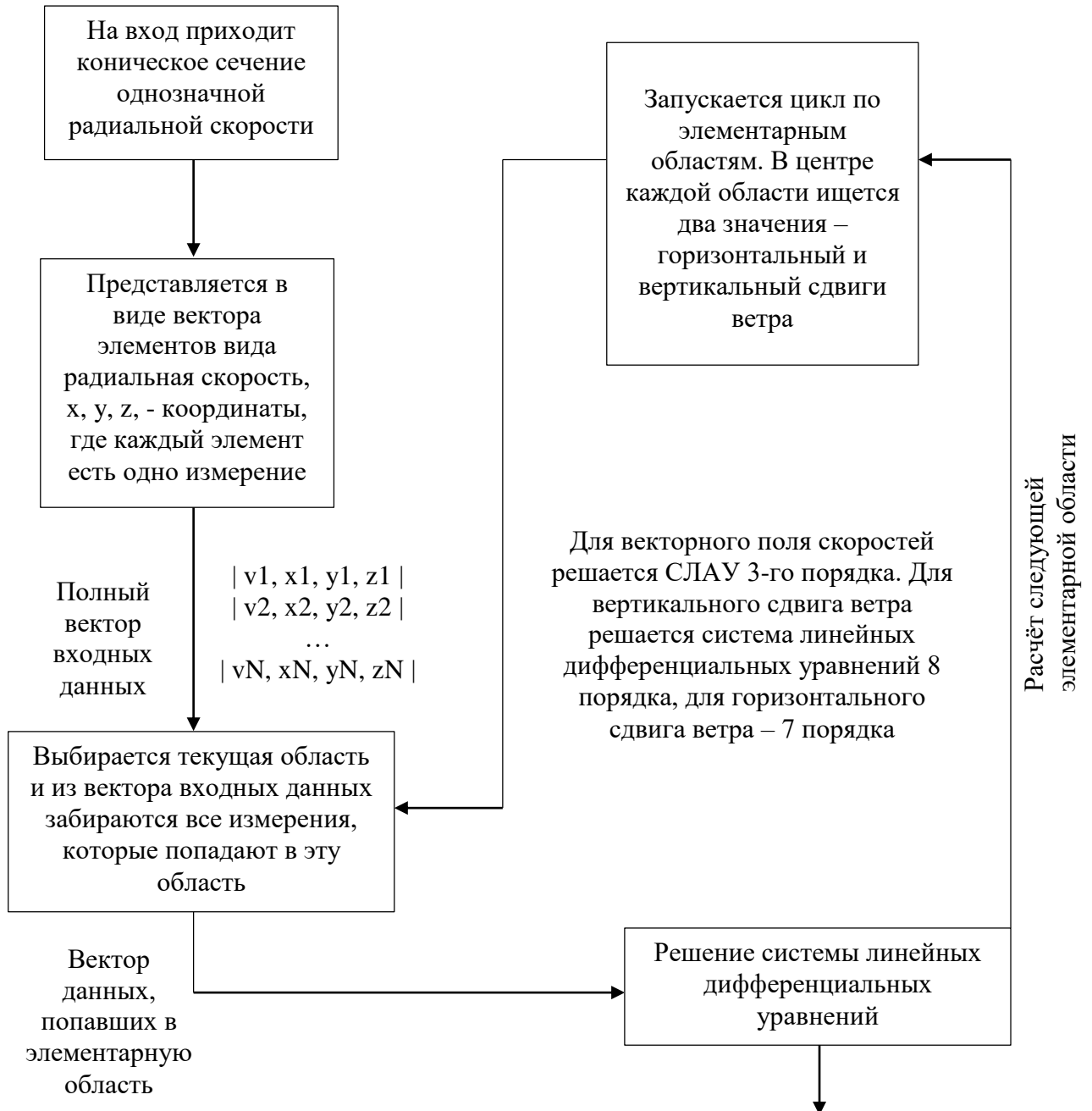


Рисунок 2.15 – Последовательность операций при обработке информации в МРЛК БАЗ

Разработанный метод на своем выходе формирует трехмерную матрицу значений турбулентности для всей зоны обзора с отображением любых сечений (рисунок 2.16), а также горизонтальный и вертикальный сдвиг ветра (рисунки 2.17-2.18 соответственно) для режима работы МРЛК БАЗ «Сектор».

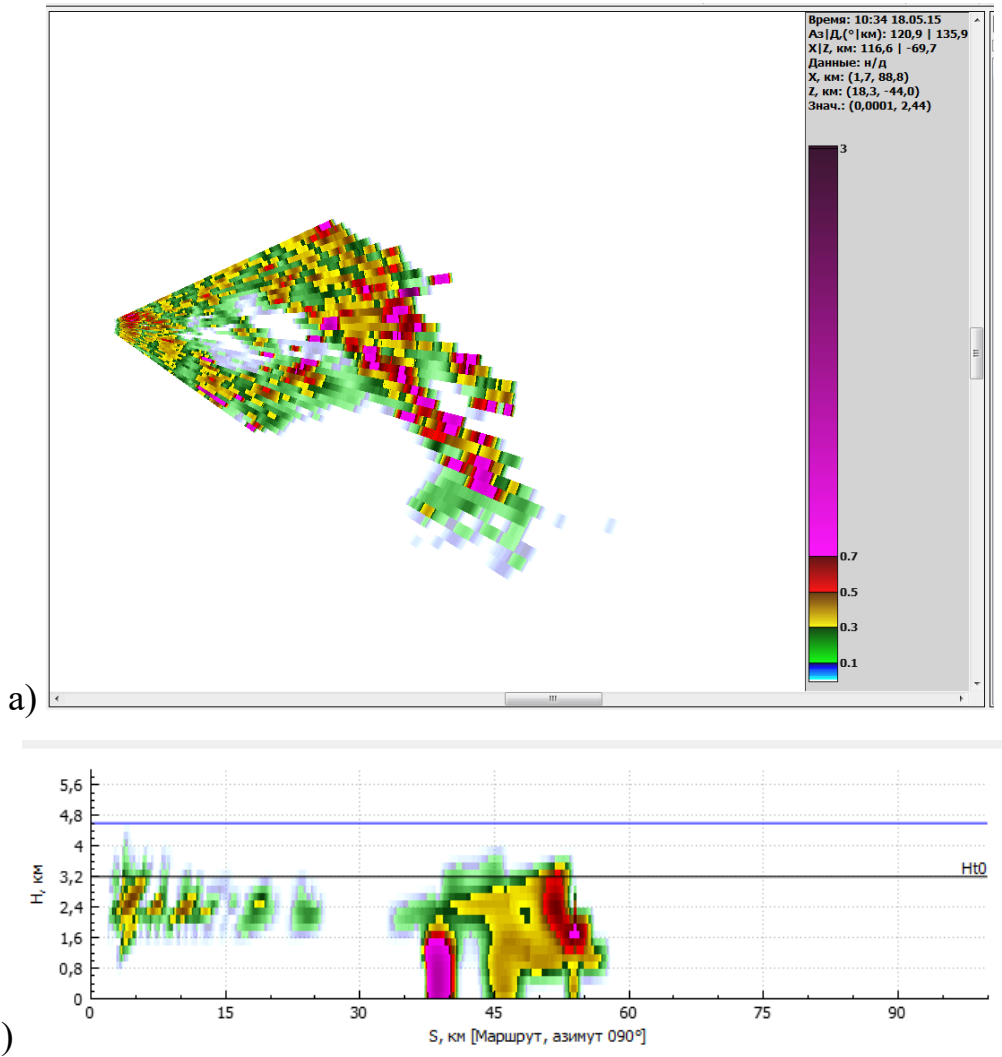


Рисунок 2.16 – Горизонтальное (а) и вертикальное (б) сечения EDR в режиме «Сектор» в МРЛК БАЗ

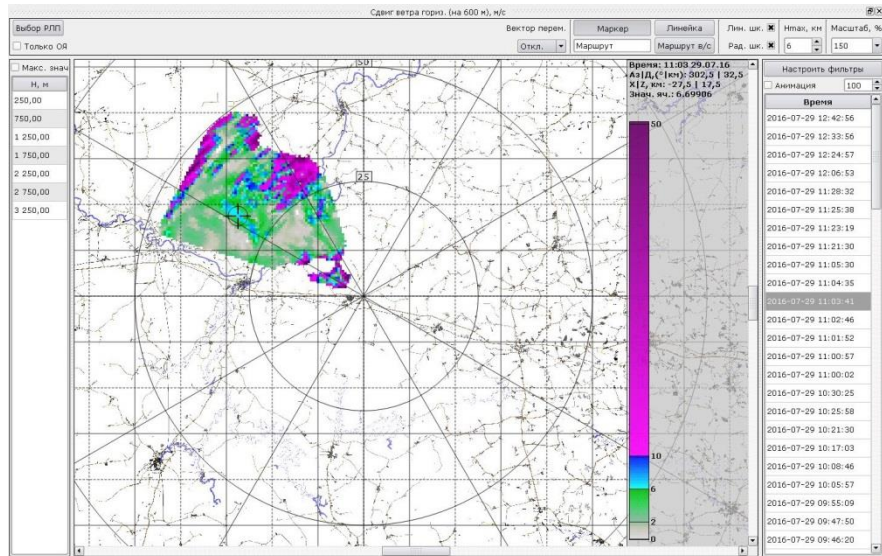


Рисунок 2.17 – Карта ГСВ в режиме «Сектор» в МРЛК БАЗ

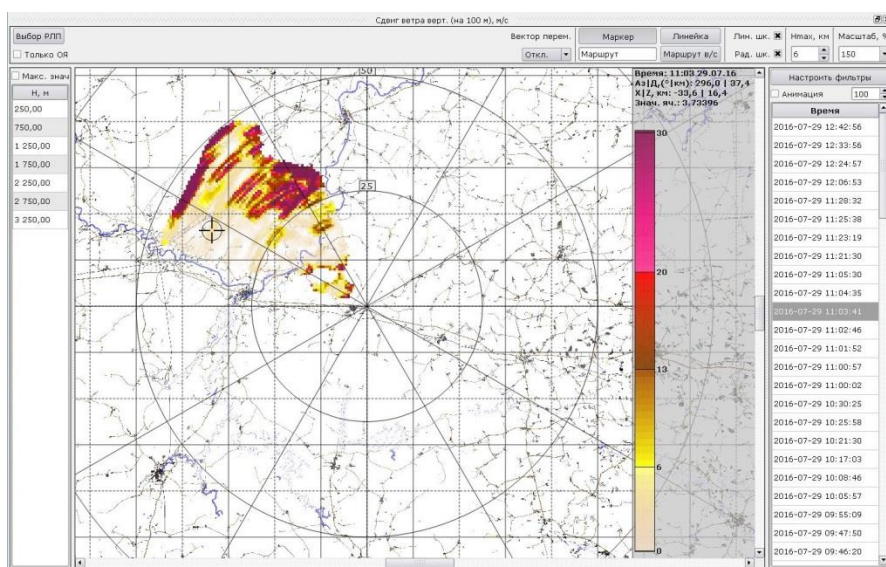


Рисунок 2.18 – Карта ВСВ в режиме «Сектор» в МРЛК БАЗ

Наибольший интерес и новизну представляют алгоритмы ГСВ, ВСВ, EDR, разработка и оценка эффективности которых представлены в 3 главе.

### Выводы по 2 главе:

МРЛК БАЗ представляет собой радиолокационный модуль, который осуществляет излучение радиоимпульсов, 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 растра (сектора) к правой границе и обратно. Переключение положения антенны по углу места происходит на границе растра.

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.

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), заключающийся в следующем: в ходе первичной обработки информации в метеорологическом радиолокаторе ближней аэродромной зоны формируются измеренные значения радиальной скорости и ширины спектра радиальных скоростей в каналах дальности. Эти данные 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).

### **Глава 3. Разработка алгоритмов оценки опасных ветровых метеоявлений для секторного режима метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны**

В настоящей главе рассмотрим внедрённые в МРЛК БАЗ алгоритмы ветровых параметров и характеристик из следующего состава:

- удельная скорость диссипации турбулентной энергии (EDR);
- горизонтальный и вертикальный сдвиги ветра (ГСВ и ВСВ).

Начальными данными для указанной радиолокационной метеорологической информации является радиолокационная отражаемость и радиальная скорость. Алгоритм радиолокационной отражаемости подробно описан в различных источниках [20-21,40,55,83]. Расчёт радиальной скорости в МРЛК БАЗ осуществляется по алгоритму VVP (volume velocity processing), описанному в источнике [40]. Заметим, что в современных метеорологических радиолокаторах, работающих оперативно на сети Росгидромета, внедрён алгоритм определения радиальной скорости VAD, который предполагает наличие горизонтальной однородности поля ветра [20,77] – что не соответствует реальной физике явления ветра. В случае алгоритма VVP, более приближенного к реальным атмосферным условиям, оценка радиальной скорости осуществляется в трёхмерном объёме, что представлено на рисунке 3.1:

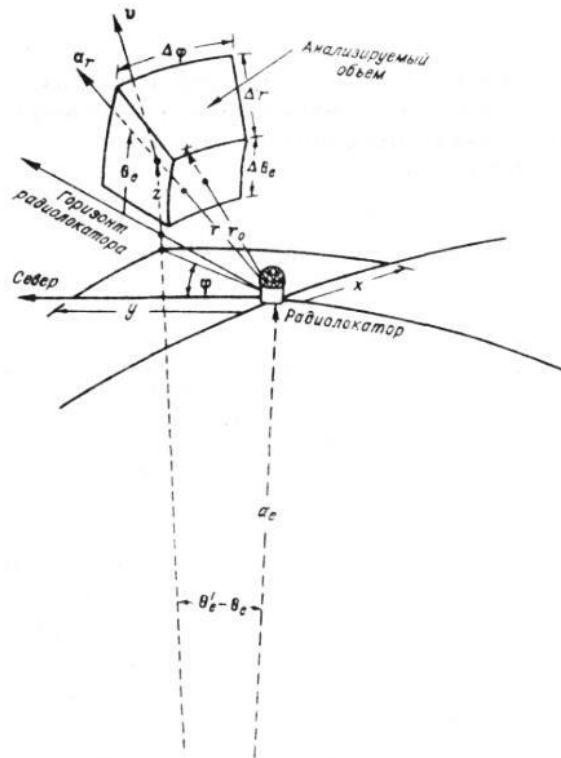


Рисунок 3.1 – Сферическая система координат, выбранная для измерения скорости ветра

Далее перейдём к описанию алгоритмов ветровых параметров и характеристик.

### 3.1 Разработка алгоритма оценки удельной скорости диссипации турбулентной энергии и анализ его эффективности

Важной задачей для метеорологических радиолокаторов является оценивание зон опасной турбулентности.

Использование в современных и перспективных метеорологических локаторах сложных широкополосных сигналов и позволяет обеспечить высокое

разрешение по дальности. В пределах области микромасштабного размера могут быть сформированы достаточно длинные серии измерений радиальной скорости ветра. Определение параметров турбулентных пульсаций скорости ветра на основе параметрического корреляционного анализа указанной статистики представляется перспективным.

Карман и другие авторы предложили метод, который описывает спектр вертикальных турбулентных порывов ветра на уровне полёта самолёта по одному параметру  $\varepsilon^{1/3}$ , скорости диссипации турбулентной энергии (EDR) [82].

В [84] указано, что параметр EDR представляет отдельный интерес, поскольку в требованиях ИКАО он – основной критерий для автоматического представления донесения о турбулентности с борта ВС.

В результате наложения турбулентных пульсаций различных масштабов на крупномасштабный поток формируется структура атмосферных движений. Характерный масштаб  $L$  вихрей (элементов турбулентности) – это расстояние, до которого сохраняется взаимная корреляция пульсаций ветра. Как правило значения  $L$  заключены в интервале от 100 – 300 м на высотах  $H = 70...300$  м до 1.5 – 2.5 км на больших высотах в тропосфере и нижней стратосфере [88].

Турбулентность в свободной атмосфере подразделяют на турбулентность ясного неба (далее – ТЯН) и турбулентность в облаках. Ниже представлена информация об указанных явлениях согласно источнику [88].

К ТЯН относят турбулентные пульсации скорости потока, не связанные с конвекцией облаков, но которые способны влиять на условия полетов ВС ввиду формирования болтанки ВС.

Вне горных районов и областей интенсивной конвекции потоки воздуха в условиях ТЯН можно считать квазиламинарными.

Для большинства условий применения МРЛК БАЗ случайное поле  $\tilde{V}(x, y, z)$  турбулентных пульсаций скорости в условиях ТЯН и турбулентности в облачности можно считать изотропным.

Входными данными алгоритма EDR являются:

- оценки радиальной скорости в каналах дальности  $V_m$ ;  $m = \overline{0; M - 1}$ .

- оценки ширины спектра скоростей в каналах дальности  $(\sigma_V)_m; m = \overline{0; M-1}$ .

Выходными данными алгоритма являются оценки EDR в каналах дальности  $\varepsilon_m; m = \overline{0; M-1}$ .

Условия функционирования алгоритма:

- должны быть получены оценки V и W в каналах дальности.
- должны быть заданы общие параметры режимов «Метео», «Сектор» и параметры рассматриваемого алгоритма, представленные в таблице 3.1.

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 3.2. На схеме помимо элементарных операторов, переменных и параметров, используются следующие составные блоки и обозначения.

Таблица 3.1 – Параметры алгоритма «Измерение параметров турбулентности»

Обозначение	Название, размерность	Значение
$K_\sigma$	параметр, определяющий СКО оценки радиальной скорости	12
$L^{(0)}$	ожидаемое среднее значение интегрального масштаба турбулентности, м	760
$\delta x$	интервал дискретизации коэффициента продольной корреляции скорости	$10^{-2}$
$f_k, k = \overline{0; K-1}$	значения коэффициента продольной корреляции скорости	хранятся в заранее подготовленном массиве
$\delta M$	минимальная длина серии ненулевых оценок радиальной скорости	10
$\delta D$	дискрет дальности, м	
$\Delta D$	разрешающая способность по дальности, м	$\Delta D = \frac{c \cdot \tau_0}{2}$
$\Delta$	нормированное разрешение по дальности	$\frac{\Delta D}{\delta D}$
$I$	коэффициент перекрытия стробов дальности	$truc(\Delta)$
$\rho_m; m = \overline{0; 2M-1}$	коэффициенты корреляции ошибок определения радиальной скорости	$\left(1 - \frac{m}{\Delta}\right)^2$ при $m < I$ ; 0 при $m \geq I$

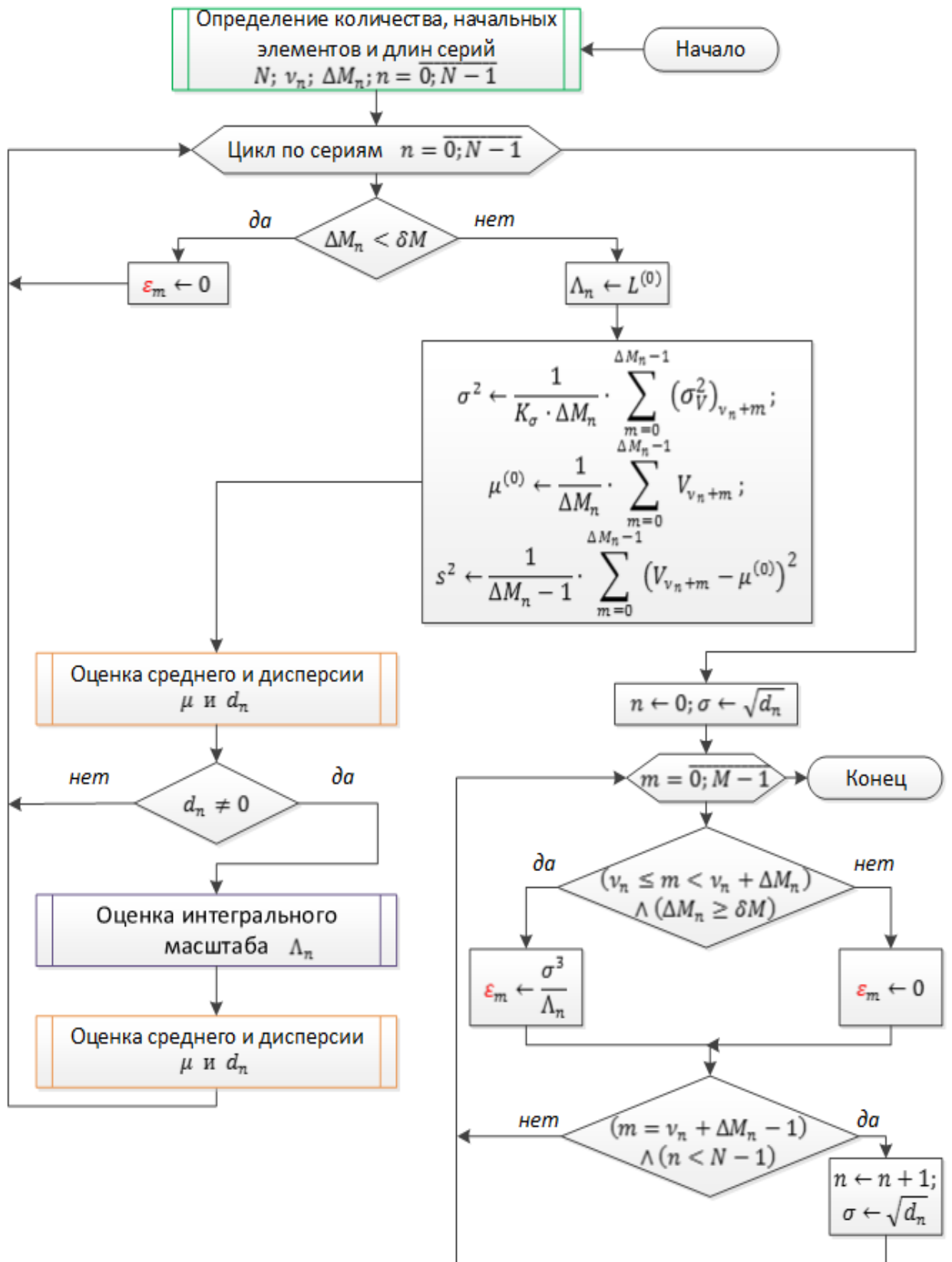


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритма «Измерение параметров турбулентности»

Составной блок «Определение количества, начальных элементов и длин серий» формирует из входного массива  $V_m$ ;  $m = \overline{0; M - 1}$ , оценок радиальных скоростей непересекающиеся множества (серии) вида

$$S_n = \{V_{v_n}, V_{v_n+1}, \dots, V_{v_n+\Delta M_n-1}\}; \quad n = \overline{0; N - 1}. \quad (3.1)$$

где  $N$  – количество серий;  $v_n$  – номер первого элемента  $n$ -й серии;  $\Delta M_n$  – длина  $n$ -й серии. Множества удовлетворяют условиям:

– все элементы серии соответствуют обнаруженным метеоцелям в каналах дальности

$$V_{v_n+i} \neq 0; \quad i = \overline{0; \Delta M_n - 1}; \quad (3.2)$$

– длина серий выбирается для достижения разумного компромисса между статистической точностью формируемых оценок и погрешностью, обусловленной медленными пространственными изменениями параметров локально изотропной турбулентности:

$$\delta M \leq \Delta M_n < 2\delta M; \quad n = \overline{0; N - 1}; \quad (3.3)$$

– длины серий выбираются максимально возможными для заданного входного массива радиальных скоростей  $V_m$ , т.е. обеспечивается статистическая обработка параметров максимального количества метеоцелей.

Структура блока «Определение количества, начальных элементов и длин серий» приведена на рисунке 3.3. Функция  $ceil[a]=trunc[a]+1$ , где  $trunc[a]$  –целая часть числа  $a$ ,  $mod[A,B]$  – остаток от деления целого числа  $A$  на целое число  $B$ . Составной блок «Оценка среднего и дисперсии» (рисунок Рисунок 3.4) возвращает

максимально правдоподобные оценки математического ожидания  $\mu$  и дисперсии  $d_n$ ;  $n = \overline{0; N-1}$ , значений радиальной скорости для каждой серии.

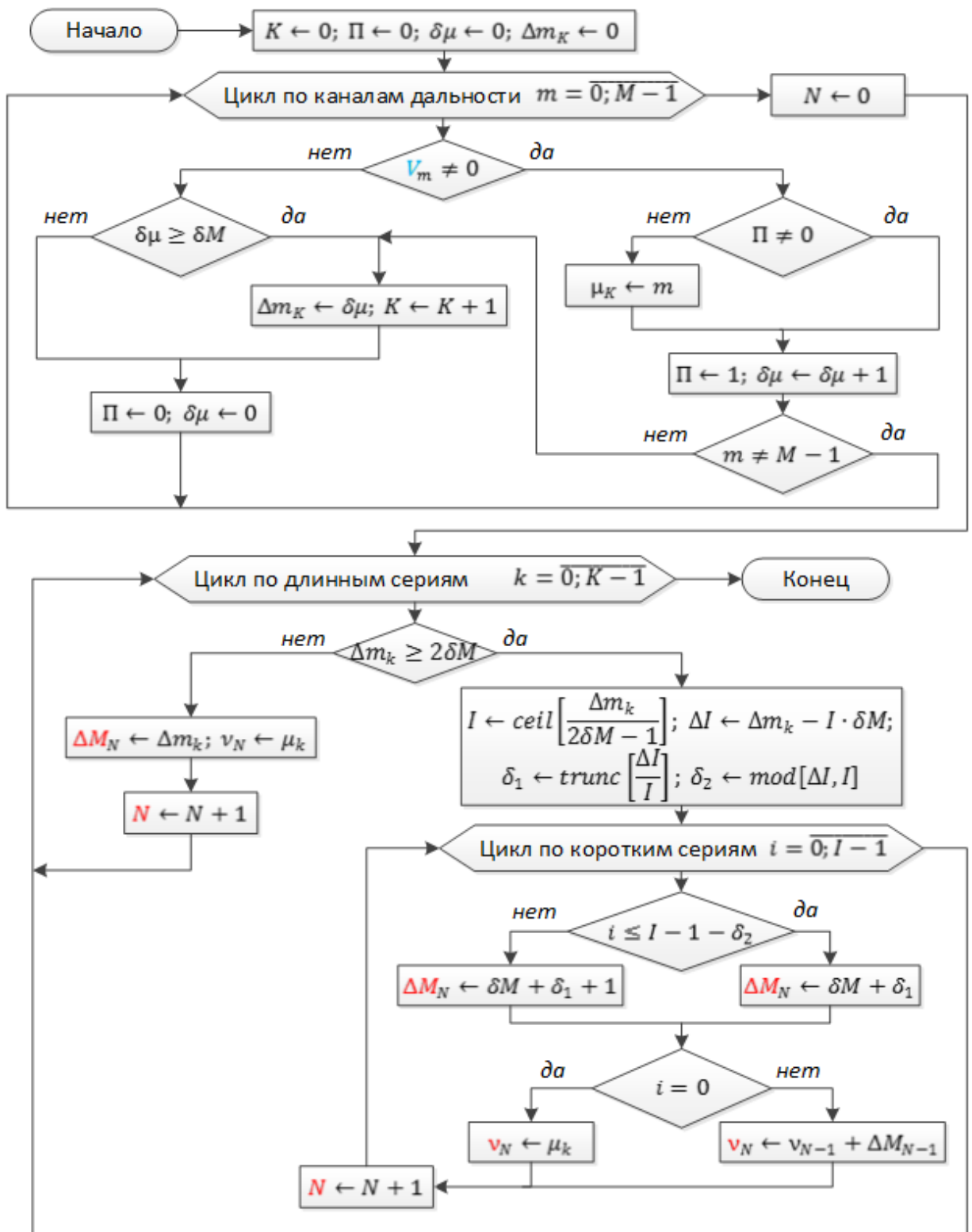


Рисунок 3.3 – Блок-схема алгоритма «Определение количества, начальных элементов и длин серий метеоцелей»



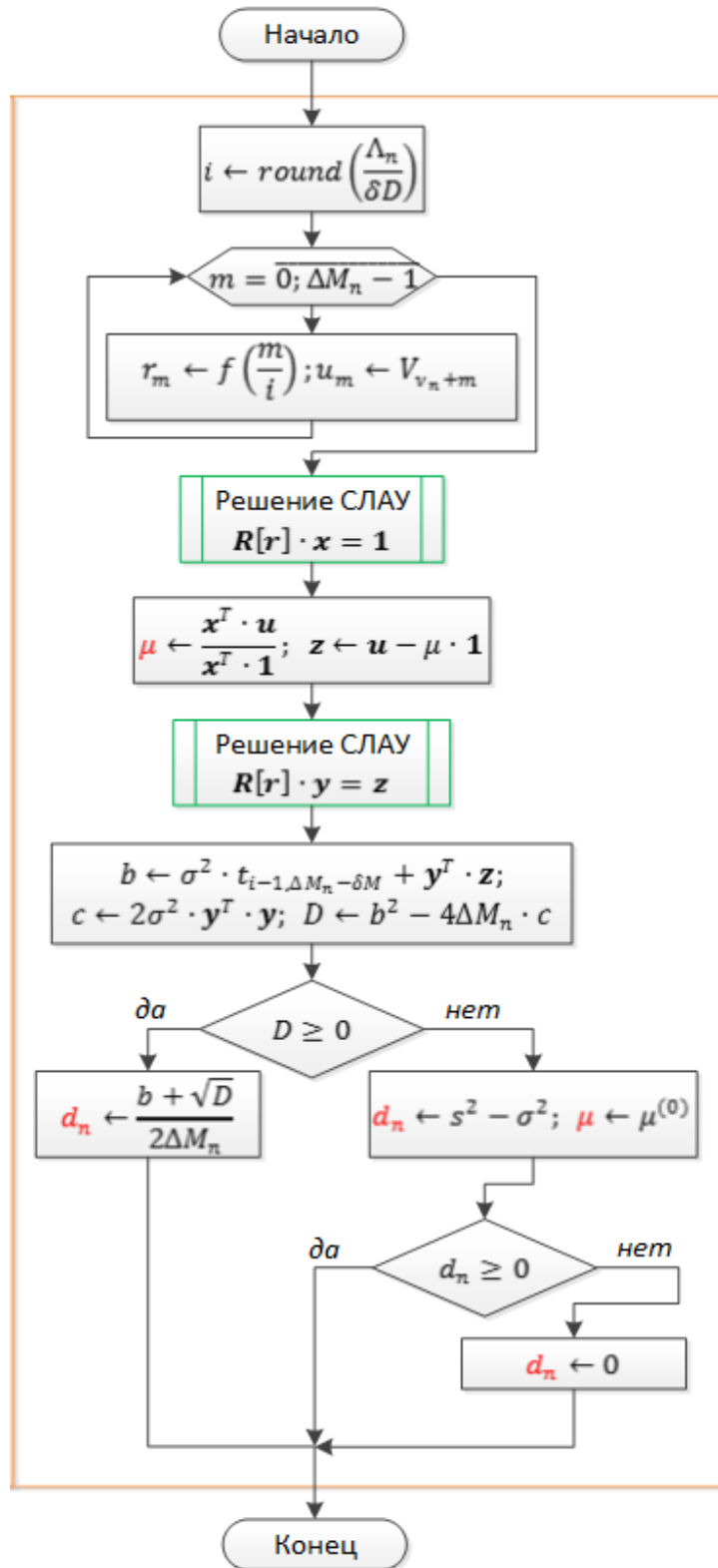


Рисунок 3.4 – Блок-схемы алгоритма «Оценка среднего и дисперсии»

Структура составного блока «Оценка интегрального масштаба» приведена на рисунке 3.5.

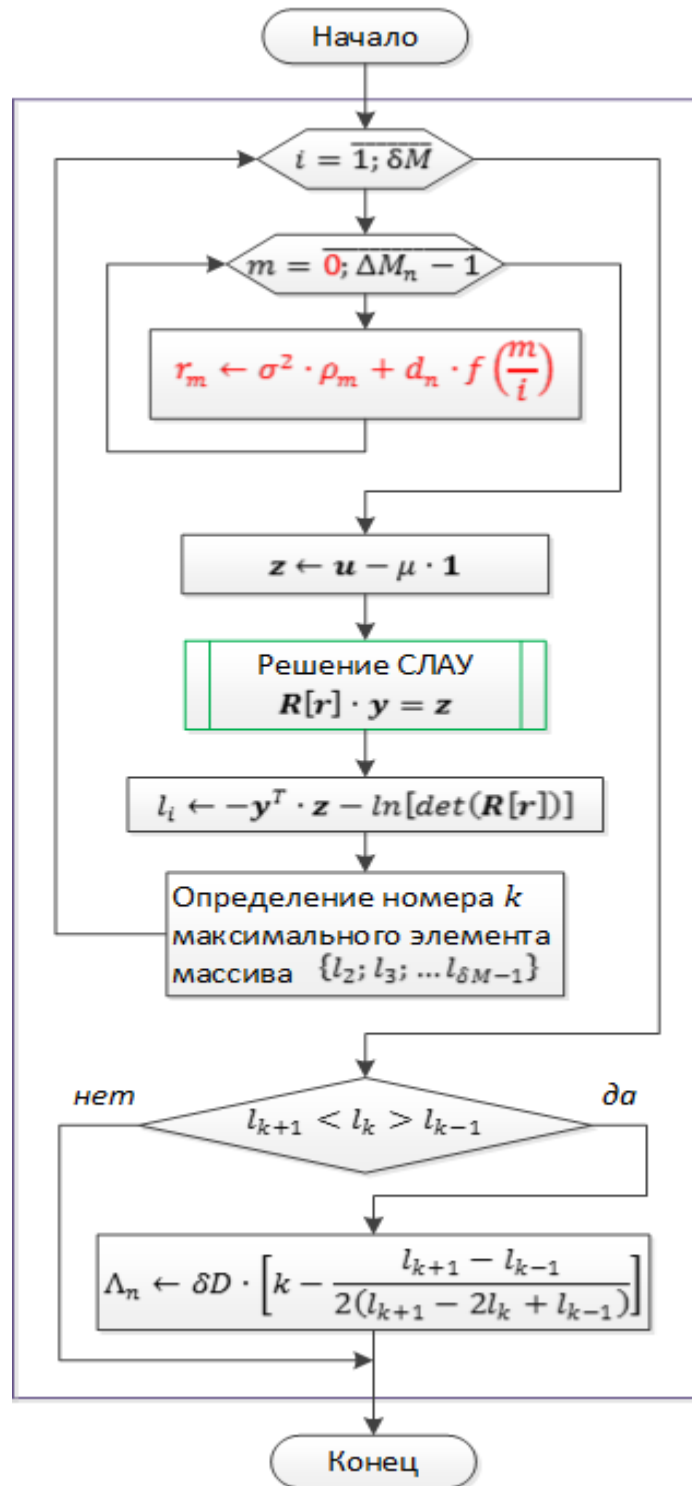


Рисунок 3.5– Блок-схема алгоритма оценки интегрального масштаба

На рисунке 3.6 представлен составной блок решения СЛАУ вида  $R[r] \cdot z = b$ , где  $R[r]$  – невырожденная симметричная теплицева матрица  $(K \times K)$

коэффициентов системы, полностью определяемая ее первым столбцом  $r$ ;  $b$  – вектор правых частей системы.

Кроме вектора решения  $z$ , алгоритм возвращает значение определителя  $\Delta = \det(R)$ , используемого в блоке оценки интегральных масштабов  $L_m$ ;  $m = \overline{0; M-1}$ .

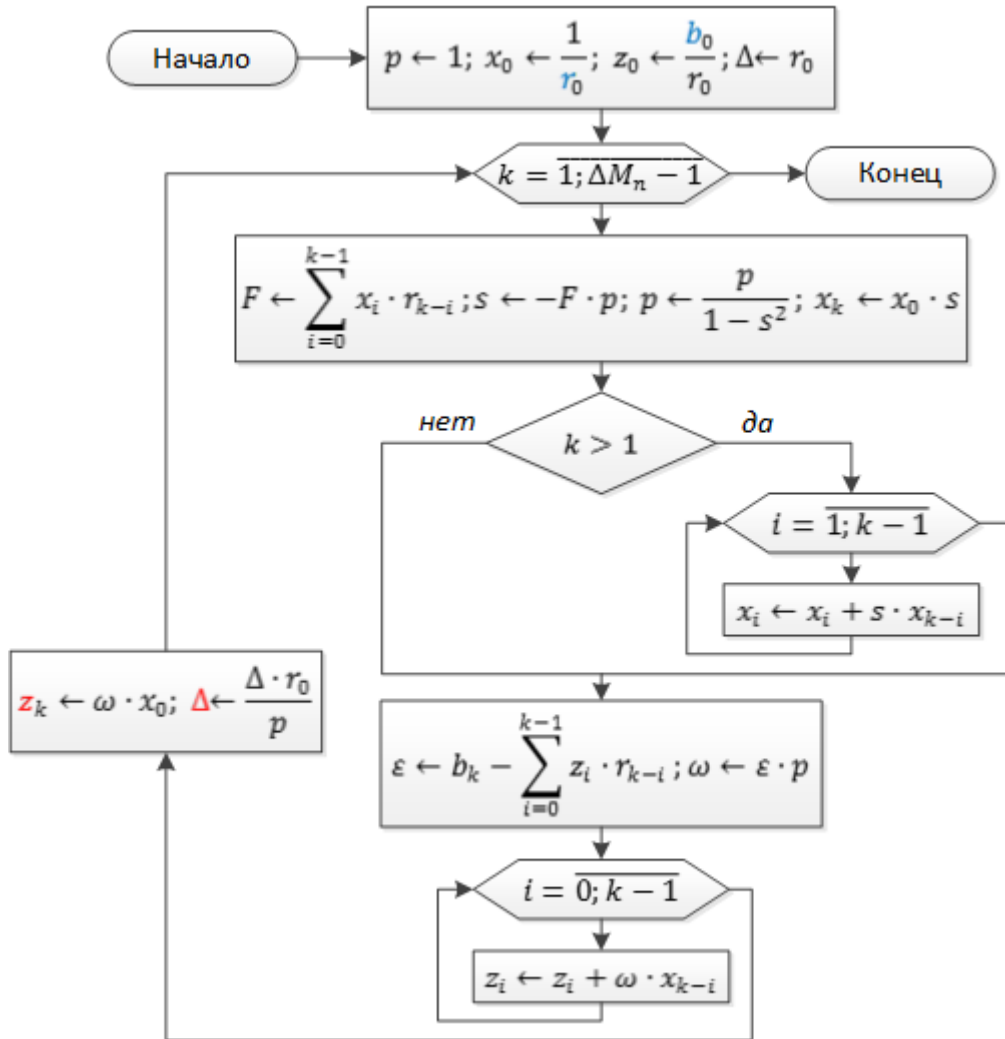


Рисунок 3.6– Блок-схема совмещенного алгоритма решения СЛАУ с невырожденной симметричной треплицевой матрицей коэффициентов и вычисления ее определителя

Таким образом, выходные массивы  $\varepsilon_m$ ;  $m = \overline{0; M-1}$ , 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).

Необходимо учитывать, что при отсутствии полезного сигнала в канале дальности  $\varepsilon_m = 0$ .

Далее осуществим оценку определения EDR.

**Определение диапазона оценки турбулентности по удельной скорости диссипации турбулентной энергии (EDR).** В СПО МРЛК БАЗ расчет оценки турбулентности по EDR  $\varepsilon_{EDR}$  выполняется по итоговой формуле (3.4):

$$\varepsilon_{EDR} = \frac{C_\varepsilon \cdot \sigma_V}{\sqrt[3]{\Lambda}}, \quad (3.4)$$

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

Среднее значение интегрального масштаба  $\Lambda$  для стандартной атмосферы составляет  $\Lambda_{CP} = 760$  м. Расчеты минимального и максимального значений диапазона оценки EDR выполняются для среднего значения интегрального масштаба для стандартной атмосферы.

Для  $\Lambda_{CP}$  минимальное значение  $\varepsilon_{EDR}$  определяется из формулы (3.4) при минимальном значении изменения радиальной скорости, для масштабов до 50 и до 100 км, как меньше или равно 0,5 м/с. Для наихудших условий принимается, что  $\sigma_{VMIN} = 0.5$  м/с.

Подстановкой в формулу (3.4) значений  $\sigma_{VMIN}$  и  $\Lambda_{CP}$  получается формулы для расчета минимального значения диапазона оценки EDR:

$$\varepsilon_{EDR}^{MIN} = \frac{C_\varepsilon \cdot \sigma_{VMIN}}{\sqrt[3]{\Lambda_{CP}}}, \quad (3.5)$$

Вычисление минимального значения диапазона оценки EDR по формуле:

$$\varepsilon_{\text{EDR}}^{\text{MIN}} = \frac{0.86446 \cdot 0.5}{\sqrt[3]{760}} = 0.047 \text{ м}^{2/3}/\text{с},$$

Для  $\Lambda_{\text{CP}}$  максимальное значение  $\varepsilon_{\text{EDR}}$  определяется из формулы (3.4) при максимальном значении изменения радиальной скорости. В ходе работы над диссертацией было определено, что максимальное изменение  $V$  равно: до 50 км - 80,808...80,808 м/с, до 100 км -55,993...55,993 м/с.

При равномерном вероятностном распределении скоростей в указанном диапазоне  $\Delta V$  оценка СКО  $\sigma_{V\text{MAX}}$  из источника [140] соответствует формуле (3.6):

$$\sigma_{V\text{MAX}} = \frac{\Delta V}{\sqrt{12}} = \frac{\Delta V}{3.464}, \quad (3.6)$$

Примечание – указанная  $\sigma_{V\text{MAX}}$  на интервале  $\Lambda_{\text{CP}}$  относится к чрезвычайно редкому значению  $\varepsilon_{\text{EDR}}$ , например, внутри вихря «торнадо» («смерча»), и такие значения указываются для потенциального, теоретически возможного максимального значения  $\varepsilon_{\text{EDR}}$ .

Для наихудших условий подстановкой формулы (3.6) в (3.4) на интервале  $\Lambda_{\text{CP}}$  после преобразований получается формула расчета максимального значения  $\varepsilon_{\text{EDR}}^{\text{MAX}}$ :

$$\varepsilon_{\text{EDR}}^{\text{MAX}} = \frac{C_\varepsilon \cdot \Delta V}{3.464 \cdot \sqrt[3]{\Lambda_{\text{CP}}}}, \quad (3.7)$$

Вычисление максимального значения диапазона оценки EDR:

$$\varepsilon_{\text{EDR}}^{\text{MAX}} = \frac{0.86446 \cdot (55.993 - (-55.993))}{3.464 \cdot \sqrt[3]{760}} = 3.062 \frac{\text{м}^{2/3}}{\text{с}}.$$

Таким образом, в МРЛК БАЗ диапазоны оценки турбулентности по EDR соответствуют следующим значениям: на дальности до 50 км – от не более 0,1 м<sup>2/3</sup>/с до не менее 3 м<sup>2/3</sup>/с; на дальности до 100 км – от не более 0,1 м<sup>2/3</sup>/с до не менее 3 м<sup>2/3</sup>/с. Полученные значения EDR полностью покрывают требуемые диапазоны

покрытия всех градаций турбулентности согласно выдвинутым в работе требованиям (таблица 2.7).

**Расчёт дискретности цифровых данных для оценки турбулентности по удельной скорости диссипации турбулентной энергии (EDR).** В СПО МРЛК БАЗ единицей измерения турбулентности и обоснованного предсказателя повышенного изменения в вертикальном ускорении воздушных судов является удельная скорость диссипации турбулентной энергии (EDR) [40]. Для непосредственной реализации критерия опасности турбулентных пульсаций скорости ветра используется показатель:

$$E = \sqrt[3]{EDR} = C \cdot \frac{\sigma}{\sqrt[3]{L}}, \quad (3.8)$$

где из источника [40]:

$$C = \sqrt{\frac{55}{9\pi \cdot A}} \cdot a^{-5/6} \approx 0.86446,$$

где  $A \approx 1.6$  – эмпирический коэффициент;

$$a = \frac{2\sqrt{\pi}}{\sqrt{3} \cdot \Gamma(2/3) \cdot \Gamma(5/6)} \approx 1.339,$$

где  $a$  – коэффициент, определяющий связь между интегральным масштабом турбулентности  $L$  и граничным значением  $k_0$  инерционной подобласти волновых чисел:

$$1/k_0 = a \cdot L;$$

$\Gamma(2/3)$  и  $\Gamma(5/6)$  – значения гамма-функции Эйлера в соответствующих точках.

СКО  $\sigma$  и интегральный масштаб  $L$  турбулентных пульсаций вектора скорости ветра определяются в результате обработки серии оценок радиальных скоростей:

$$V_i = \frac{s_i^T}{D_i} \cdot V(s_i), \quad i = \overline{0; I-1}, \quad (3.9)$$

в последовательно расположенных отсчетах дальности, согласованных с дальностями  $D_i = |s_i|$ , где  $s_i$  – соответствующий радиус-вектор, характеризующий месторасположение центра разрешаемого импульсного объема;  $V(s_i)$  – полный вектор скорости ветра;  $I$  - длина серии.

Реализованный в СПО МРЛК БАЗ алгоритм определения СКО  $\sigma$  и интегрального масштаба  $L$  представляет собой достаточно сложную комбинацию нелинейных и логических процедур. В расчетах используется только тип данных «double». Следовательно, дискретность цифровых данных определяется только параметром «шаг дискретизации» для EDR в хранилище данных и в данных сообщений. Значение параметра «Шаг дискретизации» для EDR составляет  $0,01 \text{ м}^{2/3}/\text{с}$ . Это значение соответствует требованиям ИКАО для дискретности оценки турбулентности по удельной скорости диссипации турбулентной энергии (EDR) – менее  $0,2 \text{ м}^{2/3}/\text{с}$  на дальности до 50 и 100 км.

**Расчёт ошибки оценки турбулентности по удельной скорости диссипации турбулентной энергии (EDR).** Выше указаны базовые выражения (3.8) и (3.9) для расчета EDR. Из-за сложности алгоритма определения СКО  $\sigma$  и интегрального масштаба  $L$  получить соотношения для анализа характеристик точности оценки (3.8) не представляется практически возможным. Для СПО МРЛК БАЗ применяется метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) [90,121]. Важнейшей частной задачей в рамках указанного метода в данном случае является разработка стохастической модели скорости ветра в (3.9) и представлении ее в виде, удобной для реализации на ЭВМ.

Основой современного вихреразрешающего моделирования динамики атмосферы является пространственная фильтрация полного вектора скорости  $V = [u \ v \ w]^T$  в виде суммы среднего (усредненного по пространству) значения  $\bar{V} = [\bar{u} \ \bar{v} \ \bar{w}]^T$  и случайных пульсаций скорости  $\tilde{V} = [\tilde{u} \ \tilde{v} \ \tilde{w}]^T$ , обусловленных турбулентностью (рисунок 3.7).

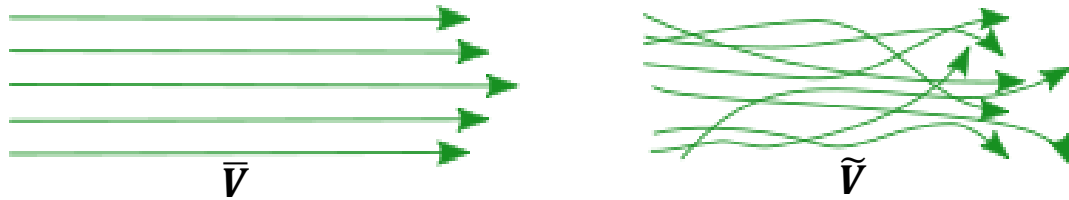


Рисунок 3.7 – Среднее (ламинарное) и случайное (турбулентное) течения.

Для вектора случайных пульсаций скорости  $\tilde{V} = [\tilde{u} \ \tilde{v} \ \tilde{w}]^T$ , обусловленных турбулентностью, ожидаемых в атмосфере на масштабах, сравнимых с разрешаемым радиолокационным объемом, применяется модель изотропного случайного поля.

Математическим моделям изотропной турбулентности посвящено достаточно большое количество монографий, среди которых можно отметить работы прикладного характера [70,86,99]. Однако в указанных источниках используются разные способы нормировки, некоторые результаты даются без выводов, недостаточно разработано моделирование векторных изотропных полей на ЭВМ. Для расчета ошибки оценки EDR в СПО МРЛК БАЗ разработаны указанные ниже математические соотношения для корреляционно-спектральных характеристик изотропного нормального случайного векторного поля скоростей.

**Корреляционная матрица изотропного случайного поля скоростей.** При нормальном распределении статистические характеристики изотропного случайного векторного поля скоростей полностью определяются корреляционной матрицей

$$R(r) \triangleq M\{\tilde{V}(s)\tilde{V}^T(s+r)\} . \quad (3.10)$$

Корреляция вектора скорости в начале координат (точке  $O$ ) со скоростью в точке  $r$  (рисунок 3.8).



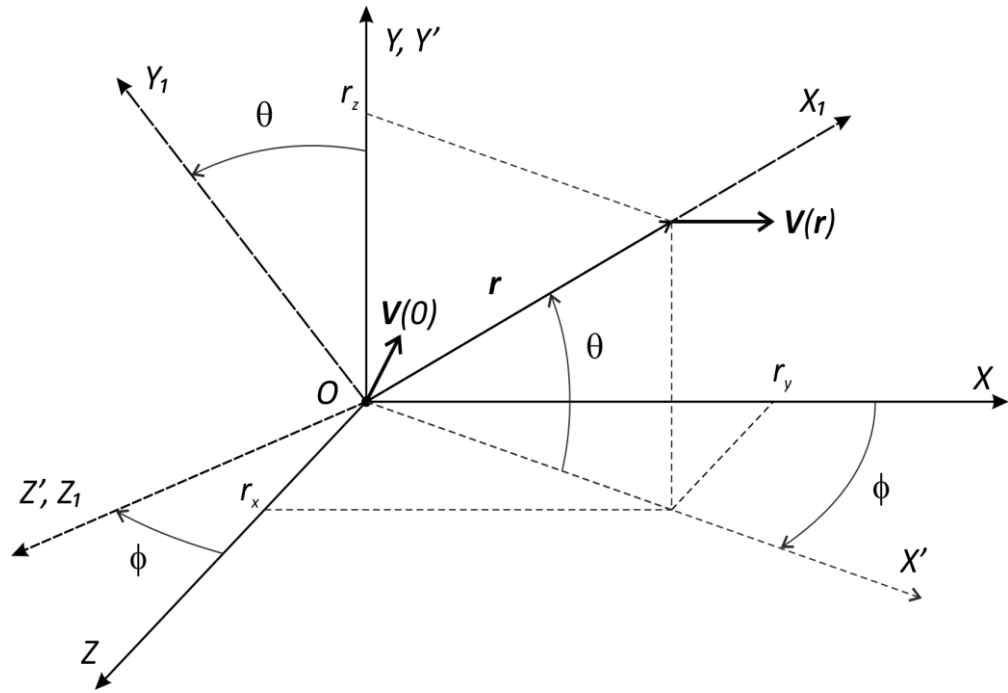


Рисунок 3.8 – Системы координат при рассмотрении корреляции между компонентами турбулентных пульсаций скорости.

Сначала система координат  $OX_1Y_1Z_1$  располагается так, что ось  $OX_1$  проходит через точки  $O$  и  $r$ . Согласно определению изотропии, любое соотношение между величинами (относящимся к определению турбулентности) должно быть постоянно относительно поворота системы координат и отражения от координатных плоскостей. Поэтому корреляции векторов пульсаций скорости  $\tilde{V}_1(O) = [\tilde{u}_1(O) \quad \tilde{v}_1(O) \quad \tilde{w}_1(O)]^T$  и  $\tilde{V}_1(r) = [\tilde{u}_1(r) \quad \tilde{v}_1(r) \quad \tilde{w}_1(r)]^T$ , представленных проекциями на оси системы координат  $OX_1Y_1Z_1$  определяются только двумя корреляциями, а именно: продольной корреляцией скорости  $M\{\tilde{u}_1(O)\tilde{u}_1(r)\}$  и одной из поперечных корреляций скорости  $M\{\tilde{v}_1(O)\tilde{v}_1(r)\}$  или  $M\{\tilde{w}_1(O)\tilde{w}_1(r)\}$  (рисунок 3.9).

Символами  $f$  и  $g$  соответственно для коэффициентов продольной и поперечной корреляции скорости обозначены коэффициенты указанных выше типов корреляции, через которые может быть выражена корреляционная матрица.

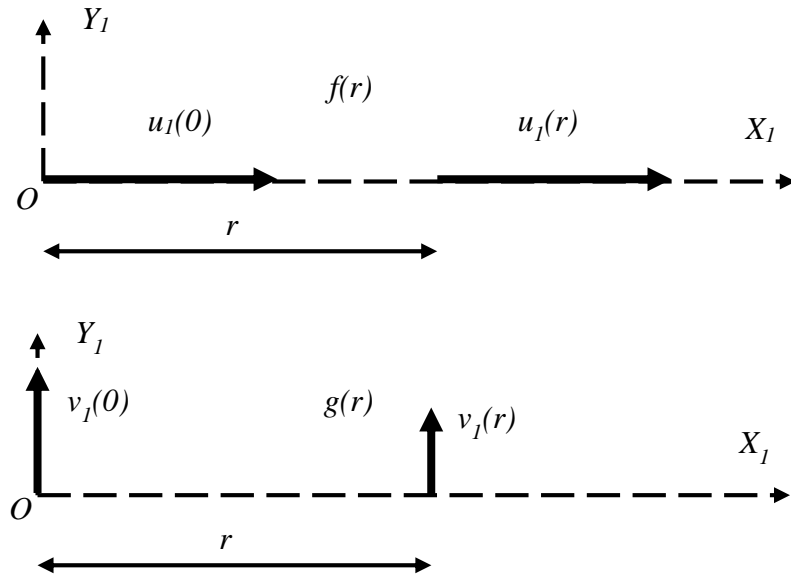


Рисунок 3.9 – Коэффициент продольной корреляции скорости  $f(r)$  и коэффициент поперечной корреляции  $g(r)$

Тогда в частной системе координат  $OX_1Y_1Z_1$  корреляционная матрица

$$R_1(r) = M\{\tilde{V}_1(O) \tilde{V}_1^T(r)\} = \sigma^2 \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & g & 0 \\ 0 & 0 & g \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$

где  $\sigma$  – СКО турбулентных пульсаций скорости.

Важно отметить, что непосредственно для имитации измерений радиальной скорости (3.11) используются только продольные корреляции, однако для получения практически реализуемой модели, пока необходимо учитывать корреляционно-спектральные соотношения (3.10) и (3.11) для полного вектора скорости.

Переход к частной системе координат  $OX_1Y_1Z_1$  от произвольной системы координат  $OXYZ$  может быть осуществлен с помощью поворота вокруг оси  $OY$  на угол  $\phi$  с матрицей направляющих косинусов

$$C' = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix}$$

и последующего поворота вокруг оси  $OZ_1$  на угол  $\theta$  с матрицей направляющих косинусов

$$C_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Тогда в общем случае корреляционная матрица

$$R(r) = C^T R_1(r) C, \quad (3.12)$$

где

$$\begin{aligned} C = C_1 C' &= \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos\phi \cdot \cos\theta & \sin\theta & \sin\phi \cdot \cos\theta \\ -\cos\phi \cdot \sin\theta & \cos\theta & -\sin\phi \cdot \sin\theta \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.13)$$

где  $C$  – ортогональная матрица перехода от произвольной системы координат  $OXYZ$  к частной системе координат  $OX_1Y_1Z_1$ .

Так как справедливо представление

$$R_1(r) = \sigma^2 [g(r)I + [f(r) - g(r)]I_1], \quad (3.14)$$

где  $I$  – единичная матрица;

$$I_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

То с учетом (3.12)–(3.14), получаются следующие математические преобразования

$$R(r) = C^T R_1(r) C = \sigma^2 [g(r) C^T C + [f(r) - g(r)] C^T I_1 C]$$

Вследствие ортогональности матрицы  $C$ , а также равенства

$$C^T I_1 C = \frac{r r^T}{r^2}$$

поскольку первая строка матрицы  $C$  является вектором  $r^T/r$ , где  $r = |r|$ , получается выражение

$$R(r) = \sigma^2 \left[ g(r) I + [f(r) - g(r)] \frac{r r^T}{r^2} \right]. \quad (3.15)$$

Или в скалярном виде

$$R(r) = \sigma^2 \begin{bmatrix} \frac{f(r)-g(r)}{r^2} r_x^2 + g(r) & \frac{f(r)-g(r)}{r^2} r_x r_y & \frac{f(r)-g(r)}{r^2} r_x r_z \\ \frac{f(r)-g(r)}{r^2} r_x r_y & \frac{f(r)-g(r)}{r^2} r_y^2 + g(r) & \frac{f(r)-g(r)}{r^2} r_y r_z \\ \frac{f(r)-g(r)}{r^2} r_x r_z & \frac{f(r)-g(r)}{r^2} r_y r_z & \frac{f(r)-g(r)}{r^2} r_z^2 + g(r) \end{bmatrix}.$$

где  $r_x, r_y, r_z$  – проекции вектора  $r$  на координатные оси (рисунок 3.8).

Дополнительно отметим, что если в пределах области анализа пренебречь зависимостью плотности воздуха от пространственных координат и использовать уравнение неразрывности в виде [40]:

$$\operatorname{div} V(x, y, z) = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

то можно установить справедливость соотношений связи [99]:

$$g(r) = f(r) + \frac{r}{2} \frac{\partial f(r)}{\partial r}; \quad f(r) = \frac{2}{r^2} \int_0^r r g(r) dr \quad (3.16)$$

Поскольку коэффициент корреляции для расчёта турбулентности важно учесть, удобно было бы аналитически описать корреляционную кривую ( $g(r)$  или  $f(r)$ ) подходящей формулой. Теоретические и экспериментальные исследования, показывают, что для коэффициентов корреляции нет какой-либо универсальной формулы, следовательно, в зависимости от условий турбулентного течения должны применяться различные соотношения.

В прикладных задачах оказалось оптимальнее для реализации СПО МРЛК БАЗ строить эмпирические аппроксимации не для упомянутых коэффициентов корреляции, а для спектральной плотности мощности.

**Матрица спектральных плотностей мощности и энергетический спектр.** Преобразование Фурье корреляционной матрицы (3.10) в прямоугольной системе координат  $OXYZ$ :

$$\begin{aligned} W(k) &\triangleq \int_{-\infty}^{\infty} R(r) \exp(-jk^T r) dr = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(r) \exp(-jk^T r) dr_x dr_y dr_z . \end{aligned} \quad (3.17)$$

определяет матрицу спектральных плотностей мощности  $W(k)$ ,

$$k = [k_x \quad k_y \quad k_z]^T$$

где  $k$  – волновой вектор.

Для нахождения интеграла (3.17) сначала выполняется переход к частной системе координат  $OX_2Y_2Z_2$  так, чтобы ось  $OX_2$  проходила волновой вектор  $k$  (рисунок 3.10).

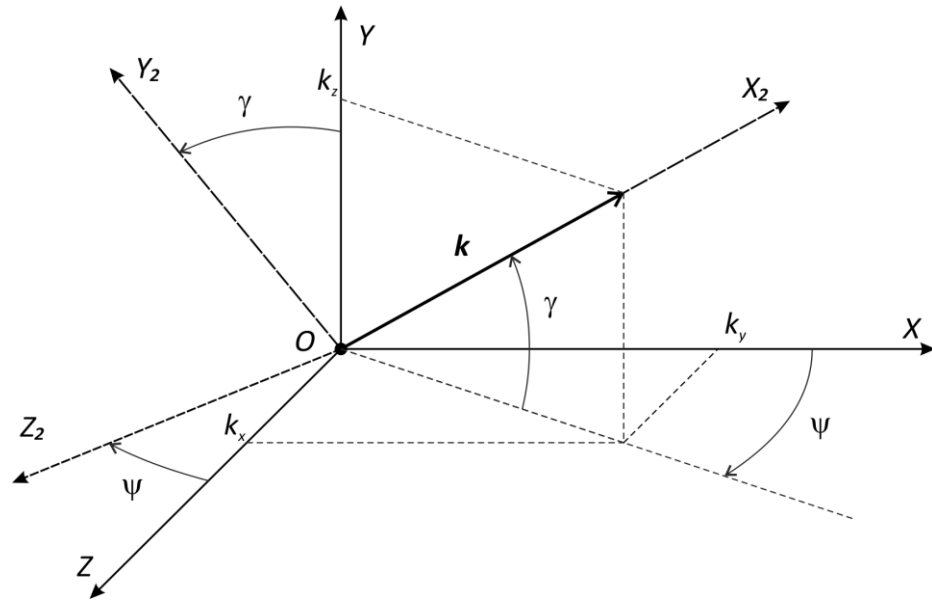


Рисунок 3.10 – Системы координат при рассмотрении матрицы спектральных плотностей мощности для компонент турбулентных пульсаций скорости

В этом случае новая переменная интегрирования

$$r_2 = Gr \quad (3.18)$$

где ортогональная матрица перехода от произвольной системы координат  $OXYZ$  к частной системе координат  $OX_2Y_2Z_2$  по аналогии с (3.13) имеет вид

$$G = \begin{bmatrix} \cos\psi \cdot \cos\gamma & \sin\gamma & \sin\psi \cdot \cos\gamma \\ -\cos\psi \cdot \sin\gamma & \cos\gamma & -\sin\psi \cdot \sin\gamma \\ -\sin\psi & 0 & \cos\psi \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Скалярное произведение в показателе экспоненты в выражении (3.17) получается из следующих преобразований

$$k^T r = k^T G^T r_2 = (Gk)^T r_2 = [k \quad 0 \quad 0] r_2 = k(r_2)_x, \quad (3.20)$$

где  $k = |k|$  – волновое число;  $(r_2)_x$  – проекция вектора  $r_2$  на ось  $OX_2$ .

Подынтегральная же матрица с учетом представления (3.15) записывается в виде

$$R(r) = R(G^T r_2) = \sigma^2 G^T \left[ g(r)I + [f(r) - g(r)] \frac{r_2 r_2^T}{r^2} \right] G \quad (3.21)$$

Таким образом, при замене переменных (3.18) матрица спектральных плотностей мощности  $W(k)$  с учетом равенств (3.21) приобретает вид

$$W(k) = \sigma^2 G^T I \left[ \int_{-\infty}^{\infty} g(r) e^{-jk(r_2)_x} dr_2 + \right. \\ \left. + \int_{-\infty}^{\infty} [f(r) - g(r)] \frac{r_2 r_2^T}{r^2} e^{-jk(r_2)_x} dr_2 \right] G . \quad (3.22)$$

Теперь в системе  $OX_2Y_2Z_2$  выполняется переход от прямоугольных к сферическим координатам с помощью соотношений (рисунок 3.11):

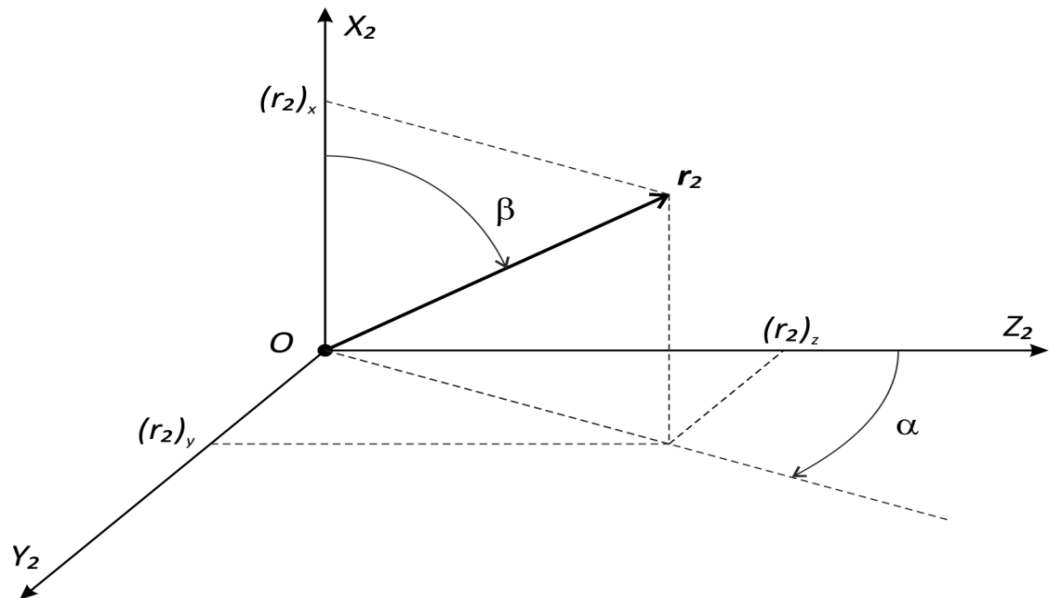


Рисунок 3.11 – Системы координат при рассмотрении матрицы спектральных плотностей мощности для компонент турбулентных пульсаций скорости.

$$(r_2)_x = r \cos \beta ; (r_2)_y = r \sin \beta \sin \alpha ; (r_2)_z = r \sin \beta \cos \alpha . \quad (3.23)$$

При этом якобиан преобразования:

$$J = \frac{\partial((r_2)_x, (r_2)_y, (r_2)_z)}{\partial(r, \alpha, \beta)} = r^2 \sin \beta , \quad (3.24)$$

и выражение (3.22) записывается как

$$\begin{aligned} W(k) = \sigma^2 G^T & \left[ I \int_0^\infty \int_0^\pi \int_0^{2\pi} g(r) e^{-jkr \cos \beta} r^2 \sin \beta d\alpha d\beta dr + \right. \\ & \left. + \int_0^\infty \int_0^\pi \int_0^{2\pi} [f(r) - g(r)] \frac{r_2 r_2^T}{r^2} e^{-jkr \cos \beta} r^2 \sin \beta d\alpha d\beta dr \right] G . \end{aligned} \quad (3.25)$$

С учетом равенств

$$\int_0^{2\pi} d\alpha = 2\pi ; \int_0^\pi e^{-jkr \cos \beta} \sin \beta d\beta = 2 \frac{\sin kr}{kr} ,$$

скалярный множитель при первом слагаемом в квадратных скобках выражения (3.25) с учетом представления (3.22):

$$\begin{aligned} \sigma^2 \int_0^\infty \int_0^\pi \int_0^{2\pi} g(r) e^{-jkr \cos \beta} r^2 \sin \beta d\alpha d\beta dr = \\ = 4\pi \sigma^2 \int_0^\infty r^2 \frac{\sin kr}{kr} g(r) dr \end{aligned} \quad (3.26)$$

является преобразованием Фурье функции корреляций  $\sigma^2 g(r)$  поперечных турбулентных пульсаций скорости и определяется как поперечная спектральная плотность мощности:



$$W_{\perp}(k) \triangleq 4\pi\sigma^2 \int_0^{\infty} r^2 \frac{\sin kr}{kr} g(r) dr \quad (3.27)$$

Аналогично для корреляционной функции  $\sigma^2 f(r)$  введем продольную спектральную плотность мощности

$$W_{\parallel}(k) \triangleq 4\pi\sigma^2 \int_0^{\infty} r^2 \frac{\sin kr}{kr} f(r) dr \quad (3.28)$$

Для выражения (3.25) с учетом (3.23):

$$\frac{r_2 r_2^T}{r^2} = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & \cos \beta \sin \beta \sin \alpha & \cos \beta \sin \beta \cos \alpha \\ \cos \beta \sin \beta \sin \alpha & \sin^2 \beta \sin^2 \alpha & \sin^2 \beta \sin \alpha \cos \alpha \\ \cos \beta \sin \beta \cos \alpha & \sin^2 \beta \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \beta \cos^2 \alpha \end{bmatrix}$$

При интегрировании по углу  $\alpha$  второго слагаемого в квадратных скобках выражения (3.25) заметим, что

$$\int_0^{2\pi} \sin \alpha d\alpha = \int_0^{2\pi} \cos \alpha d\alpha = \int_0^{2\pi} \sin \alpha \cos \alpha d\alpha = 0 ;$$

$$\int_0^{2\pi} \sin^2 \alpha d\alpha = \int_0^{2\pi} \cos^2 \alpha d\alpha = \pi .$$

Тогда

$$\begin{aligned} & \sigma^2 \int_0^{\infty} \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} [f(r) - g(r)] \frac{r_2 r_2^T}{r^2} e^{-jkr \cos \beta} r^2 \sin \beta d\alpha d\beta dr = \\ & = 2\pi\sigma^2 \int_0^{\infty} \int_0^{\pi} [f(r) - g(r)] \text{diag} \begin{bmatrix} \cos^2 \beta \\ \frac{\sin^2 \beta}{2} \\ \frac{\sin^2 \beta}{2} \end{bmatrix} e^{-jkr \cos \beta} r^2 \sin \beta d\beta dr , \end{aligned}$$

где  $diag \begin{bmatrix} \cos^2 \beta \\ \sin^2 \beta \\ \sin^2 \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & 0 & 0 \\ 0 & \sin^2 \beta & 0 \\ 0 & 0 & \sin^2 \beta \end{bmatrix}$  – диагональная матрица.

При интегрировании по углу  $\beta$  получаем

$$\begin{aligned} 2\pi\sigma^2 \int_0^\infty \int_0^\pi [f(r) - g(r)] diag \begin{bmatrix} \cos^2 \beta \\ \frac{\sin^2 \beta}{2} \\ \frac{\sin^2 \beta}{2} \end{bmatrix} e^{-jkr \cos \beta} r^2 \sin \beta d\beta dr = \\ = I_1 [W_{\parallel}(k) - W_{\perp}(k)] + \\ + 4\pi\sigma^2 diag \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \int_0^\infty \frac{2[f(r) - g(r)]}{k^2} \left( \cos kr - \frac{\sin kr}{kr} \right) dr \end{aligned}$$

Из соотношения (3.16) следует, что

$$\frac{f(r) - g(r)}{r} = -\frac{1}{2} \frac{\partial f(r)}{\partial r}$$

и далее, интегрируя по частям, определяется

$$\int_0^\infty \frac{2[f(r) - g(r)]}{k^2} \left( \cos kr - \frac{\sin kr}{kr} \right) dr = -W_{\parallel}(k)$$

Следовательно,

$$\begin{aligned}
& I_1[W_{\parallel}(k) - W_{\perp}(k)] + \\
& + 4\pi\sigma^2 \text{diag} \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{2} \\ 1 \\ -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \int_0^{\infty} \frac{2[f(r) - g(r)]}{k^2} \left( \cos kr - \frac{\sin kr}{kr} \right) dr = \\
& = \text{diag} \begin{bmatrix} -W_{\perp}(k) \\ W_{\parallel}(k) \\ \frac{W_{\parallel}(k)}{2} \\ \frac{W_{\parallel}(k)}{2} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Подставляя полученный результат в (3.25) с учетом выражений (3.26)-(3.28), получаем компактное выражение для матрицы спектральных плотностей мощности в произвольной прямоугольной системе координат  $OXYZ$ :

$$W(k) = \frac{2W_{\perp}(k) + W_{\parallel}(k)}{2} G^T \text{diag} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} G \quad (3.29)$$

По количеству проекций вектора скорости (одной продольной и двух поперечных) далее обозначается

$$\begin{aligned}
W_{\Sigma}(k) & \triangleq 2W_{\perp}(k) + W_{\parallel}(k) = \\
& = 4\pi\sigma^2 \int_0^{\infty} r^2 \frac{\sin kr}{kr} [2g(r) + f(r)] dr \quad (3.30)
\end{aligned}$$

где  $W_{\Sigma}(k)$  – суммарная спектральная плотность мощности.

Далее по аналогии с (3.14) и (3.15) из квадратичной формы

$$G^T \text{diag} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} G = G^T (I - I_1) G = I - \frac{kk^T}{k^2},$$

Получается соотношение для матрицы спектральных плотностей мощности, являющееся удобным для получения интегрального представления корреляционной матрицы (3.10) и построения спектральной модели локально изотропной турбулентности.

$$W(k) = \frac{W_{\Sigma}(k)}{2} \left( I - \frac{kk^T}{k^2} \right) \quad (3.31)$$

**Интегральное представление корреляционной матрицы турбулентных пульсаций скорости.** В общем случае корреляционная матрица (3.10) может быть представлена с помощью обратного преобразования Фурье (по отношению к (3.17):

$$\begin{aligned} R(r) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} W(k) \exp(jk^T r) dk = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(k) \exp(jk^T r) dk_x dk_y dk_z \end{aligned} \quad (3.32)$$

Для упрощения интеграла (3.32) сначала выполняется переход к частной системе координат  $OX_1Y_1Z_1$  так, чтобы ось  $OX_1$  проходила вектор  $r$  (рисунок 3.8). В этом случае новая переменная интегрирования

$$k_1 = Ck \quad , \quad (3.33)$$

где ортогональная матрица  $C$  перехода от произвольной системы координат  $OXYZ$  к частной системе координат  $OX_1Y_1Z_1$  определяется выражением (3.13).

Скалярное произведение в показателе экспоненты в выражениях (3.17) и (3.32)

$$k^T r = (C^T k_1)^T r = k_1^T C r = k_1^T \begin{bmatrix} r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = (k_1)_x r, \quad (3.34)$$

где  $(k_1)_x$  – проекция вектора  $k_1$  на ось  $OX_1$ .

Подынтегральная матрица с учетом представления (3.31) записывается в виде

$$W(k) = W(C^T k_1) = C^T \frac{W_\Sigma(k)}{2} \left( I - \frac{k_1 k_1^T}{k^2} \right) C. \quad (3.35)$$

Таким образом, при замене переменных (3.33) обратное преобразование Фурье (3.32) с учетом равенств (3.34) и (3.35) приобретает вид

$$R(r) = \frac{C^T}{2(2\pi)^3} \left[ I \int_{-\infty}^{\infty} W_\Sigma(k) e^{j(k_1)_x r} dk_1 - \int_{-\infty}^{\infty} W_\Sigma(k) \frac{k_1 k_1^T}{k^2} e^{j(k_1)_x r} dk_1 \right] C \quad (3.36)$$

Теперь в системе  $OX_1 Y_1 Z_1$  выполняется переход от прямоугольных к сферическим координатам с помощью соотношений (рисунок 3.12):

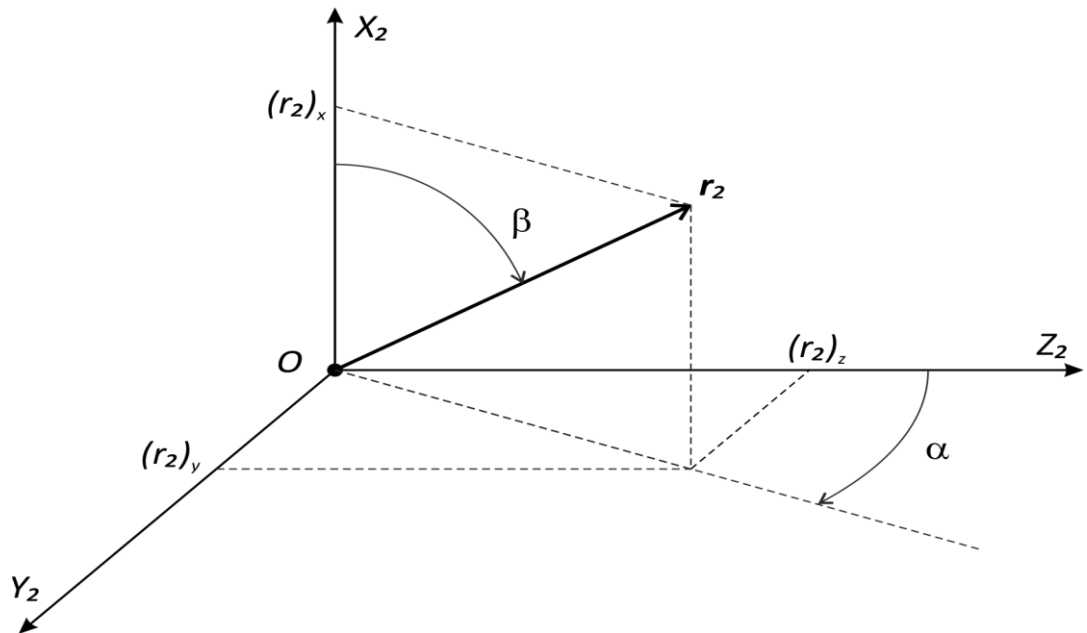


Рисунок 3.12 – Прямоугольная и сферическая системы координат при рассмотрении интегрального представления корреляционной матрицы для турбулентных пульсаций скорости

$$(k_1)_x = k \cos \chi; (k_1)_y = k \sin \chi \sin \varepsilon; (k_1)_z = k \sin \chi \cos \varepsilon. \quad (3.37)$$

Якобиан преобразования (3.37):

$$J = \frac{\partial((k_1)_x, (k_1)_y, (k_1)_z)}{\partial(k, \varepsilon, \chi)} = k^2 \sin \chi$$

и выражение (3.36) записывается как

$$R(r) = \frac{C^T}{2(2\pi)^3} \left[ I \int_0^\infty \int_0^\pi \int_0^{2\pi} W_\Sigma(k) e^{jkr \cos \beta} k^2 \sin \chi d\varepsilon d\chi dk - \right. \\ \left. - \int_0^\infty \int_0^\pi \int_0^{2\pi} W_\Sigma(k) \frac{k_1 k_1^T}{k^2} e^{jkr \cos \beta} k^2 \sin \chi d\varepsilon d\chi dk \right] C \quad (3.38)$$

При интегрировании (3.38) по углам  $\varepsilon$  и  $\chi$  получается интегральное представление корреляционной матрицы для турбулентных пульсаций скорости с использованием суммарной спектральной плотности мощности:

$$R(r) = C^T \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\infty k^2 W_\Sigma(k) \text{diag} \left[ \begin{array}{c} \frac{\sin kr}{k^3 r^3} - \frac{\cos kr}{k^2 r^2} \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\sin kr}{kr} - \frac{\sin kr}{k^3 r^3} + \frac{\cos kr}{k^2 r^2} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\sin kr}{kr} - \frac{\sin kr}{k^3 r^3} + \frac{\cos kr}{k^2 r^2} \right) \end{array} \right] dk C. \quad (3.39)$$

Сравнивая полученный интеграл с выражением (3.12), с учетом (3.13) определяется равенство

$$\sigma^2 \text{diag} \begin{bmatrix} f \\ g \\ g \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\infty k^2 W_\Sigma(k) \text{diag} \begin{bmatrix} \frac{\sin kr}{k^3 r^3} - \frac{\cos kr}{k^2 r^2} \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\sin kr}{kr} - \frac{\sin kr}{k^3 r^3} + \frac{\cos kr}{k^2 r^2} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\sin kr}{kr} - \frac{\sin kr}{k^3 r^3} + \frac{\cos kr}{k^2 r^2} \right) \end{bmatrix} dk, \quad (3.40)$$

из которого устанавливаются ряд полезных следствий.

1) Суммируя диагональные элементы матриц в левой и правой части (3.40), получаем формулу обращения преобразования (3.30):

$$\sigma^2 [2g(r) + f(r)] = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\infty k^2 \frac{\sin kr}{kr} W_\Sigma(k) dk \quad (3.41)$$

2) Полагая в (3.41)  $r = 0$ , устанавливаем условие нормировки

$$\frac{1}{2\pi^2} \int_0^\infty k^2 W_\Sigma(k) dk = 3\sigma^2 \quad (3.42)$$

для спектральной функции, которая далее именуется энергетическим спектром волновых чисел.

$$E_\Sigma(k) = k^2 W_\Sigma(k) \quad (3.43)$$

Именно для функции (3.43) получается установить достаточно простые и надежные эмпирические аппроксимации [40,99] во всем спектре волновых чисел  $k \in (0; \infty)$ . Так, рекомендуемым и наиболее употребимым вариантом является аппроксимация Кармана, которая с учетом нормировки (3.42) имеет вид

$$E_{\Sigma}(k) = 4\pi \frac{55L}{9} \sigma^2 \frac{(a \cdot L \cdot k)^4}{[1 + (a \cdot L \cdot k)^2]^{17/6}} \quad (3.44)$$

3) Обращая аналогично (3.41) соотношения (3.27) и (3.28), с учетом представления (3.39) и (3.40) получаются интегральные уравнения

$$\begin{aligned} \sigma^2 f(r) &= \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{\infty} k^2 \left( \frac{\sin kr}{k^3 r^3} - \frac{\cos kr}{k^2 r^2} \right) W_{\Sigma}(k) dk = \\ &= \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{\infty} \left( \frac{\sin kr}{k^3 r^3} - \frac{\cos kr}{k^2 r^2} \right) E_{\Sigma}(k) dk, \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$\begin{aligned} \sigma^2 g(r) &= \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{\infty} k^2 \left( \frac{\sin kr}{kr} - \frac{\sin kr}{k^3 r^3} + \frac{\cos kr}{k^2 r^2} \right) W_{\Sigma}(k) dk = \\ &= \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{\infty} \left( \frac{\sin kr}{kr} - \frac{\sin kr}{k^3 r^3} + \frac{\cos kr}{k^2 r^2} \right) E_{\Sigma}(k) dk, \end{aligned} \quad (3.46)$$

которые позволяют перейти к непосредственному построению имитационной модели измерений радиальной скорости (3.11).

Так как радиальные скорости  $V_i; i = \overline{0; I-1}$ , являются продольными проекциями вектора скорости на направление главного луча диаграммы направленности антенны, то в компактном виде получены выражения для соответствующих коэффициентов корреляции. Элементы корреляционной матрицы определяются в виде

$$F_{i,j} \triangleq M\{(V_i - M\{V_i\})(V_j - M\{V_j\})\} = M\{\tilde{V}_i \tilde{V}_j\}; i, j = \overline{0; I-1},$$

где символом  $\tilde{V}_i = V_i - M\{V_i\}$  обозначены коррелированные составляющие радиальных проекций. Для рассматриваемой модели изотропного нормального



случайного векторного поля скоростей, при равномерном расположении каналов дальности в серии измерений (3.11), корреляционная матрица  $F$  для турбулентных пульсаций скорости ветра является теплицевой:

$$F_{i,j} = \sigma^2 f(|i - j| \cdot \delta D); \quad i, j = \overline{0; I - 1}. \quad (3.47)$$

где  $\delta D$  – дискретность между соседними отсчетами по дальности.

С учетом полученных соотношений (3.44), (3.45) и (3.47), корреляционная матрица  $F$  полностью определяется своим начальным столбцом, элементы которого теперь могут быть представлены в замкнутом виде:

$$F_{i,j} = F_{|i-j|,0} = \frac{110L \cdot \sigma^2}{\pi} \int_0^\infty \left( \frac{\sin kr}{k^3 r^3} - \frac{\cos kr}{k^2 r^2} \right) \frac{(a \cdot L \cdot k)^4}{[1 + (a \cdot L \cdot k)^2]^{17/6}} dk ;$$

$$r = |i - j| \cdot \delta D ; \quad i, j = \overline{0; I - 1} . \quad (3.48)$$

Таким образом, для моделирования (получения выборочных значений на ЭВМ) турбулентной составляющей массива измерений радиальных скоростей применяется следующая схема

$$\tilde{V} = \begin{bmatrix} \tilde{V}_0 \\ \tilde{V}_1 \\ \vdots \\ \tilde{V}_{I-1} \end{bmatrix} = \Gamma \cdot N = \sigma \cdot \hat{F} \cdot N ; \quad (3.49)$$

$$\Gamma \cdot \Gamma^T = F ,$$

где  $N = [N_0 \quad N_1 \quad \dots \quad N_{I-1}]$  –  $I$ -мерный случайный вектор независимых стандартных нормальных случайных величин с нулевыми матожиданиями и единичными дисперсиями, который получается при обращении к датчику нормальных случайных чисел на ЭВМ;  $\hat{F}$  –  $I$ -мерный вектор после преобразования Холецкого нормированной корреляционной матрицы  $F$ , нормировка выполняется для аргумента функции и для значений относительно СКО EDR.

Действительно, для (3.49) получаем:

$$\begin{aligned} M\{\tilde{V}\tilde{V}^T\} &= M\{(\Gamma N)(\Gamma N)^T\} = \\ &= M\{\Gamma NN^T \Gamma^T\} = \Gamma M\{NN^T\} \Gamma^T = \Gamma \Gamma^T = F, \end{aligned}$$

то есть, воспроизводятся выборочные значения радиальной скорости с заданными корреляционными характеристиками. Отметим, что в качестве матрицы  $\Gamma$  удобнее всего использовать треугольное разложение корреляционной матрицы  $F$ , поскольку при этом можно использовать встроенные вычислительные процедуры.

Для непосредственного моделирования на ЭВМ выборочных значений турбулентных пульсаций радиальных скоростей по выражению (3.49) используются нормированные коэффициенты продольной корреляции скорости  $f(y)$  в табличном виде рассчитанные на коммерческом программном обеспечении Mathcad из функции в выражении (3.48). Нормировка аргумента функции выполняется к дискретности отсчетов по дальности  $\delta D$ . Моделирование выборочных значений турбулентных пульсаций радиальных скоростей по выражению (3.49) применяется для испытаний оценки ошибки EDR методом «Монте-Карло».

**Методика определения ошибки оценки турбулентности EDR методом статистических испытаний «Монте-Карло».** Определение характеристик точности оценки параметров турбулентности EDR методом статистических испытаний «Монте-Карло» реализовано на ЭВМ в приложении Python в виде следующих вычислительных блоков:

1) определяются заданные значения удельной скорости диссипации турбулентной энергии EDR и из выражения (3.8) определяется модельное значение СКО турбулентных пульсаций:

$$\sigma = \frac{E \cdot \sqrt[3]{L}}{c} = \frac{\sqrt[3]{L \cdot EDR}}{c}, \quad (3.50)$$

2) задаются СКО ошибок измерений радиальных скоростей  $\sigma_V$ ;

3) выполняется цикл по независимым испытаниям с номерами  $j = \overline{0; J - 1}$ ,

где  $J$  – общее количество испытаний, в каждом из которых:

а) согласно соотношениям (3.48)–(3.50), с аддитивным добавлением ошибок измерений радиальных скоростей в отсчетах дальности с нулевым математическим ожиданием и СКО  $\sigma_V$  моделируются измерения радиальных скоростей для выражения (3.11):

$$V = \tilde{V} + N_{\sigma_V}, \quad i = \overline{0; I - 1}, \quad (3.51)$$

где  $N_{\sigma_V}$  –  $I$ -мерный случайный вектор независимых стандартных нормальных случайных величин с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями  $\sigma_V$ , который получается при обращении к датчику нормальных случайных чисел на ЭВМ;

б) в программной реализации приложения для расчетов реализуется расчет оценки EDR эквивалентным образом как в СПО МРЛК БАЗ;

в) для актуального испытания с номером  $j$ , с помощью реализованного программного обеспечения эквивалентного СПО МРЛК БАЗ п. 3(б), формируются измерения СКО  $\sigma_j^*$ , интегрального масштаба  $L_j^*$  и, соответственно, показателя  $E_j^*$  опасности турбулентных пульсаций скорости ветра (3.10);

г) фиксируется разность между требуемым значением EDR в п. (1) и полученным в результате испытания по п. 3 (в):

$$\Delta_j^{edr} = EDR - E_j^*, \quad j = \overline{0; J - 1}, \quad (3.52)$$

д) по результатам всех  $J$  испытаний определяется СКО EDR  $\sigma_{EDR}$ :

$$\sigma_{EDR} = stdev(\Delta^{edr}), \quad (3.53)$$

где  $stdev(*)$  – функция расчета стандартного отклонения нормального распределения.

е) значения СКО EDR сравниваются с требованиями ИКАО по дискретности оценки EDR;

ж) проверяется способность МРЛК БАЗ обеспечить определение уровней градации опасной турбулентности EDR по значению относительной ошибки не более 20% от границ уровней градации. Уровни градации турбулентности EDR из источника [54] указаны в таблице 3.2. Из источника [54] турбулентность считается опасной и подлежащей для донесений с уровня «умеренная».

Относительная ошибка оценки турбулентности EDR  $\delta_{EDR}\%$  рассчитывается по выражению:

$$\delta_{EDR}\% = \sigma_{EDR} \cdot 100\% / EDR , \quad (3.54)$$

Исходные данные для проведения расчетных испытаний методом «Монте Карло»:

1) непосредственный расчет и проведение испытаний выполняются с использованием приложения Python и исходного кода расчетов;

2) значение СКО ошибок измерений радиальных скоростей  $\sigma_V = 0,432$  м/с

Примечание. Для масштаба 50 км значение  $\sigma_V$  составляет 0,434 м/с и отличается для масштаба 100 км на 0,002 м/с, тогда как дискретность дальности для масштаба 100 км в два раза больше. Поэтому принимается как «наихудший случай» значение  $\sigma_V = 0,432$  м/с для всех испытаний. Результат распространяется и на масштаб до 50 км.

3) для дальности до 50 км значение дискретности данных по дальности составляет 101,25 м;

4) для дальности до 100 км значение дискретности данных по дальности составляет 202,5 м.

**Результаты испытаний.** Экспериментальные данные представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты расчетов СКО оценки EDR по выражению (3.53) и относительной ошибки оценки EDR по выражению (3.54).

Требуемое значение EDR, м <sup>2/3</sup> /с	СКО EDR $\sigma_{EDR}$ для дальности до 50 км и дискретности 101.25 м, м <sup>2/3</sup> /с	Относительная ошибка EDR $\delta_{EDR}\%$ для дальности до 50 км и дискретности 101.25 м, %	СКО EDR $\sigma_{EDR}$ для дальности до 100 км и дискретности 202.5 м, м <sup>2/3</sup> /с	Относительная ошибка EDR $\delta_{EDR}\%$ для дальности до 100 км и дискретности 202.5 м, %
0,1	0,0304	30,4	0,0242	24,2
0,2	0,0589	29,5	0,0499	25,0
0,3	0,0588	19,6	0,06	20,0
0,4	0,0714	17,9	0,0775	19,4
0,5	0,0873	17,5	0,0939	18,8
0,6	0,1038	17,3	0,1119	18,7
0,7	0,1202	17,2	0,1313	18,8
0,8	0,1360	17,0	0,1486	18,6
0,9	0,1552	17,2	0,1672	18,6
1	0,1707	17,1	0,1861	18,6
1,1	0,1886	17,1	0,2083	18,9

Результаты анализа таблицы 3.2:

- На дальности до 50 км (при дискретности данных 101,25 м) СКО EDR меньше 0,05 м<sup>2/3</sup>/с при значении требуемой EDR меньше 0,2 м<sup>2/3</sup>/с.
- На дальности до 100 км (при дискретности данных 202,5 м) СКО EDR меньше 0,1 м<sup>2/3</sup>/с при значении требуемой EDR меньше 0,2 м<sup>2/3</sup>/с.
- При значении турбулентности EDR больше 0,4 м<sup>2/3</sup>/с относительная ошибка оценки EDR меньше 20%, следовательно, в соответствии с таблицей 3.2 МРЛК БАЗ обеспечивает определение уровней градации опасной турбулентности по удельной скорости диссипации турбулентной энергии (EDR) выше уровня «умеренная».

Оценки турбулентности по удельной скорости диссипации турбулентной энергии (EDR) в МРЛК БАЗ рассчитываются в условиях соответствия требованиям к дискретности цифровых данных.

Дискретность оценки турбулентности по удельной скорости диссипации турбулентной энергии (EDR) средней по отражаемому объему соответствует требованиям при следующих условиях:

- на дальности до 50 км дискретность оценки EDR не более 0.05 при значении требуемой EDR и менее  $0,2 \text{ м}^{2/3}/\text{с}$  (таблица 2.7);
- на дальности до 100 км дискретность оценки EDR не более 0.1 при значении требуемой EDR и менее  $0,2 \text{ м}^{2/3}/\text{с}$  (таблица 2.7).

При значении турбулентности EDR больше  $0.4 \text{ м}^{2/3}/\text{с}$  относительная ошибка оценки EDR составляет меньше 20%, следовательно, в соответствии с источником [54] МРЛК БАЗ обеспечивает определение уровней градации опасной турбулентности EDR выше уровня «умеренная».

### 3.2 Разработка алгоритма оценки горизонтального и вертикального сдвигов ветра и анализ его эффективности

Для оценивания опасных зон сдвигов ветра при сканировании формируются оценки среднего значения вектора скорости ветра – формула (3.55), вертикального сдвига ветра и сдвига ветра в горизонтальной, плоскости.

$$V(x, y, z) = \begin{bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

Для оценивания так называемых зон сдвигов ветра требуется оценить характеристики поля скорости ветра в относительно небольшой области (объеме) пространства, что представляется возможным при сканировании главного луча диаграммы направленности МРЛК БАЗ. Расположение указанной области анализа

$\Delta$  в СК  $AXYZ$  (рисунок 3.13). При этом начало СК точка  $A$  соответствует месту положения антенны ось  $AX$  направлена на север, ось  $AZ$  – вертикально вверх, а ось  $AZ$  дополняет СК до правой тройки.

При растровом способе обзора сферические координаты:

$$D = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; \quad \beta = \arcsin \frac{y}{D}; \quad \alpha = \arctg \frac{z}{x} \quad (3.56)$$

точек области анализа ограничены неравенствами

$$D_0 - \frac{\Delta D}{2} \leq D \leq D_0 + \frac{\Delta D}{2}; \quad \beta_0 - \frac{\Delta \beta}{2} \leq \beta \leq \beta_0 + \frac{\Delta \beta}{2}; \quad \alpha_0 - \frac{\Delta \alpha}{2} \leq \alpha \leq \alpha_0 + \frac{\Delta \alpha}{2}, \quad (3.57)$$

где  $(D_0; \beta_0; \alpha_0)$  – сферические координаты центра области  $\Delta$ ;  $\Delta D, \Delta \beta, \Delta \alpha$  – размеры области по соответствующим сферическим координатам.

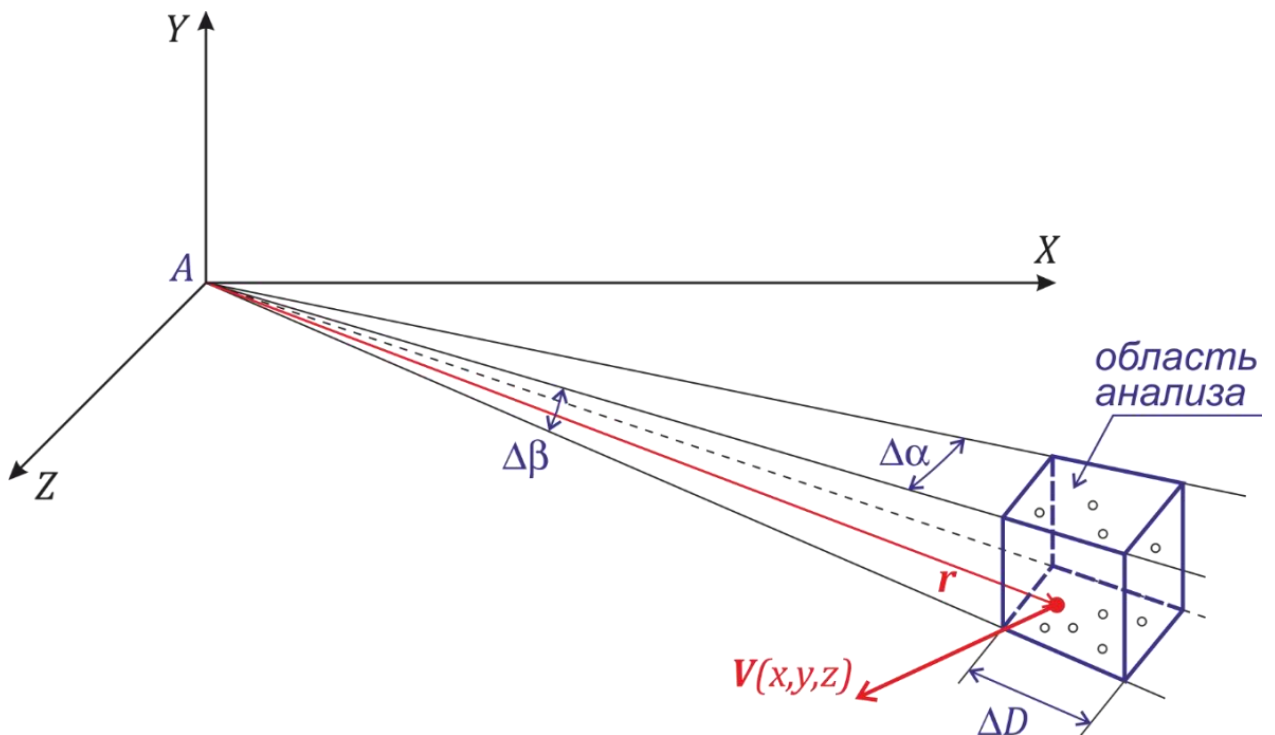


Рисунок 3.13– Расположение области анализа  $\Delta$  в системе координат  $AXYZ$

В задаче определения сдвигов ветра целесообразно использовать линейную аппроксимацию поля скорости:

$$V(x, y, z) \approx V_0 + J_0 \cdot (r - r_0). \quad (3.58)$$

где  $(x, y, z) \in \Delta$  – декартовы координаты точки внутри области анализа;

$$V_0 = V(x_0, y_0, z_0) = \begin{bmatrix} u(x_0, y_0, z_0) \\ v(x_0, y_0, z_0) \\ w(x_0, y_0, z_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

значение вектора скорости в центре области анализа с декартовыми координатами

$$\begin{cases} x_0 = D_0 \cos \beta_0 \cos \alpha_0, \\ y_0 = D_0 \sin \beta_0, \\ z_0 = D_0 \cos \beta_0 \sin \alpha_0; \end{cases} \quad (3.60)$$

$J_0$  – матрица Якоби в центральной точке;  $r = [x \ y \ z]^T$  – радиус-вектор;  $r_0 = [x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ .

На основе получаемых оценок для области анализа могут быть определены: вертикальный сдвиг ветра

$$S_B = \frac{|V(x, y, z) - V(x, y + \Delta y, z)|}{\Delta y} \quad (3.61)$$

и сдвиг ветра в горизонтальной плоскости

$$S_r = \frac{|V(x, y, z) - V(x + \Delta x, y, z + \Delta z)|}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2}} \quad (3.62)$$



Далее приведены алгоритмы, которые, в отличие от известных, используют информацию об ошибках измерений радиальной скорости, а также регуляризацию в виде априорной информации.

Первая версия алгоритма представлена для кругового сканирования (режим «Метео»). Входные данные алгоритма приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Входные данные для алгоритмов горизонтального и вертикального сдвигов ветра при круговом сканировании (режим «Метео»)

Обозначение	Название, размерность
$M$	количество каналов дальности
$D[m];$ $m = 0; M - 1$	расположение каналов дальности, м
$N$	количество угловых положений главного луча (ГЛ) диаграммы направленности антенны (ДНА) при сканировании по азимуту
$\alpha[n];$ $n = 0; N - 1$	азимутальные углы положений ГЛ ДНА при сканировании, рад
$K$	количество угловых положений ГЛ ДНА при сканировании по углу места
$\beta[k];$ $k = 0; K - 1$	углы места положений ГЛ ДНА при сканировании, рад
$\begin{cases} x[m, n, k] = D[m] \times \\ \cos \beta[k] \cdot \cos \alpha[n]; \\ y[m, n, k] = D[m] \times \\ \sin \beta[k]; \\ z[m, n, k] = D[m] \times \\ \cos \beta[k] \cdot \sin \alpha[n] \end{cases}$	декартовы координаты точек области анализа, м
$V[m, n, k]$	измеренные значения радиальных скоростей в точках области анализа, м/с
$\sigma_V[m, n, k]$	измеренные значения ширины спектра скоростей в точках области анализа, м/с

Выходными данными алгоритма являются оценки:

- вектора скорости  $V = V(X; Y; Z) = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$  в центре области анализа  $X; Y; Z$ ;
- вертикальный сдвиг ветра  $S_B$ .

Условия функционирования алгоритма:

- должны быть получены оценки  $V[m, n, k]$  радиальных скоростей и оценки  $\sigma_V[m, n, k]$  ширины спектра скоростей в точках области анализа;
- должны быть заданы (сформированы) общие параметры режима «Метео» и параметры рассматриваемого алгоритма, представленные в следующей таблице 3.4.

Таблица 3.4– Параметры алгоритмов горизонтального и вертикального сдвигов ветра при круговом сканировании (режим «Метео»)

Обозначение	Название, размерность	Значение
$K_\sigma$	параметр, определяющий СКО оценки радиальной скорости	12
$K_{pr}$	параметр регуляризации	1
$\sigma_\Gamma^{-2}$	априорная точность горизонтальной проекции скорости ветра	$\frac{K_{pr}}{30^2}$
$\sigma_B^{-2}$	априорная точность вертикальной проекции скорости ветра	$\frac{K_{pr}}{6^2}$
$S_B^{-2}$	априорная точность сдвига ветра в вертикальной плоскости	$\frac{K_{pr}}{0.2^2}$
$P$	минимальное количество метеоцелей в разных каналах дальности	2 ... 20
$Q$	минимальное количество метеоцелей, имеющих разный азимутальный угол	5 ... 20
$S$	минимальное количество метеоцелей, имеющих разный угол места	3 ... 20
$I$	размерность системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)	6

При выполнении 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 азимутальные углы:

$$p \leftarrow 0; \quad q \leftarrow 0; \quad s \leftarrow 0.$$

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

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  
 [  $\rho[0] \leftarrow \frac{x[m, n, k]}{D[m, n, k]}; \rho[1] \leftarrow \frac{y[m, n, k]}{D[m, n, k]}; \rho[2] \leftarrow \frac{z[m, n, k]}{D[m, n, k]};$   
 $\rho[3] \leftarrow \rho[0] \cdot (y[m, n, k] - Y);$   
 $\rho[4] \leftarrow \rho[1] \cdot (y[m, n, k] - Y);$   
 $\rho[5] \leftarrow \rho[2] \cdot (y[m, n, k] - Y);$   
 для  $i = \overline{0; I-1}$   
 [  $f[i] \leftarrow f[i] + K_\sigma \cdot \frac{\rho[i] \cdot V[m, n, k]}{\sigma_V^2[m, n, k]};$   
 [ для  $j = \overline{i; I-1}$   $R[i, j] \leftarrow R[i, j] + K_\sigma \cdot \frac{\rho[i] \cdot \rho[j]}{\sigma_V^2[m, n, k]};$   
 ]  $p1 \leftarrow p1 + 1;$   
 ] 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  $j = \overline{0; i-1}$   $R[i, j] \leftarrow R[j, i];$   
 для  $i = \overline{0; I-1}$   
 [ если  $i = 0$  или  $i = 2$ , то  $R[i, i] \leftarrow R[i, i] + \sigma_\Gamma^{-2};$   
 [ если  $i = 1$ , то  $R[i, i] \leftarrow R[i, i] + \sigma_B^{-2};$   
 [ если  $i = 3$  или  $i = 4$  или  $i = 5$ , то  $R[i, i] \leftarrow R[i, i] + s_B^{-2};$

3) 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  $k = \overline{0; i-1}$   $s \leftarrow s + \frac{G[j, k] \cdot G[i, k]}{G[k, k]};$   
 ]  $G[j, i] \leftarrow R[j, i] - s;$

$$\begin{array}{l}
 \text{для } i = \overline{0; I-1} \\
 \left[ \begin{array}{l}
 s \leftarrow 0; \\
 \text{если } i > 0, \quad \text{то для } k = \overline{0; i-1} \quad s \leftarrow s + \frac{G[i, k] \cdot x[k]}{G[k, k]}; \\
 x[i] \leftarrow f[i] - s;
 \end{array} \right. \\
 \text{для } j = \overline{0; I-1} \\
 \left[ \begin{array}{l}
 s \leftarrow 0; \quad i \leftarrow I-1-j; \\
 \text{если } j > 0, \text{ то для } k = \overline{i+1; I-1} \quad s \leftarrow s + \frac{G[k, i] \cdot x[k]}{G[i, i]}; \\
 x[i] \leftarrow \frac{x[i] - s}{G[i, i]}.
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

#### 4) 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  $S_B \leftarrow \sqrt{(x[3])^2 + (x[4])^2 + (x[5])^2}$ ;

являются выходными для рассмотренного алгоритма.

С помощью промежуточных и выходных данных может быть восстановлено

поле  $V(x; y; z) = \begin{bmatrix} u(x; y; z) \\ v(x; y; z) \\ w(x; y; z) \end{bmatrix}$  скорости ветра в области анализа с помощью

соотношения  $V(x; y; z) \approx \begin{bmatrix} x[0] \\ x[1] \\ x[2] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x[3] \\ x[4] \\ x[5] \end{bmatrix} \cdot (y - Y)$ .

Вторая версия алгоритма предназначена для секторного обзора (режим «Сектор»). Входные данные алгоритма приведены в таблице 3.5. Выходными данными алгоритма являются оценки:

- вектора скорости  $V = V(X; Y; Z) = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$  в центре области анализа  $X; Y; Z$ ;
- вертикальный сдвиг ветра  $S_B$  и сдвиг ветра в горизонтальной плоскости

$S_r$ .

Условия функционирования алгоритма:

- должны быть получены оценки  $V[m, n, k]$  радиальных скоростей в точках области анализа;
- должны быть заданы (сформированы) общие параметры режима «Метео» и параметры рассматриваемого алгоритма, представленные в таблице 3.6.

Таблица 3.5 – Входные данные для функционирования алгоритмов горизонтального и вертикального сдвигов ветра при секторном сканировании (режим «Сектор»)

Обозначение	Название, размерность
$M$	количество каналов дальности
$D[m];$ $m = 0; M - 1$	расположение каналов дальности, м
$N$	количество угловых положений главного луча (ГЛ) диаграммы направленности антенны (ДНА) при сканировании по азимуту
$\alpha[n];$ $n = 0; N - 1$	углы по азимуту ГЛ ДНА при сканировании, рад
$K$	количество положений углов ГЛ ДНА при сканировании по углу места
$\beta[k];$ $k = 0; K - 1$	углы по месту положений ГЛ ДНА при сканировании, рад
$\begin{cases} x[m, n, k] = D[m] \times \\ \cos \beta[k] \cdot \cos \alpha[n]; \\ y[m, n, k] = D[m] \times \\ \sin \beta[k]; \\ z[m, n, k] = D[m] \times \\ \cos \beta[k] \cdot \sin \alpha[n] \end{cases}$	декартовы координаты точек области анализа, м
$V[m, n, k]$	измеренные значения $V$ в точках области анализа, м/с
$\sigma_V[m, n, k]$	измеренные значения ширины спектра скоростей в точках области анализа, м/с

Таблица 3.6 – Общие параметры алгоритмов горизонтального и вертикального сдвигов ветра при секторном сканировании (режим «Сектор»)

Обозначение	Название, размерность	Значение	Примечание
$P$	минимальное количество гидрометеоров в разных каналах дальности	2 ... 20	определяет точность

Обозначение	Название, размерность	Значение	Примечание
$Q$	минимальное количество гидрометеоров с разными углами по азимуту	5 ... 20	определяет точность
$S$	минимальное количество гидрометеоров с разными углами места	3 ... 20	определяет точность
$I$	размерность системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)	9	определяет размеры матрицы коэффициентов и вектора правых частей СЛАУ; задает диапазон значений счетчиков в циклах

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  $i = \overline{0; I - 1}$   
 [  $f[i] \leftarrow f[i] + \rho[i] \cdot V[m, n, k];$   
 [ 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  $j = \overline{0; i - 1} \quad R[i, j] \leftarrow R[j, i].$

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

3) 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  $k = \overline{0; i - 1} \quad s \leftarrow s + G[j, k] \cdot G[i, k];$   
 [ если  $i = j$ , то  $G[j, i] \leftarrow \sqrt{R[i, i] - s}$ , иначе  $G[j, i] \leftarrow \frac{R[j, i] - s}{G[i, i]}$ ;



$$\begin{array}{l}
 \text{для } i = \overline{0; I-1} \\
 \left[ \begin{array}{l}
 s \leftarrow 0; \\
 \text{если } i > 0, \quad \text{то для } k = \overline{0; i-1} \quad s \leftarrow s + G[i, k] \cdot x[k]; \\
 x[i] \leftarrow \frac{f[i] - s}{G[i, i]};
 \end{array} \right. \\
 \text{для } j = \overline{0; I-1} \\
 \left[ \begin{array}{l}
 s \leftarrow 0; \quad i \leftarrow I-1-j; \\
 \text{если } j > 0, \text{ то для } k = \overline{i+1; I-1} \quad s \leftarrow s + G[k, i] \cdot x[k]; \\
 x[i] \leftarrow \frac{x[i] - s}{G[i, i]}.
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

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  $S_B \leftarrow$

$\sqrt{(x[4])^2 + (x[8])^2 + (x[6])^2}$  и сдвига ветра в горизонтальной плоскости  $S_r$ , определяемого с помощью операторов являются выходными для рассмотренного алгоритма.

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

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

**Оценка точности определения сдвигов ветра. Определение диапазона оценки горизонтального и вертикального сдвигов ветра.** В СПО МРЛК БАЗ расчеты горизонтального и вертикального сдвигов ветра выполняются для заданного граничного объема пространства (далее – поля ветра в ячейке пространства). Эти расчеты реализуются одним алгоритмом оценки параметров

вектора скорости ветра из источника [40] – «расчет скорости внутри объема: метод VVP».

Все расчеты применяются:

- для горизонтального сдвига ветра в режимах работы МРЛК БАЗ «Обзор» и «Сектор»;
- для вертикального сдвига ветра в режиме «Сектор».

В источнике [73] для оценок сдвигов ветра, скорости и направления ветра приведены математические соотношения, являющиеся частью алгоритмов расчета этих РЛП. Достоинством такого алгоритма является то, что практически отсутствуют математические и аппаратные ограничения на минимальное и максимальное значения диапазона оценки горизонтального сдвига ветра (ГСВ).

Программные ограничения существуют только для типа данных «double» (а в СПО МРЛК БАЗ для вычисления этого алгоритма специально используется тип данных с расширенными значениями: «long double»). Эти ограничения соответствуют требованиям к диапазону оценки интенсивности ГСВ на 600 м от не более 0.2 до не менее 6 м/с.

На диапазон оценки ГСВ оказывают влияние: размер данных в файлах хранилища, размер данных в файлах хранилища и размер данных в пакетах сообщений. Это влияние указано ниже в определении минимального значения.

Выше в работе показаны уровни градаций опасности сдвигов ветра по данным руководящих документов, изложенные в таблице 2.5.

Ниже представлены результаты оценки дискретности значений для горизонтального сдвига ветра. Из этих результатов следует, что диапазон оценки горизонтального сдвига ветра ограничивается соответствием требованиям по дискретности оценки.

Из анализа соответствия требованиям к дискретности оценки в источнике [73] следуют порядок, правила определения минимального и максимального значений диапазонов оценки ГСВ, указанные далее.

### **Определение минимального значения диапазона оценки ГСВ.**

Минимальное значение оценки ГСВ, соответствующее по требованиям к дискретности источника [73] равно 0.1 м/с из-за значения дискретности цифровых данных, но, исходя из данных ошибки оценки горизонтального сдвига ветра менее 0.2 из источника [73] при значении этого сдвига ветра менее 0.1 на выходе обработки в данных будет значение 0.0. Поэтому при значении оценок ГСВ менее 0.2 следует, что уровень градации ГСВ «слабый» определяется достоверно и статистически надёжно (таблица 3.7).

### **Определение максимального значения диапазона оценки ГСВ.**

Максимальное значение оценки ГСВ на 600 м, соответствующее по требованиям к дискретности из источника [73] равно 8 м/с. Это значение оценки ГСВ на 600 м больше требуемого значения 6 м/с.

Определенные выше минимальное и максимальное значения диапазона оценки ГСВ получены из соответствия к требованиям по дискретности оценки, следовательно, накладываются и указанные в источнике [73] ограничения:

- на дальности до 50 км;
- в МРЛК БАЗ для оценки интенсивности горизонтального сдвига ветра применяются ограничения, указанные в источнике [73], для одного отсчета оценки по размерам области анализа пространства в сферических координатах.

В МРЛК БАЗ на дальности до 50 км для диапазона оценки горизонтального сдвига ветра по его интенсивности на 600 м соблюдается следующее:

- минимальное значение диапазона оценки не более 0.2 м/с;
- при значении горизонтального сдвига ветра по требованиям от не более 0.2 м/с определяется уровень градации опасного сдвига ветра;
- максимальное значение диапазона оценки сдвига ветра соответствует требованиям не менее 6 м/с.

**Определение диапазона оценки вертикального сдвига ветра.** Диапазон оценки ВСВ на 30 м по его интенсивности, также, как и ГСВ, определяется из соответствия требованиям по дискретности оценки.

В источнике [73] представлены результаты оценки дискретности значений для ВСВ. Из этих результатов следует, что диапазон оценки горизонтального сдвига ветра ограничивается соответствием требованиям по дискретности оценки.

**Определение минимального значения диапазона оценки ГСВ.**

Минимальное значение оценки ВСВ на 30 м, соответствующее по требованиям к дискретности равно 0.5 м/с. Это значение соответствует требованиям оценки ВСВ на 30 м – не более 0.5 м/с.

**Определение максимального значения диапазона оценки ГСВ.**

Максимальное значение оценки ГСВ на 600 м, соответствующее по требованиям к дискретности из источника [73] на дальности до 45 км равно 7 м/с.

В диапазоне значений интенсивности ВСВ на 30 м от больше 7 м/с при дальности больше 30 км в МРЛК БАЗ обеспечивается определение уровня градации опасности ВСВ на 30 м в соответствии с таблицей 3.8.

Определенные выше минимальное и максимальное значения диапазона оценки ВСВ получены из соответствия к требованиям по дискретности оценки, следовательно, накладываются и указанные в источнике [73] ограничения:

- на дальности до 50 км;
- в МРЛК БАЗ для оценки интенсивности вертикального сдвига ветра применяются ограничения, указанные в источнике [73], для одного отсчета оценки по размерам области анализа пространства в сферических координатах.

В МРЛК БАЗ для диапазона оценки вертикального сдвига ветра по его интенсивности на 30 м соблюдается следующее:

- на дальности до 50 км минимальное значение диапазона оценки соответствует требованиям не более 0,2 м/с;
- на дальности до 45 км максимальное значение оценки ВСВ на 30 м, соответствующее по требованиям к дискретности из источника [73] на дальности равно 7 м/с;
- при дальности больше 30 км и в диапазоне значений интенсивности ВСВ на 30 м от больше 7 м/с в МРЛК БАЗ обеспечивается определение уровня градации опасности вертикального сдвига ветра на 30 м в соответствии с требованиями.

**Расчет дискретности цифровых данных для оценки горизонтального сдвига ветра.** Для однозначности изложения методики расчетов общие для горизонтального и вертикального сдвигов ветра математические преобразования указываются в пункте для горизонтального сдвига ветра. Для вертикального сдвига ветра указываются только ссылки.

В результате выполнения в СПО МРЛК БАЗ процедур цифровой первичной обработки данных получены оценки радиальных скоростей и измерены пространственные координаты этих оценок. СПО МРЛК БАЗ из этих данных реализует вычисления по алгоритму оценки параметров вектора скорости ветра. Из таких параметров рассчитываются конечные оценки ГСВ на 600 м и ВСВ на 30 м.

Алгоритм оценки параметров вектора скорости ветра содержит функции, определяющие достаточные статистические условия для формирования оценок по множеству значений радиальной скорости на различных позициях по дальности, азимуту и углу места. Параметры этих функций вводятся из настроек и конфигурации СПО МРЛК БАЗ.

Сложность реализации расчета по алгоритму оценки параметров вектора скорости обуславливает дискретность значений для конечных оценок ГСВ и ВСВ равную типу данных double. Поэтому дискретность цифровых данных для оценки ГСВ определяется только шагом дискретизации данных в файлах хранилища. Значение этого шага для сдвигов ветра должно обеспечивать разделение по уровням градаций сдвигов ветра. Из источника [21] уровни градации сдвигов ветра приведены в таблице 2.5.

Значение шага дискретизации для горизонтального сдвига ветра составляет 0,2 м/с на 600 м. Это значение обеспечивает разделение по уровням градаций для горизонтального сдвига ветра в соответствии с таблицей 2.5.

**Расчет ошибки оценки горизонтального сдвига ветра.** Оценки ГСВ и ВСВ определяются в источнике [40] из параметров вектора скорости ветра. Расчет

ошибок оценок ГСВ и ВСВ выполняется с использованием расчета ошибки оценки скорости и направления.

При расчете вектора скорости ветра (скорости и направления ветра) получаются оценки мезомасштабных дивергенций

$$\begin{aligned} X_3 &= \frac{\partial u}{\partial x}; \quad X_4 = \frac{\partial u}{\partial y}; \quad X_5 = \delta = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}; \\ X_6 &= \frac{\partial v}{\partial y}; \quad X_7 = \frac{\partial w}{\partial y}; \quad X_8 = \frac{\partial w}{\partial z}. \end{aligned} \quad (3.63)$$

С помощью величин (3.63) для заданной области (объема) пространства в расчете определяются оценки:

ВСВ:

$$S_B = \frac{|V(x, y, z) - V(x, y + \Delta y, z)|}{\Delta y} \quad (3.64)$$

ГСВ:

$$S_r = \frac{|V(x, y, z) - V(x + \Delta x, y, z + \Delta z)|}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2}}. \quad (3.65)$$

При использовании линейной модели для сдвигов (3.64), (3.65) выводятся выражения для оценок:

ВСВ:

$$S_B = \left| \frac{\partial V}{\partial y} \right|, \quad (3.66)$$

ГСВ:

$$S_{\Gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial V}{\partial z} \right|^2 + \sqrt{\left( \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right|^2 - \left| \frac{\partial V}{\partial z} \right|^2 \right)^2 + \left( 2 \frac{\partial V^T}{\partial x} \cdot \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2} \right]}. \quad (3.67)$$

При практической реализации оценивания ВСВ  $S_B$  и ГСВ  $S_{\Gamma}$  выполняются следующие вычисления:

$$\begin{cases} S_B = 30 \sqrt{X_4^2 + X_6^2 + X_7^2}; \\ c = \left( \frac{X_5}{2} \right)^2; a = X_3^2 + c; b = X_8^2 + c; \\ S_{\Gamma} = 600 \sqrt{\frac{1}{2} \left[ a + b + \sqrt{(a - b)^2 + 4(X_3 \cdot X_8 + c)^2} \right]}. \end{cases} \quad (3.68)$$

При формировании заданных значений сдвигов ветра по выражению (3.68) в элементы матрицы  $X_i$  устанавливаются нули для соответствующих позиций:  
для ВСВ

$$X = \left[ u'_0 \quad v_0 \quad w'_0 \quad 0 \quad \frac{\partial u}{\partial y} \quad 0 \quad \frac{\partial v}{\partial y} \quad \frac{\partial w}{\partial y} \quad 0 \right]^T;$$

для ГСВ:

$$X = \left[ u'_0 \quad v_0 \quad w'_0 \quad \frac{\partial u}{\partial x} \quad 0 \quad \delta \quad 0 \quad 0 \quad \frac{\partial w}{\partial z} \right]^T.$$

Значения  $u'_0$   $v_0$   $w'_0$  на расчет СКО ГСВ и ВСВ не влияют, так как это константные для сдвигов ветра параметры полного вектора скорости в области анализа и их значения принимаются 10, 2 и 10 м/с, соответственно.

На точность формирования сдвигов ветра (3.64)–(3.68) оказывают влияние ошибки  $\varepsilon_{уп}$  определения углового положения главного луча диаграммы направленности антенны (ГЛ ДНА).

Статистические характеристики ошибок определения углового положения ГЛ ДНА определяются следующими исходными данными:

- 1) погрешность позиционирования антенны по азимуту и углу места – не более 15 угловых минут (0,25 градуса);
- 2) рядность датчиков угловых положений антенны – 12 разрядов (4096 позиций на 360 угловых градусов).

Тогда величина СКО

$$\sigma_{\varepsilon} \equiv \sqrt{M\{\varepsilon_{\text{уп}}^2\}}, \quad (3.69)$$

определения углового положения ГЛ ДНА оценивается для суммы независимых ошибок позиционирования  $\varepsilon_{\text{поз}}$  и ошибки квантования  $\varepsilon_{\text{кв}}$ :

$$\begin{aligned} \sigma_{\varepsilon} &= \sqrt{M\{\varepsilon_{\text{поз}}^2\} + M\{\varepsilon_{\text{кв}}^2\}} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{0.25\pi}{180}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{2^{12}}\right)^2} = 4.6251 \cdot 10^{-3} \text{ (рад)}. \end{aligned} \quad (3.70)$$

Ошибка определения вектора характеристик  $X_k$ ;  $k = \overline{0; 8}$ , включающего элементы мезомасштабных дивергенций (0.1) определяет СКО оценок ГСВ и ВСВ. Влияние ошибок определения углового положения ГЛ ДНА непосредственно проявляется в том, что вместо базовой СЛАУ выполняется решение возмущенной системы:

$$\tilde{A}(\varepsilon_{\text{уп}}) \cdot X = Y. \quad (3.71)$$

Здесь символом  $\tilde{A}(\varepsilon_{\text{уп}}) \neq A$  показана зависимость возмущенной матрицы коэффициентов СЛАУ от вектора  $\varepsilon_{\text{уп}}$  ошибок определения углового положения ГЛ ДНА. Запись (3.71) в детальном покомпонентном виде:



$$\begin{cases} \sum_{k=0}^8 A_{0,k} (\alpha_0 + \varepsilon_0^{(\alpha)}, \beta_0 + \varepsilon_0^{(\beta)}) \cdot X_k = V_0, \\ \sum_{k=0}^8 A_{1,k} (\alpha_1 + \varepsilon_1^{(\alpha)}, \beta_1 + \varepsilon_1^{(\beta)}) \cdot X_k = V_1, \\ \vdots \\ \sum_{k=0}^8 A_{I-1,k} (\alpha_{I-1} + \varepsilon_{I-1}^{(\alpha)}, \beta_{I-1} + \varepsilon_{I-1}^{(\beta)}) \cdot X_k = V_{I-1}. \end{cases} \quad (3.72)$$

где  $A_i$  – коэффициенты СЛАУ (3.72);  $\varepsilon_i^{(\alpha)}$  и  $\varepsilon_i^{(\beta)}$  ( $i = \overline{0; I-1}$ ) – ошибки определения углового положения ГЛ ДНА по азимуту ( $\alpha$ ) и углу места ( $\beta$ ) соответственно.

Определенное из (3.69) выражение (3.70) и рассчитанное числовое значение СКО ошибки определения углового положения ГЛ ДНА  $\sigma_\varepsilon \ll 1$  позволяет с достаточно высокой точностью выполнить разложение в ряд:

$$\begin{aligned} A_{i,k} (\alpha_i + \varepsilon_i^{(\alpha)}, \beta_i + \varepsilon_i^{(\beta)}) &\approx A_{i,k} (\alpha_i, \beta_i) + \\ &+ \left. \frac{\partial A_{i,k} (\alpha_i + \varepsilon_i^{(\alpha)}, \beta_i + \varepsilon_i^{(\beta)})}{\partial \varepsilon_i^{(\alpha)}} \right|_{\varepsilon_i^{(\alpha)}=0} \cdot \varepsilon_i^{(\alpha)} + \\ &+ \left. \frac{\partial A_{i,k} (\alpha_i + \varepsilon_i^{(\alpha)}, \beta_i + \varepsilon_i^{(\beta)})}{\partial \varepsilon_i^{(\beta)}} \right|_{\varepsilon_i^{(\beta)}=0} \cdot \varepsilon_i^{(\beta)}; \\ &i = \overline{0; I-1}. \end{aligned} \quad (3.73)$$

Массивы частных производных записываются в виде:

$$\zeta_{i,k} \equiv \left. \frac{\partial A_{i,k} (\alpha_i + \varepsilon_i^{(\alpha)}, \beta_i + \varepsilon_i^{(\beta)})}{\partial \varepsilon_i^{(\alpha)}} \right|_{\varepsilon_i^{(\alpha)}=0} = \frac{\partial A_{i,k} (\alpha_i, \beta_i)}{\partial \alpha_i}; \quad (3.74)$$

$$i = \overline{0; I-1},$$

$$\eta_{i,k} \equiv \left. \frac{\partial A_{i,k}(\alpha_i + \varepsilon_i^{(\alpha)}, \beta_i + \varepsilon_i^{(\beta)})}{\partial \varepsilon_i^{(\beta)}} \right|_{\varepsilon_i^{(\beta)}=0} = \frac{\partial A_{i,k}(\alpha_i, \beta_i)}{\beta_i};$$

$$i = \overline{0; I-1},$$
(3.75)

в (3.73) определяются цепочками равенств

$$\left\{ \begin{array}{l} \zeta_{i,0} = -A_{i,2}, \\ \zeta_{i,1} = 0, \\ \zeta_{i,2} = A_{i,0}, \\ \zeta_{i,3} = \zeta_{i,0} \cdot (x_i + \delta x_i), \\ \zeta_{i,4} = \zeta_{i,0} \cdot \delta y_i, \\ \zeta_{i,5} = \frac{\zeta_{i,2} \cdot \delta x_i + \zeta_{i,0} \cdot \delta z_i}{2}, \\ \zeta_{i,6} = 0, \\ \zeta_{i,7} = \zeta_{i,2} \cdot \delta y_i, \\ \zeta_{i,8} = \zeta_{i,2} \cdot (z_i + \delta z_i), \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \eta_{i,1} = \sqrt{1 - A_{i,1}^2}, \\ \eta_{i,0} = -\frac{A_{i,0} \cdot A_{i,1}}{\eta_{i,1}}, \\ \eta_{i,2} = -\frac{A_{i,1} \cdot A_{i,2}}{\eta_{i,1}}, \\ \eta_{i,3} = \eta_{i,0} \cdot (x_i + \delta x_i), \\ \eta_{i,4} = \eta_{i,0} \cdot \delta y_i + \eta_{i,1} \cdot x_i, \\ \eta_{i,5} = \frac{\eta_{i,2} \cdot (x_i + \delta x_i) + \eta_{i,0} \cdot (z_i + \delta z_i)}{2}, \\ \eta_{i,6} = \eta_{i,1} \cdot (y_i + \delta y_i), \\ \eta_{i,7} = \eta_{i,2} \cdot \delta y_i + \eta_{i,1} \cdot x_i, \\ \eta_{i,8} = \eta_{i,2} \cdot (z_i + \delta z_i), \end{array} \right. \quad (3.76)$$

Здесь для компактности дальнейших записей, а также удобства программирования вычислений, в (3.76) использованы обозначения для декартовых координат

$$\begin{cases} x_i = D_i \cos \beta_i \cos \alpha_i, \\ y_i = D_i \sin \beta_i, \\ z_i = D_i \cos \beta_i \sin \alpha_i, \end{cases} \quad (3.77)$$

а также их приращений

$$\begin{cases} \delta x_i = x_i - X_0, \\ \delta y_i = y_i - Y_0, \\ \delta z_i = z_i - Z_0 \end{cases} \quad (3.78)$$

где:  $X_0, Y_0$  и  $Z_0$  – декартовы координаты центра области анализа.

Из приведенных преобразований в уравнении наблюдения (3.71), (3.72) возмущения, связанные с ошибками  $\varepsilon_i^{(\alpha)}$  и  $\varepsilon_i^{(\beta)}$  определения углового положения ГЛ ДНА по азимуту ( $\alpha$ ) и углу места ( $\beta$ ), переносятся в правую часть. В результате получается в эквивалентном виде

$$\sum_{k=0}^8 A_{i,k} \cdot X_k = V_i - \varepsilon_i^{(\alpha)} \cdot \sum_{k=0}^8 \zeta_{i,k} \cdot X_k - \varepsilon_i^{(\beta)} \cdot \sum_{k=0}^8 \eta_{i,k} \cdot X_k = V_i + \varepsilon_i^{(V)}. \quad (3.79)$$

Здесь

$$\varepsilon_i^{(V)} = -\varepsilon_i^{(\alpha)} \cdot \sum_{k=0}^8 \zeta_{i,k} \cdot X_k - \varepsilon_i^{(\beta)} \cdot \sum_{k=0}^8 \eta_{i,k} \cdot X_k, \quad (3.80)$$

где  $\varepsilon_i^{(V)}$  – дополнительные (к ошибкам измерения радиальных скоростей) возмущения, обусловленные ошибками определения углового положения ГЛ ДНА с заданными СКО (3.69), (3.70).

В компактной векторно-матричной форме вместо (3.71) получается

$$A \cdot X = Y + \varepsilon^{(V)} = \tilde{Y}, \quad (3.81)$$

$$\text{где } \varepsilon^{(V)} = [\varepsilon_0^{(V)} \quad \varepsilon_1^{(V)} \quad \dots \quad \varepsilon_{l-1}^{(V)}]^T, \quad (3.82)$$

$\varepsilon^{(V)}$  – вектор возмущений измерений радиальных скоростей;

$\tilde{Y} = Y + \varepsilon^{(V)}$  – эквивалентный вектор наблюдения.

Аналогично (3.81), корреляционная матрица ошибок оценки вектора характеристик  $X$

$$R_X \equiv M\{[X - M(X)][X - M(X)]^T\} = (A^T A)^{-1} A^T \tilde{R}_Y A (A^T A)^{-T}, \quad (3.83)$$

зависит от корреляционной матрицы ошибок эквивалентного наблюдения (3.81)

$$\tilde{R}_Y \equiv M\{[\tilde{Y} - M(\tilde{Y})][\tilde{Y} - M(\tilde{Y})]^T\} = R_Y + R_\varepsilon. \quad (3.84)$$

Здесь дополнительное слагаемое  $R_\varepsilon$  учитывает корреляционные моменты вектора возмущений (3.82). Для независимых ошибок  $\varepsilon_i^{(\alpha)}$  и  $\varepsilon_i^{(\beta)}$  ( $i = \overline{0; I-1}$ ) определения углового положения ГЛ ДНА по азимуту ( $\alpha$ ) и углу места ( $\beta$ ), с учетом (3.80), корреляционная матрица  $R_\varepsilon$  является диагональной с отличными от нуля элементами

$$(R_\varepsilon)_{i,i} = \sigma_\varepsilon^2 \left[ \left( \sum_{k=0}^8 \zeta_{i,k} \cdot X_k \right)^2 + \left( \sum_{k=0}^8 \eta_{i,k} \cdot X_k \right)^2 \right], \quad (3.85)$$

$$i = \overline{0; I-1},$$

, являющимися дисперсиями возмущений  $\varepsilon_i^{(V)}$ . При независимых и равноточных измерениях (3.68), радиальных скоростей движения элементов в области анализа для матрицы (3.80), справедливо выражение (3.82). Тогда корреляционная матрица (3.84) ошибок эквивалентного наблюдения (81) также будет диагональной, и соответствующие дисперсии элементов  $\tilde{V}_i = V_i + \varepsilon_i^{(V)}$  равны

$$(\tilde{R}_Y)_{i,i} = (R_\varepsilon)_{i,i} + \sigma_V^2 = \sigma_\varepsilon^2 \cdot [(\zeta_i \cdot X)^2 + (\eta_i \cdot X)^2] + \sigma_V^2, \quad (3.86)$$

$$i = \overline{0; I-1}.$$

Здесь для удобства записи использованы обозначения

$$\begin{aligned} \zeta_i &= [\zeta_{i,0} \quad \zeta_{i,1} \quad \zeta_{i,2} \quad \zeta_{i,3} \quad \zeta_{i,4} \quad \zeta_{i,5} \quad \zeta_{i,6} \quad \zeta_{i,7} \quad \zeta_{i,8}]; \\ \eta_i &= [\eta_{i,0} \quad \eta_{i,1} \quad \eta_{i,2} \quad \eta_{i,3} \quad \eta_{i,4} \quad \eta_{i,5} \quad \eta_{i,6} \quad \eta_{i,7} \quad \eta_{i,8}] \end{aligned} \quad (3.87)$$

векторов-строк частных производных, определяемых соотношениями (3.74)–(3.76).

Тогда с учетом (3.76)–(3.87), для вычисления (3.83) используется следующая, удобная для программной реализации схема:

$$\begin{aligned} S &= \left( \sum_{i=0}^{I-1} A_i^T \cdot A_i \right)^{-1} ; \\ B &= \sum_{i=0}^{I-1} \{ \sigma_\varepsilon^2 \cdot [(\zeta_i \cdot X)^2 + (\eta_i \cdot X)^2] + \sigma_V^2 \} \cdot A_i^T \cdot A_i ; \\ R_X &= S \cdot B \cdot S^T . \end{aligned} \quad (3.88)$$

В силу (3.63) и (3.68) расчет дисперсий выполняется из диагональных элементов матрицы  $R_X$

$$\begin{aligned} \sigma_3^2 &\equiv (R_X)_{3,3}; \quad \sigma_5^2 \equiv (R_X)_{5,5}; \quad \sigma_8^2 \equiv (R_X)_{8,8} ; \\ \sigma_4^2 &\equiv (R_X)_{4,4}; \quad \sigma_6^2 \equiv (R_X)_{6,6}; \quad \sigma_7^2 \equiv (R_X)_{7,7} . \end{aligned} \quad (3.89)$$

, являющиеся дисперсиями ошибок определения соответствующих мезомасштабных дивергенций. При этом элементы с номерами 3, 5, 8 (первая строка (3.89) отвечают горизонтальным частным производным, а элементы с номерами 4, 6, 7 (вторая строка (3.89)– частным производным в вертикальном направлении. Для СКО формирования сдвигов ветра с учетом соотношений (3.64)–(3.68) в первом приближении получаются выражения:

для ВСВ  $S_B$

$$\sigma_B = 30 \sqrt{\sigma_4^2 + \sigma_6^2 + \sigma_7^2} , \quad (3.90)$$

для ГСВ  $S_r$

$$\sigma_r = 600\sqrt{\sigma_3^2 + \sigma_5^2 + \sigma_8^2} . \quad (3.91)$$

Из непосредственной связи выражений (3.76), (3.85) и (3.88) с СКО ВСВ (3.90) и ГСВ (3.91) следует, что на значение этих СКО оказывают сильное влияние размеры области анализа.

Эти размеры в СПО МРЛК БАЗ определяются из принципа вписывания прямоугольной области в область со сферическим координатами.

Прямоугольная область – это область, определяемая горизонтальными размерами и вертикальной толщиной элементарной ячейки оценки сдвигов ветра. В СПО МРЛК БАЗ приняты следующие номинальные размеры: 1500x1500x1000 метров ( $\Delta X$  x  $\Delta Z$  x  $\Delta Y$ , соответственно).

Размеры по горизонтали 1500x1500 метров приняты на основании источника [141], где номинальный размер штормовой ячейки 3 морских мили (5556 м), а номинальный интервал осреднения данных радиальной скорости 1000 м. Для повышения точности определения факта сдвига ветра горизонтальный размер принят с техническим запасом – 1500 м.

Толщина по вертикали 1 км принята из условия оценки сдвигов ветра по данным радиальной скорости в пределах высот до 2 км над уровнем поверхности из источника [141].

Расчет СКО ГСВ. Исходные данные:

- 1) непосредственный расчет и проведение испытаний выполняются с использованием приложения Python и исходного кода расчетов;
- 2) СКО определения радиальной скорости  $\sigma_V$  для масштабов дальности 25 и 50 км определено и равно 0,434 м/с;

3) параметры размеров области  $\Delta$ , как показано на рисунке 3.13, по сферическим координатам и для соответствующих зон дальности указаны ниже в результатах испытаний;

4) дискретность данных по горизонтальному углу: 1,625 градуса;

5) дискретность данных по вертикальному углу устанавливается из равенства ошибке измерения угловых координат: 0,25 градуса.

б) контрольные точки значений ГСВ (объекты анализа, далее – ОА) для расчетов ошибки оценки ГСВ устанавливаются по границам уровней градации сдвигов ветра: 0,5, 2,0, 4,0, 6,0 и 8,0 м/с на 600 м.

**Результаты испытаний.** Экспериментальные данные представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты расчетов ошибки оценки ГСВ по выражению (3.91).

Дальность центра ОА $D_0$ , м	Размер ОА по $\Delta D$ , м	Размер ОА по $\Delta \alpha$ , градус	Размер ОА по УМ $\Delta \beta$ , градус	СКО ГСВ $\sigma_r$ м/с на 600 м
Требуемый ГСВ – 0,5 м/с на 600 м				
1500,0	1500,0	23,00	17,00	0,1444
3000,0	1500,0	19,00	15,00	0,1533
10000,0	1500,0	17,00	14,50	0,1010
25000,0	1500,0	15,00	13,00	0,1109
50000,0	1500,0	13,00	13,00	0,1260
Требуемый ГСВ – 2,0 м/с на 600 м				
1500,0	1500,0	23,00	17,00	0,1444
3000,0	1500,0	19,00	15,00	0,1532
10000,0	1500,0	17,00	14,50	0,1009
25000,0	1500,0	15,00	13,00	0,1110
50000,0	1500,0	13,00	13,00	0,1265
Требуемый ГСВ – 4,0 м/с на 600 м				
1500,0	1500,0	23,00	17,00	0,1444
3000,0	1500,0	19,00	15,00	0,1532
10000,0	1500,0	17,00	14,50	0,1009
25000,0	1500,0	15,00	13,00	0,1114
50000,0	1500,0	13,00	13,00	0,1288
Требуемый ГСВ – 6,0 м/с на 600 м				
1500,0	1500,0	23,00	17,00	0,1444
3000,0	1500,0	19,00	15,00	0,1532
10000,0	1500,0	17,00	14,50	0,1011
25000,0	1500,0	15,00	13,00	0,1122
50000,0	1500,0	13,00	13,00	0,1329
Требуемый ГСВ – 8,0 м/с на 600 м				
1500,0	1500,0	23,00	17,00	0,1445
3000,0	1500,0	19,00	15,00	0,1533

Дальность центра ОА $D_0$ , м	Размер ОА по $\Delta D$ , м	Размер ОА по $\Delta \alpha$ , градус	Размер ОА по УМ $\Delta \beta$ , градус	СКО ГСВ $\sigma_r$ м/с на 600 м
10000,0	1500,0	17,00	14,50	0,1012
25000,0	1500,0	15,00	13,00	0,1135
50000,0	1500,0	13,00	13,00	0,1386
-	-	-	-	Максимум меньше 0,2 м/с на 600 м

Таким образом, в МРЛК БАЗ для оценки интенсивности горизонтального сдвига ветра применяются ограничения, указанные в таблице 3.7, для одного отсчета оценки по размерам области анализа пространства в сферических координатах.

В МРЛК БАЗ дискретность цифровых данных для оценки ГСВ со значением 0,2 м/с на 600 метров обеспечивает определение уровня градации опасности ГСВ на 600 м

В МРЛК БАЗ на дальности до 50 км СКО оценки ГСВ на 600 м составляет не более 0,2 при соблюдении ограничений. В МРЛК БАЗ на дальности до 50 км, при соблюдении ограничений, дискретность оценки ГСВ на 600 м обеспечивает определение уровней градации опасности этого сдвига ветра по его интенсивности на 600 м и соответствует выдвинутым в работе требованиям по ошибке оценки не более 0,2 м/с.

**Расчет дискретности цифровых данных для оценки вертикального сдвига ветра.** Дискретность цифровых данных для оценки вертикального сдвига ветра определяется по методике, указанной для горизонтального сдвига ветра.

Значение шага дискретизации для вертикального сдвига ветра составляет 0,5 м/с на 30 м. Это значение соответствует выдвинутым в работе требованиям для дискретности оценки ВСВ на 30 м не более 0,5 м/с на 30 м.

**Расчет ошибки оценки вертикального сдвига ветра.** Ранее был указан порядок, условия и выражения для расчета ошибки оценки для горизонтального и



вертикального сдвигов ветра. Ошибка оценки вертикального сдвига ветра определяется СКО, определенным по выражению (3.91).

Исходные данные:

1) непосредственный расчет и проведение испытаний выполняются с использованием приложения Python и исходного кода расчетов;

2) СКО определения радиальной скорости  $\sigma_V$  для масштабов дальности 25 и 50 км равно 0,434 м/с;

3) параметры размеров области  $\Delta$ , как показано на рисунке 3.13 по сферическим координатам и для соответствующих зон дальности указаны ниже в результатах испытаний;

4) дискретность данных по горизонтальному углу: 1,625 градуса;

5) дискретность данных по вертикальному углу устанавливается из равенства ошибки измерения угловых координат: 0,25 градуса.

6) контрольные точки значений ВСВ (объекты анализа, далее – ОА) для расчетов ошибки оценки ВСВ устанавливаются по границам уровней градации сдвигов ветра, указанных в таблице 17: 0,5, 2,0, 4,0, 6,0 и 8,0 м/с на 600 м.

**Результаты испытаний.** Экспериментальные данные представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты расчетов ошибки оценки ВСВ

Дальность центра ОА $D_0$ , м	Размер ОА по $\Delta D$ , м	Размер ОА по $\Delta \alpha$ , градус	Размер ОА по УМ $\Delta \beta$ , градус	СКО ГСВ $\sigma_{\Gamma}$ м/с на 600 м
Требуемый ВСВ – 0,5 м/с на 600 м				
1500,0	1500,0	23,00	17,00	0,0150
3000,0	1500,0	19,00	15,00	0,0145
10000,0	1500,0	17,00	14,50	0,0142
25000,0	1500,0	15,00	13,00	0,0338
30000,0	1500,0	13,00	13,00	0,0422
35000,0	1500,0	13,00	13,00	0,0482
40000,0	1500,0	13,00	13,00	0,0541
45000,0	1500,0	13,00	13,00	0,0600
50000,0	1500,0	13,00	13,00	0,0657
Требуемый ВСВ – 2,0 м/с на 600 м				
1500,0	1500,0	23,00	17,00	0,0249
3000,0	1500,0	19,00	15,00	0,0338

Дальность центра ОА $D_0$ , м	Размер ОА по $\Delta D$ , м	Размер ОА по $\Delta \alpha$ , градус	Размер ОА по УМ $\Delta \beta$ , градус	СКО ГСВ $\sigma_r$ м/с на 600 м
10000,0	1500,0	17,00	14,50	0,0510
25000,0	1500,0	15,00	13,00	0,1322
30000,0	1500,0	13,00	13,00	0,1661
35000,0	1500,0	13,00	13,00	0,1903
40000,0	1500,0	13,00	13,00	0,2142
45000,0	1500,0	13,00	13,00	0,2378
50000,0	1500,0	13,00	13,00	0,2610
Требуемый ВСВ – 4,0 м/с на 600 м				
500,0	1500,0	23,00	17,00	0,0431
3000,0	1500,0	19,00	15,00	0,0639
10000,0	1500,0	17,00	14,50	0,1013
25000,0	1500,0	15,00	13,00	0,2639
30000,0	1500,0	13,00	13,00	0,3318
35000,0	1500,0	13,00	13,00	0,3802
40000,0	1500,0	13,00	13,00	0,4281
45000,0	1500,0	13,00	13,00	0,4753
50000,0	1500,0	13,00	13,00	0,4918
Требуемый ВСВ – 6,0 м/с на 600 м				
1500,0	1500,0	23,00	17,00	0,0625
3000,0	1500,0	19,00	15,00	0,0947
10000,0	1500,0	17,00	14,50	0,1517
25000,0	1500,0	15,00	13,00	0,1956
30000,0	1500,0	13,00	13,00	0,2076
35000,0	1500,0	13,00	13,00	0,2701
40000,0	1500,0	13,00	13,00	0,3419
45000,0	1500,0	13,00	13,00	0,4128
50000,0	1500,0	13,00	13,00	0,4824
Требуемый ВСВ – 8,0 м/с на 600 м				
1500,0	1500,0	23,00	17,00	0,0823
3000,0	1500,0	19,00	15,00	0,1257
10000,0	1500,0	17,00	14,50	0,2022
25000,0	1500,0	15,00	13,00	0,2274
30000,0	1500,0	13,00	13,00	0,2633
35000,0	1500,0	13,00	13,00	0,3100
40000,0	1500,0	13,00	13,00	0,3558
45000,0	1500,0	13,00	13,00	0,3703
50000,0	1500,0	13,00	13,00	0,4431

Результаты анализа таблицы 3.8:

– в диапазоне значений интенсивности ВСВ на 30 м от не более 0.5 м/с до не менее 6.0 м/с и при дальности меньше или равно 45 км СКО оценки вертикального сдвига ветра меньше 0.5 м/с;

– в диапазоне значений интенсивности ВСВ на 30 м от больше 6 м/с при дальности больше 30 км.

– В МРЛК БАЗ при соблюдении условий ограничений по сферическим координатам размеров области анализа пространства, указанным в таблице 3.8 обеспечивается определение уровня градации опасности ВСВ на 30 м в соответствии с таблицей 2.5.

В МРЛК БАЗ дискретность цифровых данных для оценки ВСВ составляет 0,5 м/с на 30 метров.

В МРЛК БАЗ при соблюдении ограничений и на дальности до 45 км дискретность оценки вертикального сдвига ветра соответствует выдвинутым в работе требованиям не более 0,5 м/с в диапазоне значений интенсивности ВСВ на 30 м от не более 0,5 м/с до не менее 6,0 м/с.

В МРЛК БАЗ, при соблюдении ограничений, СКО оценки вертикального сдвига ветра составляет не более 15% от оцениваемой величины в следующих условиях:

– на дальности более 45 км и до 50 км при значении вертикального сдвига менее 6,0 м/с на 30 метров.

– на дальности более 30 км и до 50 км при значении вертикального сдвига более 6,0 м/с на 30 метров.

В МРЛК БАЗ, при соблюдении ограничений, на дальности до 50 км в диапазоне значений ВСВ на 30 метров от не более 0,5 м/с до не менее 6,0 м/с обеспечивается определение уровней градации опасности вертикального сдвига ветра по его интенсивности в соответствии с таблицей 2.5.

### **Выводы по 3 главе:**

В алгоритмическом обеспечении МРЛК БАЗ используется алгоритм радиальной скорости VVP, более приближенный к реальным атмосферным условиям по сравнению с другим существующим алгоритмом VAD,

предполагающий наличие горизонтальной однородности поля ветра. Оценка радиальной скорости по алгоритму VVP осуществляется в трёхмерном объёме.

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  $W$ . Выходные массивы алгоритма представляют собой оценки EDR в каналах дальности.

Для оценивания зон сдвигов ветра при сканировании формируются оценки ВСВ и ГСВ, для этого 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  $W$ .

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.

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.

В МРЛК БАЗ 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 покрывают требуемые диапазоны покрытия всех градаций турбулентности согласно требованиям ИКАО.

## **Глава 4. Разработка методик валидации метеоданных, рекомендаций по применению алгоритмов оценки опасных ветровых метеоявлений в секторном режиме метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны**

### **4.1 Разработка методик валидации метеорологических радиолокационных данных метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны**

Международные методики испытаний метеорологических радиолокаторов чаще всего заключаются в проверке только радиолокационной отражаемости [12], исходя из положения о том, что основные радиолокационные метеорологические продукты строятся на основании отражаемости. Однако большинство современных метеорологических радиолокаторов являются когерентными, т.е. кроме радиолокационной отражаемости и её интерпретаций (в карты верхней и нижней границы облачности, метеоявлений, интенсивности и количества осадков, водности) можно получить данные о ветровых характеристиках, в основе построения которых помимо  $Z$  присутствует  $V$  и  $W$ . Кроме того, Автор Настоящей работы считает, что по возможности необходима проверка всех получаемых метеорологических продуктов.

На территории Российской Федерации методиками проверки метеорологических радиолокационных продуктов занимается Центральная аэрологическая обсерватория (далее – ЦАО). В 2017 г. сотрудниками ЦАО была доработана методика валидации данных метеорологических радиолокаторов от 2014 года, в которую вошли следующие продукты [21]:

– данные о векторном поле скорости: указанная методика включает правила сопоставления с данными аэрологических станций. Автор Настоящей работы предлагает также использовать данные специализированных высотных мачт и вышек, а также результаты акустического зондирования;

– данные о турбулентности: указанная методика включает правила сопоставления с данными бортового журнала погоды. Иные достоверные источники данных о турбулентности, которые можно использовать при сопоставлении, отсутствуют. Тем не менее, в методике не приведена процедура сопоставления данных о турбулентности. Все нюансы сравнения турбулентности будут приведены в Настоящей работе.

Автор Настоящей работы базируется на подготовленных методических указаниях ЦАО с некоторыми коррективами. Кроме того, в источнике [21] нет информации (или информация недостаточна) о правилах сопоставления данных о выходных данных радиальной скорости: векторе смещения облачных образований, векторном поле скорости, ГСВ, ВСВ, EDR.

В настоящей главе приведена информация о предложенных Автором методиках проверки данных МРЛК БАЗ. Заметим, что некоторые основы сопоставления данных базируются на международных и отечественных методиках испытаний метеорологических радиолокаторов, рассмотренных выше.

В работе приведён перечень источников метеорологической информации, которые можно привлекать к сопоставлению данных.

Заметим, что в ходе непосредственной валидации данных методики сравнения метеорологической радиолокационной информации могут уточняться.

Под оправдываемостью будем понимать вероятность обнаружения МРЛК БАЗ явлений, либо зафиксированных достоверным источником информации, либо не зафиксированных достоверным источником, но обнаруженных при помощи источников дополнительной информации. Оправдываемость определения параметров и обнаружения явлений рассчитывается следующим образом:

$$P_{\text{опр}} = \frac{N}{N_{\text{э}}} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

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.

Вероятность неоправдавшихся явлений рассчитывается как:

$$P_{\text{неопр}} = 100\% - P_{\text{опр}} \quad (4.2)$$

Под ложными тревогами будем понимать наблюдавшиеся по данным МРЛК БАЗ явления, но не наблюдавшиеся по данным ни достоверных, ни дополнительных источников.

Явления относятся к ложным тревогам в том случае, если за указанный временной промежуток непосредственно на метеостанции оно наблюдалось по данным МРЛК БАЗ, но при этом не наблюдалось по данным ни достоверных, ни дополнительных источников.

Расчёт вероятности ложных тревог  $P_{\text{л.т.}}$  осуществляется по формуле (4.3):

$$P_{\text{л.т.}} = \frac{N_{\text{л.т.}}}{N_{\text{МРЛК БАЗ}}} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

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.

Для обработки статистических данных могут использоваться следующие источники метеорологической информации:

1) для сопоставления данных о векторном поле скорости могут привлекаться следующие источники информации:

- данные высотных мачт о скорости и направлении ветра (например, информация анеморумбометров, установленных на Останкинской телебашни или на Обнинской мачте [22-23]);

- данные акустических локаторов – содаров (информация о которых ограничена в открытом доступе, данные могут быть получены при согласовании, например, с Метеорологической обсерваторией МГУ [52]);

- данные бортового журнала погоды и/или сводки AMDAR (включают данные о ветре на этапах взлёта, посадки и по маршруту следования ВС, переданные экипажем ВС);

- данные аэрологического зондирования;

- данные сертифицированных локаторов сети Росгидромета [100-101] (в случае, если скорость и направление ветра сертифицированных локаторов являются провалидированными и корректными);

2) для сопоставления данных о вертикальном и горизонтальном сдвигах ветра, а также о турбулентности следует привлекать:

- данные бортового журнала погоды;

- данные сертифицированных локаторов сети Росгидромета [100-101] (в случае, если сдвиги ветра, турбулентность сертифицированных локаторов являются провалидированными и корректными);

3) для сопоставления данных о векторе смещения облачных образований следует использовать:

- данные сертифицированных локаторов сети Росгидромета [100-101] (в случае, если ВСО сертифицированных локаторов являются провалидированными и корректными);

- также корректность построения вектора смещения облачных образований можно подтвердить (или опровергнуть) путем расчета указанного вектора из данных самого МРЛК БАЗ – подробная информация приведена в п. 4.1.

Заметим, что нижеприведенная методика сопоставления данных, представленная в п. 4.1 включает в себя правила сопоставления данных МРЛК БАЗ



с теми источниками метеоинформации, которые в настоящий момент времени можно получить из достоверных источников.

Далее будем считать, что к достоверным источникам информации относятся результаты наблюдений наземных метеорологических станций (коды КН-01 или SYNOP, WAREP), в том числе аэрологических станций; бортовой журнал погоды; данные AMDAR.

К дополнительным источникам информации относятся данные контрольных МРЛС.

**Методика валидации векторного поля скорости.** Сравнение самолетных данных, данных аэрологического зондирования с данными МРЛК БАЗ о горизонтальном ветре проводится следующим образом.

Источником информации для сравнительной оценки (валидации) поля ветра являются самолетные измерения, которые передаются самолетами гражданской авиации в виде сводок AMDAR и поступают по каналам Глобальной Сети Телесвязи ВМО, и данные аэрологического зондирования. Из сводок AMDAR выбирается информация о координатах (широта, долгота и высота) и времени измерения (время UTC), направлении и скорости ветра.

Из сводок аэрологического зондирования выбирается информация о времени измерения (UTC), высоте, скорости и направлении ветра. Далее осуществляется осреднение данных аэрологического зондирования (далее – АЭ) для следующих диапазонов высот: 0-1000 м, 1000-2000 м, 2000-3000 м и т.д.

Данные МРЛК БАЗ о горизонтальной скорости и направлении ветра (в имеющемся высотном диапазоне 0 м – 20000 м и с шириной диапазона для каждого уровня, равной шагу 1000 м) отбираются в СПО при наведении курсора на рассматриваемый вектор ветра на выбранной высоте (векторы имеют вид стрелок с оперением, указывающих направление и скорость ветра), при этом в правом углу над цветовой шкалой отображается информация о высоте и параметрах горизонтального ветра.

На рисунке 4.1 показан пример отбора данных МРЛК БАЗ для сравнительного анализа параметров горизонтального ветра между информацией

AMDAR, аэрологических станций и МРЛК БАЗ. Чёрной окружностью показан рассматриваемый вектор с наведением на него курсора чёрного цвета. В чёрной рамке показана информация о высоте, горизонтальной скорости ветра (м/с), горизонтальном направлении ветра (°).

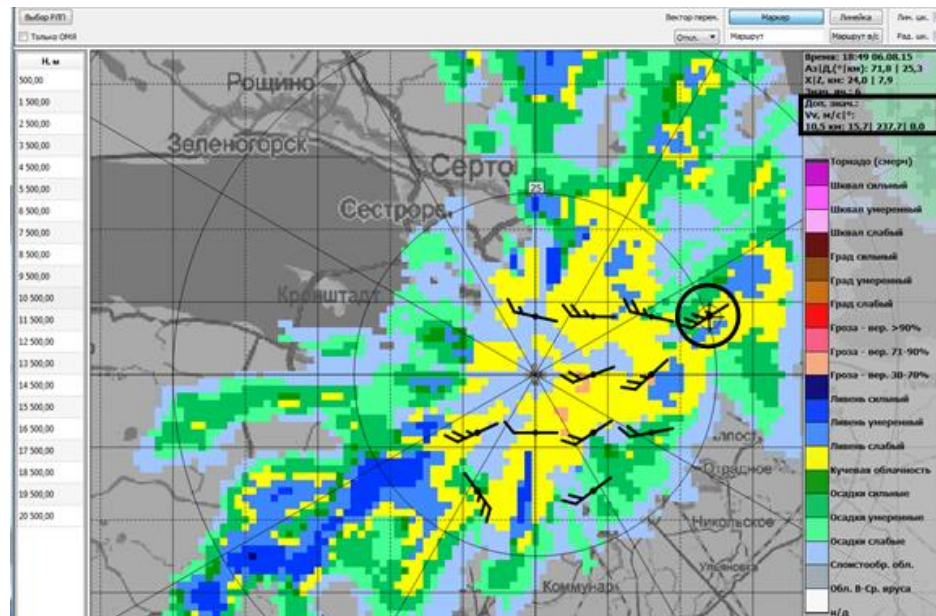


Рисунок 4.1 – Пример отбора информации о ГПВ по данным МРЛК БАЗ

Поскольку получение данных МРЛК БАЗ о горизонтальном ветре зависит от радиальной скорости, в настоящей методике были отобраны только те случаи ГПВ, для которых поле радиальной скорости перекрывает рассматриваемый узел сетки с горизонтальным вектором скорости и не менее 5 соседних узлов сетки (шаг между узлами сетки составляет 8 км), а в вертикальном сечении радиальная скорость имеется в вертикальном диапазоне  $\pm 500$  метров относительно высотного уровня рассматриваемого вектора горизонтальной скорости. Также рассматривалась карта отражаемости на предмет наличия радиоэха в узле сетки для рассматриваемого вектора и в вертикальном диапазоне  $\pm 500$  метров относительно высотного уровня рассматриваемого вектора горизонтальной скорости.

На рисунке 4.2 показан пример отбора ГПВ при вышеуказанном условии заполненности поля радиальной скорости в плоскости горизонтальной и

вертикальной. Чёрной линией показан маршрут вертикального сечения (само вертикальное сечение указано в левом нижнем углу), чёрным цветом показана сетка с соседними узлами белого цвета. Узел рассматриваемого вектора горизонтальной скорости показан чёрным цветом.

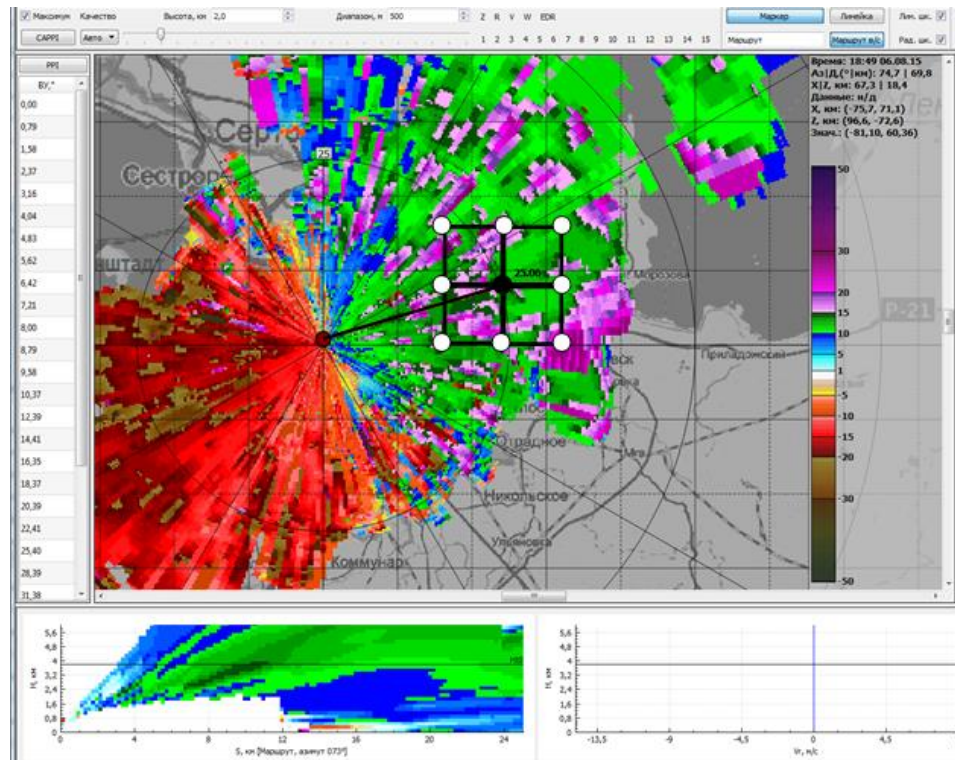


Рисунок 4.2 – Пример отбора ГПВ с использованием карты радиальной скорости

Согласование данных AMDAR, аэрологических станций и МРЛК БАЗ происходит в следующем порядке: если координаты самолетных измерений, радиозондов попадают в зону обзора МРЛК БАЗ с наличием радиозеха на соответствующем горизонтальном сечении (с учётом  $\pm 500$  метров относительно горизонтального сечения МРЛК БАЗ), то такие данные заносятся в форму отчётности. При этом измеренные значения характеристик ветра в точке по данным AMDAR, радиозонда сопоставляются со значениями горизонтальной скорости и направления ветра в ближайшем координатам AMDAR узле сетки. Данные измерений МРЛК БАЗ согласуются с самолетными измерениями, данными

радиозонда по времени следующим образом. Например, если имеется сводка AMDAR за время 18:50 UTC, то рассматривается обзор МРЛК БАЗ в период с 18:49 UTC по 18:56 UTC. В случае работы МРЛК БАЗ по установленному расписанию (с 02 до 09 минут, с 12 до 19 минут, с 32 до 39 минут, с 42 до 49 минут выбранного часа) принимается следующее правило сопоставления их с данными AMDAR. Наблюдениям AMDAR во время периодов 56-59 минут, 01-10 минут соответствует интервал МРЛК БАЗ 02-09 минут; периодам данных AMDAR 11-25 минут соответствует период МРЛК БАЗ 12-19 минут; для данных AMDAR во время интервалов 26-40 минут рассматриваются наблюдения МРЛК БАЗ в период 32-39 минуты; периодам наблюдений AMDAR 41-55 минут соответствует временной обзор МРЛК БАЗ 42-49 минуты.

Для сформированных выборок разности скорости и направления ГПВ рассчитывается математическое ожидание  $m$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma$ . Полученные величины  $m$  и  $\sigma$  должны удовлетворять заданным требованиям.

Также заметим, что в отдельных случаях наличия вихревого процесса величины векторов по данным AMDAR, аэрологических станций и МРЛК БАЗ могут сильно различаться по причине быстро изменяющегося поля ветра, и, следовательно, указанные случаи могут быть исключены из выборки. Изделие считается выдержавшим проверку, если в результате оценки подтверждается несмещённость скорости (отклонение по модулю не более 3 м/с) и направления (отклонение по модулю не более 15 градусов) ветра [1].

**Методика валидации горизонтального и вертикального сдвигов ветра ГСВ и ВСВ, турбулентности EDR.** Для сравнения данных о ГСВ, ВСВ, EDR по достоверным, дополнительным источникам информации и данным МРЛК БАЗ рассматриваются плоские карты, вертикальные сечения данных об указанных явлениях МРЛК БАЗ с наличием радиоэха и отражаемости в по горизонтали и вертикали в рассматриваемых зонах за указанный промежуток времени.

В качестве достоверного источника информации для валидации данных об указанных явлениях МРЛК БАЗ используются сведения о ВСВ и турбулентности согласно данным Журнала бортовой погоды (далее – ЖБП) на этапе набора высоты

при взлёте и снижения высоты при посадке ВС, ГСВ экипажем ВС не регистрируется [87]. В ЖБП указываются дата, время, номер борта или номер рейса, наблюдаемое явление, местоположение наблюдаемого явления (населённый пункт или какой-то ориентир в пространстве), эшелон полёта (или диапазон высот, где наблюдаются вертикальный сдвиг ветра и турбулентность).

С учетом времени и высоты (эшелона) полета ВС проводится сопоставление данных о сдвиге ветра и/или турбулентности, переданных ВС с рассчитанными и представленными на картах МРЛК БАЗ в этот же период времени и точке пространства.

Расчёт положения ВС, экипаж которого вносит данные о вышеуказанных явлениях в ЖБП, производится следующим образом: зная высотный диапазон или эшелон, можно рассчитать положение ВС и, как следствие, положение наблюдаемых явлений, на этапе набора высоты при взлёте или снижения высоты при заходе на посадку – рисунок 4.3.

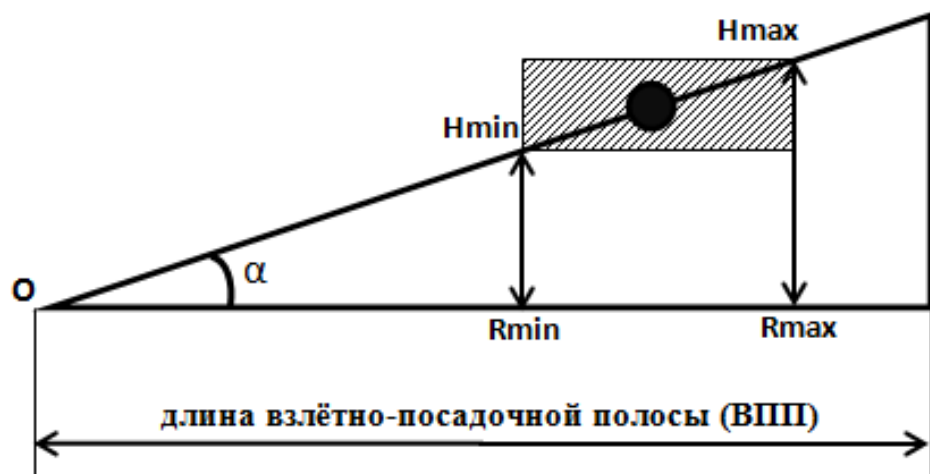


Рисунок 4.3 – Пример расчёта положения наблюдаемых явлений на этапе набора/снижения высоты ВС

На рисунке 4.3 окружностью чёрного цвета показано ВС; заштрихованным прямоугольником показана интересующая зона сравнения указанных явлений по

данным МРЛК БАЗ и ЖБП;  $\alpha$  – угол наклона глиссады; О - точка приземления ВС;  $H_{min}$  – нижний уровень высотного диапазона, указанного в ЖБП, где наблюдаются указанные явления;  $H_{max}$  – верхний уровень высотного диапазона, указанного в ЖБП, где наблюдаются указанные явления;  $R_{min}$  – проекция  $H_{min}$  на ВПП;  $R_{max}$  – проекция  $H_{max}$  на ВПП.

Зная значение угла  $\alpha$ ,  $H_{min}$ ,  $H_{max}$ , находятся отрезки  $[OR_{min}]$  – формула (4.4),  $[OR_{max}]$  – формула (4.5) при помощи тригонометрической функции тангенса и  $[R_{min}R_{max}]$  – формула (4.6). Величина отрезков интересующей зоны сравнения указанных явлений (сторон заштрихованного прямоугольника) равна разности  $H_{max}$ ,  $H_{min}$  и отрезку  $[R_{min}R_{max}]$ .

$$[OR_{max}] = \frac{[H_{max}R_{max}]}{tg\alpha} \quad (4.4)$$

$$[OR_{min}] = \frac{[H_{min}R_{min}]}{tg\alpha} \quad (4.5)$$

$$[R_{min}R_{max}] = [OR_{max}] - [OR_{min}] \quad (4.6)$$

В качестве дополнительного источника информации для сравнения наблюдений ГСВ, ВСВ, турбулентности по данным МРЛК БАЗ рассматриваются данные МРЛС. В ПО ВОИ «ГИМЕТ» МРЛС турбулентность определяется как скорость диссипации турбулентной энергии  $[\xi] = 1 \text{ см}^2/\text{с}$ ; в специальном программном обеспечении (далее – СПО) МРЛК БАЗ турбулентность характеризуется EDR (корень кубический из скорости диссипации турбулентной энергии)  $[\varepsilon] = 1 \text{ м}^{2/3} \text{ с}^{-1}$  согласно [55]. Градация скорости диссипации турбулентной энергии и EDR отображена в таблице 4.1. Сравнение параметров турбулентности по данным МРЛК БАЗ и МРЛС производится с использованием качественных характеристик турбулентности, наличие турбулентности (наблюдается/не наблюдается) соответствует пороговому значению не менее слабой степени

интенсивности (или нижнему порогу слабой степени интенсивности) характеристики турбулентности.

Таблица 4.1 – Градация скорости диссипации турбулентной энергии и удельной скорости диссипации турбулентной энергии

характеристика турбулентности	$\xi$ , см <sup>2</sup> /с	$\epsilon$ , м <sup>2/3</sup> с <sup>-1</sup>
слабая	0-10	0.1-0.4
умеренная	10-100	0.4-0.7
сильная	100-400	0.7-1.0..3.0
чрезвычайная	>400	>1.0..3.0

Расчёт оценки оправдываемости, вероятности ЛТ ГСВ и ВСВ, EDR производится по формулам (4.1)-(4.3), изложенным в п.4.1 настоящей работы.

Сопоставление достоверных, дополнительных источников с данными МРЛК БАЗ проводится в следующем порядке:

Пространственное сопоставление разных видов информации о наблюдениях за вертикальным, горизонтальным сдвигами ветра, турбулентностью:

– В случае регистрации экипажем ВС вертикального сдвига ветра при наборе высоты или снижении, случай по данным МРЛК БАЗ считается оправдавшимся, если указанная в ЖБП область сдвига ветра полностью или частично включена в область ячейки с вертикальным сдвигом ветра на плоской карте МРЛК БАЗ.

– В случае обнаружения зон турбулентности по достоверным данным и данным МРЛК БАЗ на соответствующих маршруту взлёта/посадки ВС плоских картах и вертикальных сечениях МРЛК БАЗ в интересующей зоне сравнения указанных явлений (рисунок 4.3) с учётом +/- 500 метров от  $H_{max}$  и  $H_{min}$  соответственно за указанный временной промежуток, случай считается оправдавшимся, в противном случае - неоправдавшимся.

– Для сопоставления указанных явлений по данным МРЛК БАЗ и дополнительному источнику рассматриваются значения турбулентности, ГСВ, ВСВ на основе плоской карты, для валидации турбулентности – также на основе вертикальных срезов одинаковой длины и одинакового азимута, приведённых для одной и той же местности.

При условии обнаружения рассматриваемых явлений по данным МРЛК БАЗ и МРЛС и их соответствия друг другу полностью или частично по пространству за указанный временной промежуток по горизонтали и вертикали (с учётом  $\pm 500$  метров) случай является оправдавшимся, иначе – неоправдавшимся.

Качественное сопоставление разных видов информации о наблюдениях за вертикальным, горизонтальным сдвигами ветра, турбулентностью:

– В случае обнаружения различных значений ГСВ и ВСВ по данным МРЛК БАЗ, при сопоставлении с достоверным источником информации о ВСВ и с дополнительным источником о ГСВ, ВСВ рассматриваются только качественные характеристики (наблюдается/не наблюдается).

При этом под наблюдаемым ВСВ и ГСВ будем понимать те случаи, для которых они по данным МРЛК БАЗ и дополнительного источника информации превышает значение  $2 \text{ с}^{-1}$  (указанное значение может быть уточнено в ходе непосредственной оценки оправдываемости горизонтального и вертикального сдвигов ветра).

Случай считается оправдавшимся, если по времени и пространству соответствует наблюдаемому случаю по данным достоверных источников.

– В случае обнаружения различных значений EDR по данным МРЛК БАЗ, при сопоставлении с достоверными и дополнительными источниками указанных явлений рассматриваются только качественные характеристики турбулентности (наблюдается/не наблюдается).

При этом под наблюдаемой турбулентностью по данным МРЛК БАЗ будем понимать те случаи, для которых значение удельной скорости диссипации турбулентной энергии превышает установленное нижнее пороговое значение слабой степени интенсивности  $\varepsilon=0.1 \text{ м}^{2/3} \text{ с}^{-1}$  (заметим, что пороговое значение



может уточняться при непосредственном расчёте оценки оправдываемости турбулентности).

За наблюдаемые по картам МРЛС случаи турбулентности будем принимать те случаи, для которых значение турбулентности превышает величину, эквивалентную  $0.1 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$  и равную  $0 \dots 10 \text{ см}^2/\text{с}$  (слабая степень интенсивности).

В случае регистрации экипажем ВС турбулентности определённой степени интенсивности, случай относится к наблюдаемой турбулентности (турбулентность наблюдается), в противном случае – не наблюдается.

Случай считается оправдавшимся, если по времени и пространству соответствует наблюдаемому случаю по данным достоверных источников.

– В случае обнаружения указанных явлений по данным МРЛК БАЗ по маршруту взлёта/посадки ВС, но не обнаруженных экипажем ВС, используются дополнительные источники информации. В случае подтверждения данными МРЛС наблюдений за указанными явлениями по данным МРЛК БАЗ, случай считается подтверждённым.

– В случае не подтвердившихся случаев по данным МРЛК БАЗ ни достоверной информацией, ни дополнительной информацией, случай входит в выборку «ложные тревоги».

Временное сопоставление разных видов информации о наблюдениях за ГСВ, ВСВ, турбулентностью:

– Данные измерений МРЛК БАЗ согласуются с достоверными измерениями по принципу, изложенному в п.4.1 настоящей работы.

– Как было указано в п.4.1 настоящей работы при временном сопоставлении данных МРЛК БАЗ и дополнительных источников следует рассматривать временные промежутки, соответствующие друг другу с учётом  $\pm 2$  минуты, в противном случае циклы между собой не сравниваются.

Далее осуществляется расчёт оправдываемости и вероятности ЛТ по формулам (92)-(94), приведенным в п. 4.1 настоящей работы.

Для определения качества классификации сдвигов ветра, турбулентности по данным МРЛК БАЗ в соответствии с п.8.1.3. [20] рассматриваются следующие значения критериев качества по оправдываемости  $R_{\text{ОПР}}$ :

- $R_{\text{ОПР}} \geq 70\%$  – удовлетворительно;
- $R_{\text{ОПР}} \geq 80\%$  – хорошо;
- $R_{\text{ОПР}} \geq 90\%$  – отлично.

Для вероятности ложных тревог используется значение критерия  $R_{\text{Л.Т}} \leq 20\%$  - отлично,  $R_{\text{Л.Т}} \leq 30\%$  - хорошо,  $R_{\text{Л.Т}} \leq 40\%$  – удовлетворительно (или «зачтено»),  $R_{\text{Л.Т}} > 40\%$  – неудовлетворительно («не зачтено») в соответствии с п. 11.2 [21].

Изделие считают выдержавшим проверку, если вероятность ложных тревог не превышает значения 40%, а значение оправдываемости не ниже 70%.

**Методика валидации вектора смещения облачных образований.** Для получения данных о векторе смещения облачных образований используется штатный инструмент работы МРЛК БАЗ «Линейка» для определения величины и направления перемещения зон метеорологических явлений (далее – МЯ).

Выбираются три различных точки не менее двух характерных зон на двух последующих обзорах со следующими условиями:

- выбираются случаи с заполненностью карты МЯ не менее 20% без вихревого процесса и без значительной трансформации зон метеорологических явлений во времени;
- зоны МЯ выбираются с использованием цветовой кодировки как можно более высокие по классу (индекс в цветовой шкале должен иметь наибольшее значение).

Значение скорости перемещения получают путем расчета из значения перемещения в метрах с дискретностью до десятков и значения длительности обзора в секундах, полученного по разнице времени обзоров в списке базы данных.

Определяется разность значений скорости смещения МЯ между полученными средними значениями и значениями по доплеровским данным из статистики по зоне обзора. Единицы измерения должны быть одинаковыми.

Затем строится диаграмма разностей оценок обоих параметров. По диаграмме графическим методом для 95% выборки оценивается характер и величина случайной составляющей разброса оценки скорости перемещения. Затем проводится качественный анализ полученных данных. Анализ включает в себя подтверждение несмещённости оценок скорости и направления перемещения.

Изделие считается выдержавшим проверку, если в результате оценки подтверждается несмещённость скорости (отклонение по модулю не более 3 м/с) и направления (отклонение по модулю не более 15 градусов) перемещения облачных образований [1].

#### 4.2 Анализ результатов валидации метеорологических радиолокационных данных метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны, полученных в ходе испытаний

В настоящей главе приведены материалы валидации МРЛК БАЗ. В организации АО «Бортовые аэронавигационные системы» (далее – АО «БАНС») по прототипу МРЛК БАЗ был создан метеорологический радиолокационный комплекс БАЗ, который в настоящее время прошёл предварительные, приёмочные, сертификационные испытания и опытную эксплуатацию. Автор, как участник указанных испытаний и опытной эксплуатации, впервые освещает результаты валидации РМД МРЛК БАЗ с другими источниками метеорологической информации.

В п. 4.2 приведены результаты валидации ветровых характеристик МРЛК БАЗ (векторное поле скорости и вектор смещения облачных образований), начальными данными для которых являются значения радиолокационной

отражаемости и радиальной скорости.

В ходе сбора статистических данных было выявлено, что оценки ГСВ, ВСВ, EDR нереализуемы ввиду особенностей сопоставления данных двух измерителей по пространству и времени, поэтому была осуществлена оценка определения EDR (раздел 3.1) и сдвигов ветра (раздел 3.2). Для обработки статистических данных были использованы следующие источники метеорологической информации:

- 1) при сопоставлении данных о векторном поле скорости привлекались:
  - данные бортового журнала погоды в виде сводок AMDAR (включают данные о ветре на этапах взлёта, посадки и по маршруту следования ВС, переданные экипажем ВС);
  - данные аэрологического зондирования из открытого источника [100].
- 2) корректность построения вектора смещения облачных образований подтверждалась путем расчета указанного вектора из данных самого МРЛК БАЗ.

**Результаты валидации векторного поля скорости.** Для сравнения ГПВ по данным аэрологического зондирования АЭ п. Долгопрудный и МРЛК БАЗ г. Красногорск осуществлялось сопоставление информации согласно п.4.1 настоящей работы.

Пункты размещения МРЛК БАЗ и АЭ показаны на рисунке 4.4. В приложении Б таблице Б.1 показан расчёт разности значений ГПВ по данным АЭ и МРЛК БАЗ, при этом выборка является статистически значимой - объём выборки составил 228 случаев.

В результате анализ ГПВ по данным АЭ и МРЛК БАЗ показал, что  $m = -0.32$  м/с (для разности скорости ветра),  $\sigma = 4.70$  м/с, что удовлетворяет требованиям согласно источнику [1] ( $m < 2.5$  м/с и  $\sigma < 5$  м/с с);  $m = -1.34^\circ$  (для разности направления ветра),  $\sigma = 35.77^\circ$ , что удовлетворяет требованиям согласно источнику [1] ( $m < 30^\circ$  и  $\sigma < 45^\circ$ ). Результаты валидации продемонстрированы также в работе автора [24].

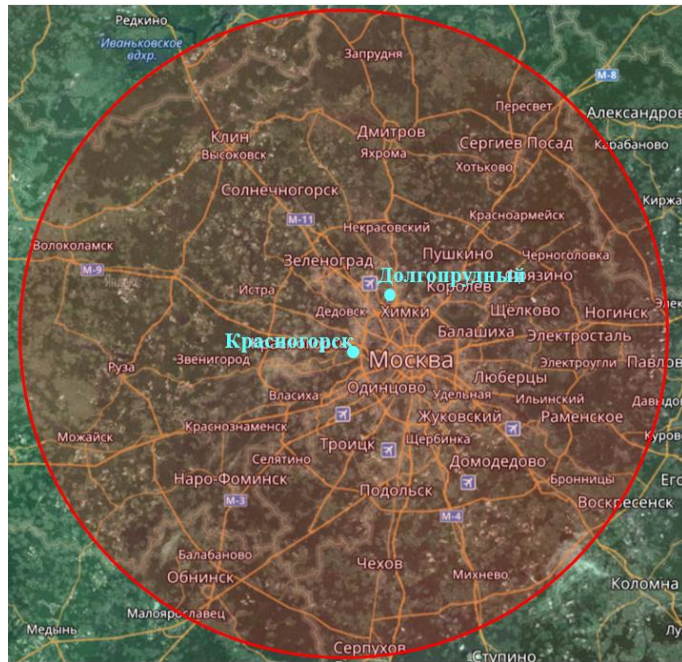


Рисунок 4.4 – Размещение МРЛК БАЗ п. Красногорск с дальностью действия 100км (продемонстрировано красным кругом) и АЭ «Долгопрудный»

На рисунках 4.5-4.14 продемонстрированы профили скорости и направления ветра по данным АЭ и МРЛК БАЗ (по оси у указана середина высотного слоя толщиной 1 км).

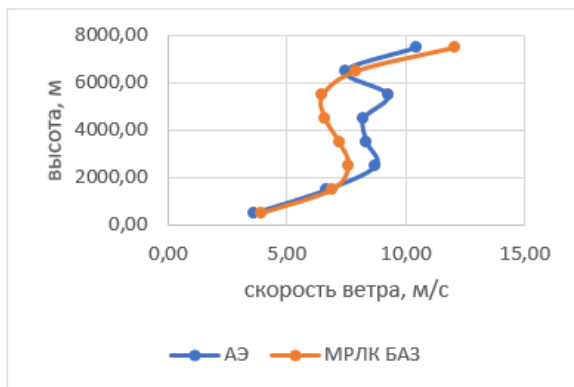


Рисунок 4.5 – Профили скорости ветра АЭ и МРЛК БАЗ 15.05.2018 г. 12:00 UTC

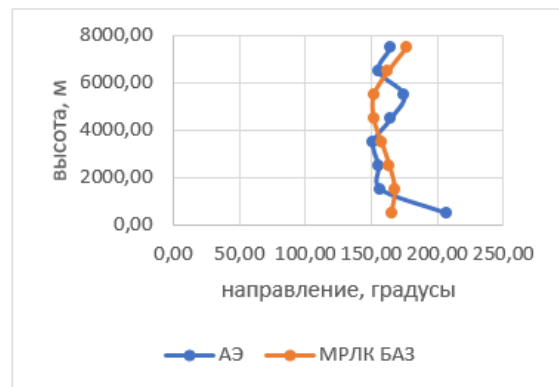


Рисунок 4.6 – Профили направления ветра АЭ и МРЛК БАЗ 15.05.2018 г. 12:00 UTC

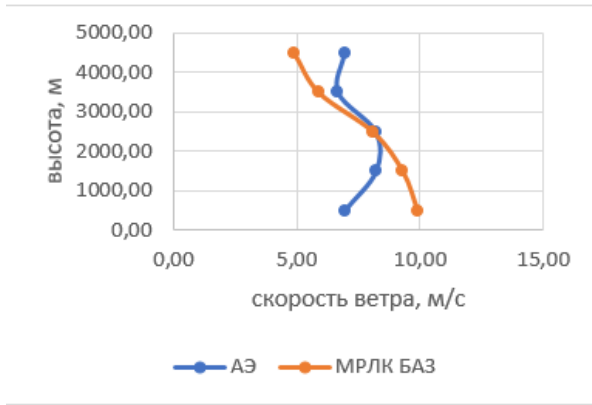


Рисунок 4.7 – Профили скорости ветра АЭ и МРЛК БАЗ 09.07.2018 г. 12:00 UTC

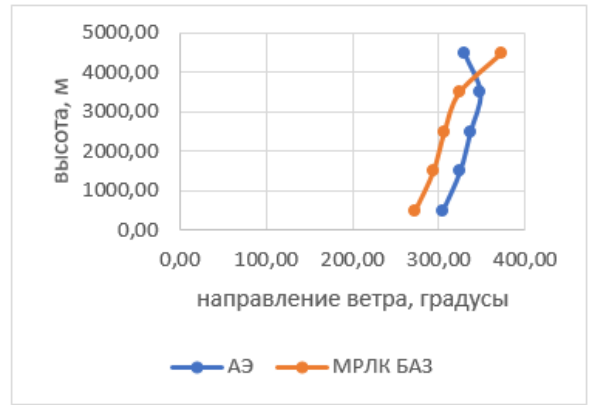


Рисунок 4.8 – Профили направления ветра АЭ и МРЛК БАЗ 09.07.2018 г. 12:00 UTC

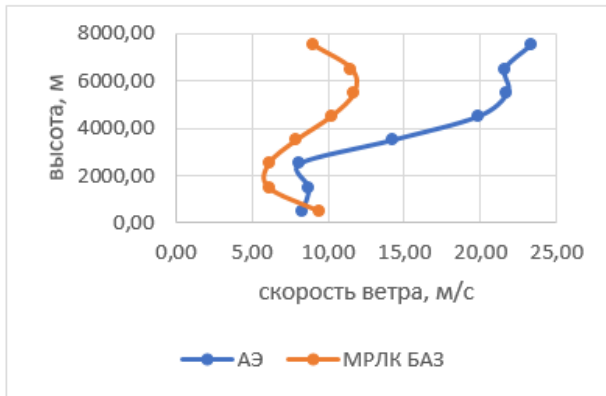


Рисунок 4.9 – Профили скорости ветра АЭ и МРЛК БАЗ 05.08.2018 г. 12:00 UTC

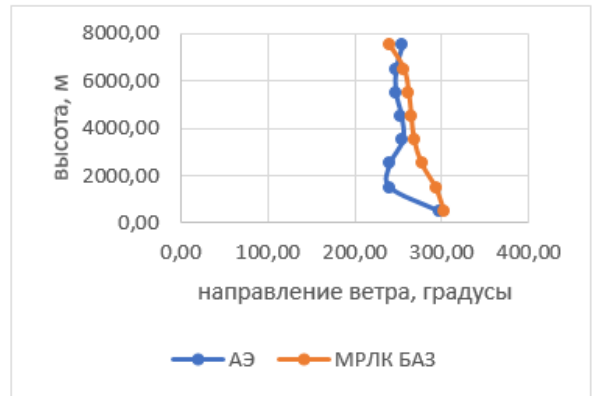


Рисунок 4.10 – Профили направления ветра АЭ и МРЛК БАЗ 05.08.2018 г. 12:00 UTC

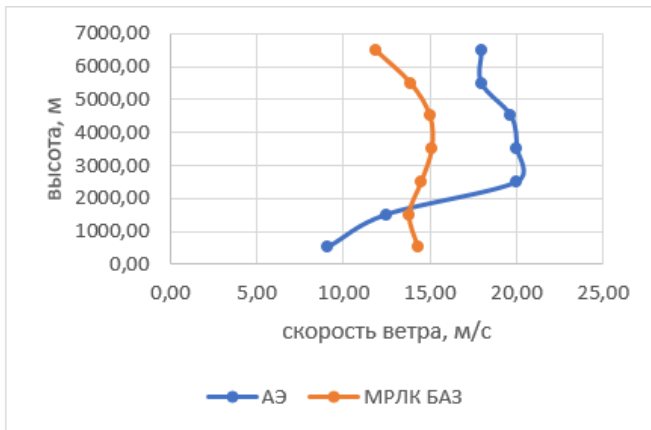


Рисунок 4.11 – Профили скорости ветра АЭ и МРЛК БАЗ 15.08.2018 г. 12:00 UTC

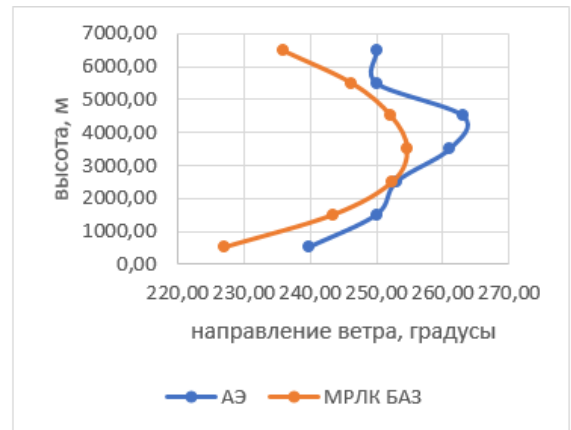


Рисунок 4.12 – Профили направления ветра АЭ и МРЛК БАЗ 15.08.2018 г. 12:00 UTC

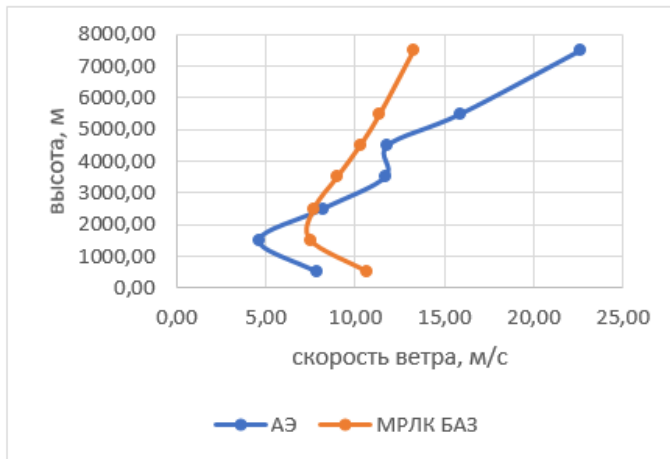


Рисунок 4.13 – Профили скорости ветра АЭ и МРЛК БАЗ 16.09.2018 г. 12:00 UTC

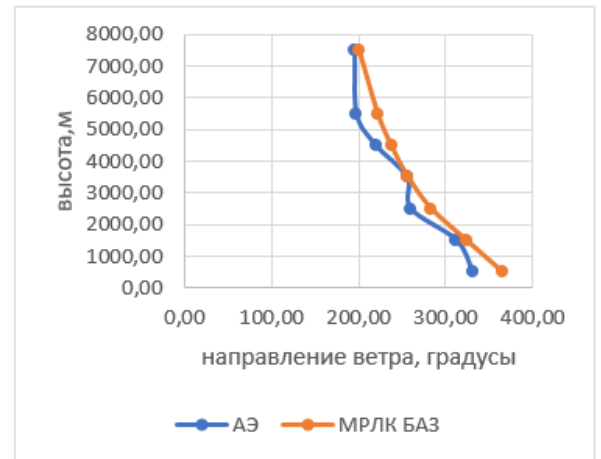


Рисунок 4.14 – Профили направления ветра АЭ и МРЛК БАЗ 16.09.2018 г. 12:00 UTC

Кроме того, для анализа ГПВ дополнительно рассматривались данные МРЛК БАЗ (в г. Санкт-Петербург) и данные AMDAR (а. Пулково). Валидация ГПВ проводилась по методике валидации, отражённой в п. 4.1 настоящей работы, результаты валидации также показаны в работе автора [24].

Пункты размещения МРЛК БАЗ и а. Пулково показаны на рисунке 4.15:



Рисунок 4.15 – Размещение МРЛК БАЗ с дальностью действий 100 км в г. Санкт-Петербург (чёрная окружность) и аэродрома Пулково (выделено красным цветом)

В приложении Б таблицы Б.2 приведён расчёт ГПВ по данным AMDAR и МРЛК БАЗ. Заметим, что объём выборки статистически незначимый по причине особенностей пространственного и временного данных МРЛК БАЗ и AMDAR.

Таким образом, для скорости ветра среднее значение  $m=1.66$  м/с, что отвечает требованиям согласно источникам [1,55] ( $m<3$  м/с); среднее значение разности направления ветра  $\sigma=14.51^\circ$ , что что отвечает требованиям согласно источникам [1,55] ( $\sigma<30^\circ$ ).

**Результаты валидации вектора смещения облачных образований.** Автоматически полученные данные о векторе смещения облачных образований МРЛК БАЗ были сопоставлены с рассчитанными значениями МРЛК БАЗ из величины перемещения облачных образований в метрах с дискретностью до десятков и значения длительности обзора в секундах, полученного по разнице времени обзоров в списке базы данных в соответствии с 4.1 настоящей работы. Место размещения МРЛК БАЗ – аэродром Орловка (Тверская область). База статистических данных для сравнения ВСО по данным МРЛК БАЗ представлена в таблице Б.3 приложения Б. Результаты валидации также представлены в работе автора [24].

По полученным данным таблицы Б.3 приложения Б были построены диаграммы разностей ВСО МЯ, по оси абсцисс – скорость и направление ВСО, по оси ординат – отклонение скорости и направления ВСО (рисунки 4.16-4.17 соответственно).

Таким образом, средняя оценка смещения скорости ВСО равна минус 0.75 м/с, направления ВСО – минус  $0.05^\circ$ . Полученные величины смещения ВСО по модулю составляют <10% значений оцениваемых параметров. Таким образом, в полученных оценках ВСО МЯ по данным МРЛК БАЗ отсутствует несмещённость. 95% значений в полученной выборке удовлетворяют современным требованиям, изложенным в источниках [1,55] – отклонение по скорости ветра  $\pm 3$  м/с при скорости 15 м/с и  $\pm 20\%$  от значений скорости перемещения МЯ при скорости выше 15 м/с, отклонение по направлению ветра  $\pm 30^\circ$ .



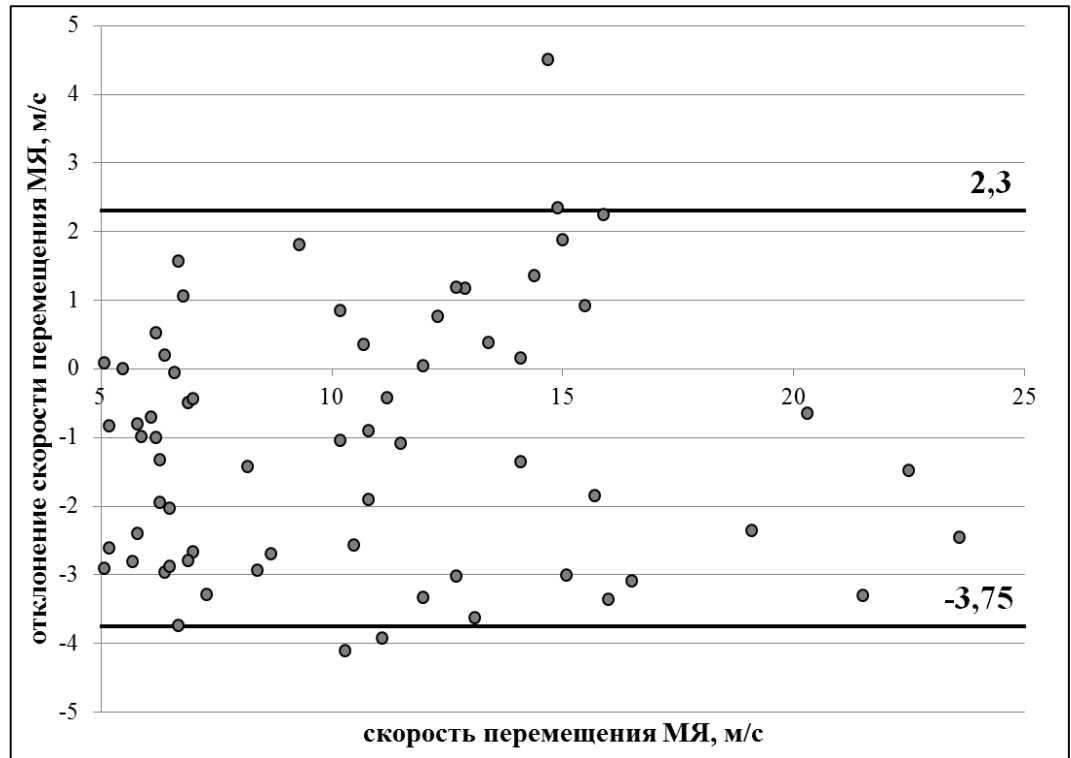


Рисунок 4.16 – Диаграмма разностей оценок скорости ВСО МЯ

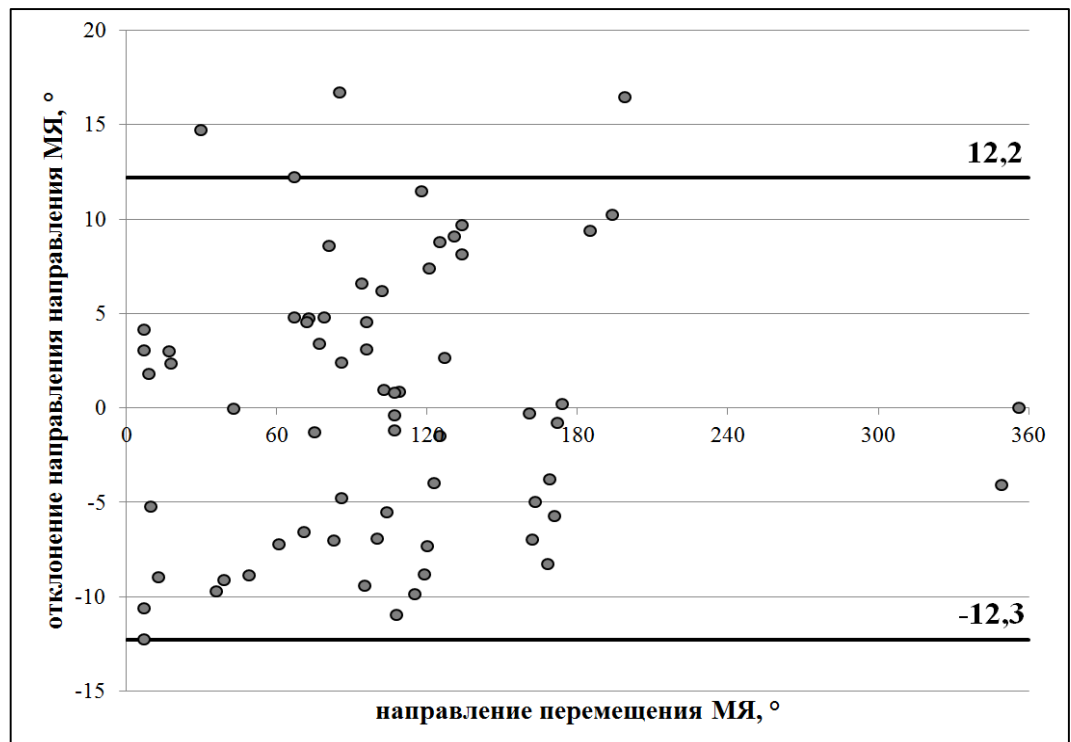


Рисунок 4.17 – Диаграмма выборки разностей оценок направления перемещения МЯ в зависимости от их значения по данным карты МЯ

**Анализ полученных результатов валидации метеорологических радиолокационных данных.** Для тёплого и холодного периодов года был организован сбор данных МРЛК БАЗ для оценки эффективности его работы.

Объём рассмотренных выборок, использованные в оценке работы МРЛК БАЗ, показан в таблице 4.2 и в работе автора [24].

Таблица 4.2 – Размер выборки для оценки эффективности работы МРЛК БАЗ

№ п/п	Наименование	Число случаев
1	Выборка оценки качества построения ГПВ (АЭ и МРЛК БАЗ)	228
2	Выборка для анализа качества оценки ВСО по радиальной скорости	66
3	Выборка для оценки качества построения ГПВ (AMDAR и МРЛК БАЗ)	10

Результаты обработки статистических данных МРЛК БАЗ для разных сезонов года показаны в таблице 4.3 и в работе автора [24].

Таблица 4.3 – Результаты обработки данных МРЛК БАЗ для тёплого и холодного периодов года

№	Наименование	Значение
1	Среднее значение разности скорости ветра ГПВ (АЭ-МРЛК БАЗ), м/с	-0.32
2	Среднее значение разности направления ветра ГПВ (АЭ-МРЛК БАЗ), °	1.34
3	Среднее значение разности скорости ветра ГПВ (AMDAR-МРЛК БАЗ), м/с	1.66
4	Среднее значение разности направления ветра ГПВ (AMDAR-МРЛК БАЗ), °	14.51
5	Пределы ошибок в оценках скорости ВСО по доплеровским данным	не более ±3 м/с

№	Наименование	Значение
6	Среднее значения смещения оценок ВСО	0.75 м/с (оценка скорости несмещённая)
7	Пределы ошибок в оценках направления ВСО по доплеровским данным	не более $\pm 30^\circ$
8	Среднее значения смещения оценок направления ВСО	-0.05°(оценка направления несмещённая)

Таким образом, МРЛК БАЗ обеспечивает качество построения карт ГПВ, оценку направления и скорости перемещения ВСО, соответствуя требованиям [1,20-21,55,58-59].

Таким образом, на основании проведённого анализа, можно сделать статистически обоснованный вывод о приемлемом качестве работы малогабаритного МРЛК БАЗ.

#### 4.3 Разработка практических рекомендаций и концепции применения алгоритмов оценки опасных ветровых метеоявлений в секторном режиме метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны

МРЛК БАЗ проводит измерения ряда основных параметров погодных явлений, основываясь на физических особенностях распространения в атмосфере импульсного сверхвысокочастотного излучения.

Настройки пространственного разрешения МРЛК БАЗ задаются программным образом в разделе «Настройки», либо в виджетах конических сечений. МРЛК БАЗ позволяет определить максимальную высоту верхней границы радиоэха с разрешением, задаваемым программным способом в диапазоне от 0 до 20 километров по высоте.

Для обзорного и секторного режимов работы СПО МРЛК БАЗ настройка виджетов является идентичной.

Основной выходной инструмент работы СПО – карта распределения метеоявлений (рисунок 4.18). О наличии опасных явлений погоды (ОЯ) оператора предупреждает активный красный индикатор «ОПАСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ», расположенный в правом верхнем углу виджета. Индикатор не активен при отсутствии ОЯ (рисунок 4.18).

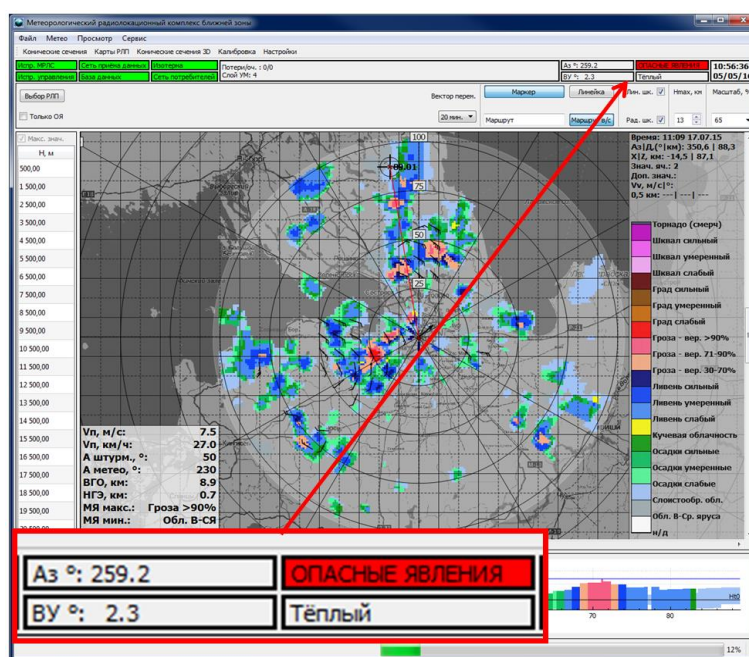


Рисунок 4.18– Карта распределения метеоявлений, индикатор «ОПАСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ», главный виджет

Метеоявления представлены в 19 цветовых градациях, зависят от сезона наблюдений.

После каждого цикла наблюдений производится расчёт скорости и направления ВСО в поле обзора локатора. Вектор перемещения отображается в центре поля. На рисунке 4.19 данный вектор выделен красным прямоугольником.

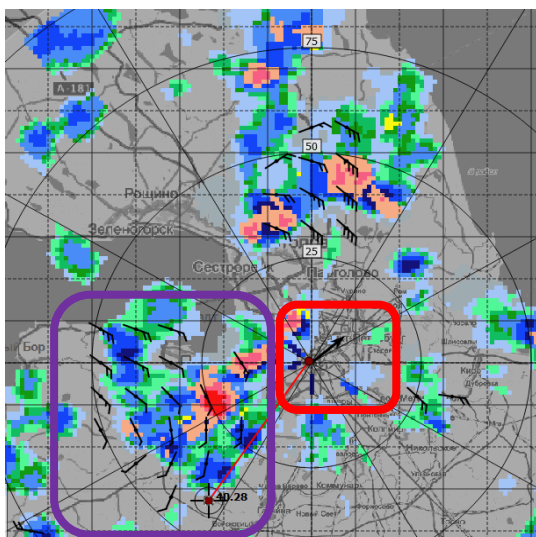


Рисунок 4.19– Отображение вектора перемещения облачных масс

Кроме осреднённого направления переноса облачных масс по всей зоне обзора локатора в зоне каждого облачного образования по регулируемой сетке рассчитываются и отображаются скорость и направление ветра (фиолетовый прямоугольник на рисунке 4.19).

В центральной части главного виджета расположен индикатор кругового обзора (ИКО), для которого в качестве подложки использована картографическая основа местности, в которой расположен локатор. На ИКО главного виджета всегда отображается информация последнего цикла обзора, выполненного локатором.

В верхней части виджета располагается главное меню программы. Под главным меню располагается блок функциональных кнопок быстрого доступа.

Слева вертикально вдоль поля ИКО расположена линейка высот с активным значением высоты уровня, по которому выполнено отображение информации на главном виджете.

Ниже ИКО располагается диаграмма вертикального сечения МЯ вдоль заданного маршрута.

В левом нижнем углу ИКО расположен информационный формуляр с данными об отображённых показателях – скорость переноса воздушных масс (ВМ) в м/с и в км/час, направление переноса ВМ метеорологическое и штурманское, высота верхней границы облачности и нижней границы радиоэха, минимальное и

максимальное (по уровню опасности) зафиксированное метеоявление (рисунок 4.20).

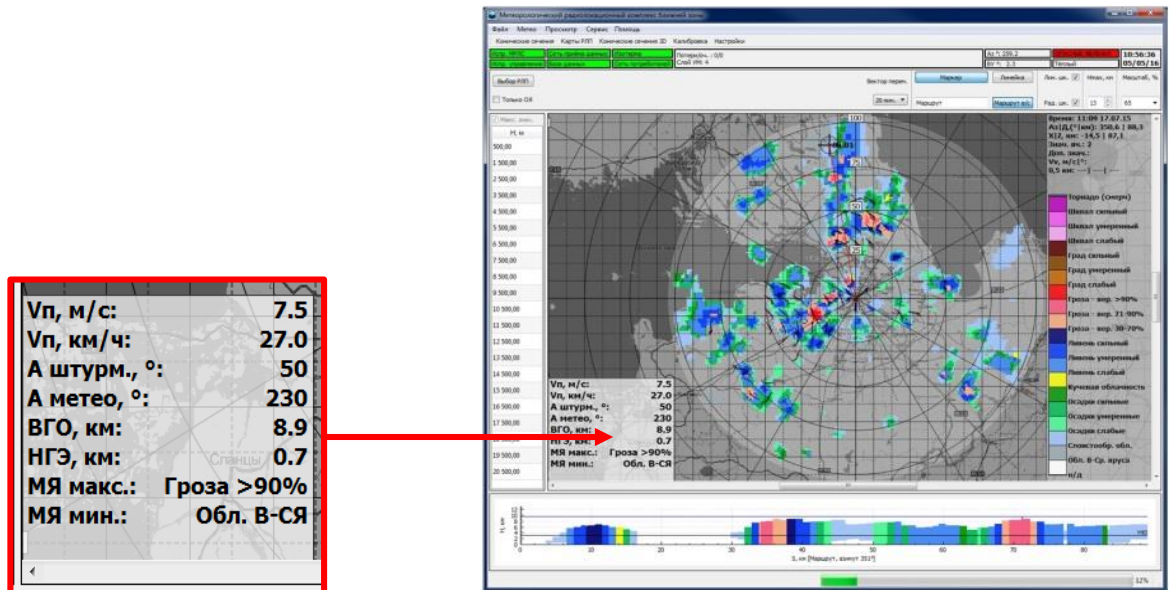


Рисунок 4.20 – Расположение информационного формуляра на главном виджете программы

Справа вдоль поля ИКО расположена цветовая шкала для оценки отображаемой информации (рисунок 4.20). Цветовые значения и их градация зависят от вида отображаемой радиолокационной информации.

Выше цветовой шкалы располагается информационный формуляр, в котором зафиксированы данные параметров в точке, на которую установлен маркер (рисунок 4.20).

Пункт «Калибровка» выпадающего меню «Метео» предназначен для установки высоты нулевой изотермы и высоты тропопаузы, а также выбора алгоритма для определения скорости перемещения облачных образований. При нажатии на раздел меню «Калибровка» открывается формуляр «Калибровка обработки данных» (рисунок 4.21).

Для получения корректных данных в разрабатываемом МРЛК БАЗ, необходимо вводить значения высоты нулевой изотермы (далее -  $H_{t0}$ ), либо при отсутствии её значений вводить данные приземной температуры, а далее

производить расчёт высоты нулевой изотермы в условиях стандартной атмосферы (т.е. с расчётом того, что каждые 100 метров температура воздуха снижается на  $0.65^{\circ}\text{C}$ ). Таким образом, в специальном программном обеспечении МРЛК БАЗ будут возможны два варианта ввода величины высоты нулевой изотермы, а именно: непосредственный ввод известного значения  $H_{t0}$  и пересчёт из значений приземной температуры в высоту нулевой изотермы.

Для получения корректных данных в разрабатываемом МРЛК БАЗ, необходимо вводить значения высоты тропопаузы, актуальные данные которой в виде карт высотной топографии находятся в свободном доступе [35].

Примечания:

1. данные о высоте нулевой изотермы следует получить из метеорологического источника - аэрологической станции, либо температурного профилометра;

2. данные о приземной температуре (при отсутствии данных аэрологических станций для рассматриваемого региона) следует получить из следующих источников: наземные метеорологические станции или автоматические метеорологические станции.

Блок «Скорость перемещения» предназначен для выбора алгоритма построения вектора перемещения облачных масс («По рад. скорости», «По центру «масс» МЯ»).

Алгоритм «По рад. скорости» используется для построения вектора перемещения облачных масс при заполненности метеорологическими образованиями в зоне обзора МРЛС более 50 % (например, при прохождении теплого фронта со сплошной облачностью и наблюдающимися обложными осадками).

Алгоритм «По центру «масс» МЯ» используется для построения вектора перемещения облачных масс при заполненности метеорологическими образованиями в зоне обзора МРЛС менее 50 % (например, в случае прохождения отдельных очагов фронтальной системы).

Рисунок 4.21 – Формуляр «Калибровка обработки данных»

Пункт «Программа МРЛК» выпадающего меню «Метео» позволяет выбрать из заранее записанных программ соответствующую метеорологическим условиям программу зондирования.

После нажатия на пункт меню «Программа МРЛК» раскрывается виджет «Выбор программы МРЛК» (рисунок 4.22). Для выбора соответствующей программы достаточно активировать соответствующий индикатор напротив нужной программы зондирования (в примере – [14] DUMP).

Пункт «Подтвердить ОЯ» выпадающего меню «Метео» предназначен для ручного отключения звуковой сигнализации об опасных метеорологических явлениях. В МРЛК БАЗ сигнализация об ОЯ осуществляется двумя способами:

- загорается красный индикатор «Опасные явления» в верхнем правом углу экрана;
- раздаётся звуковой сигнал тревоги.



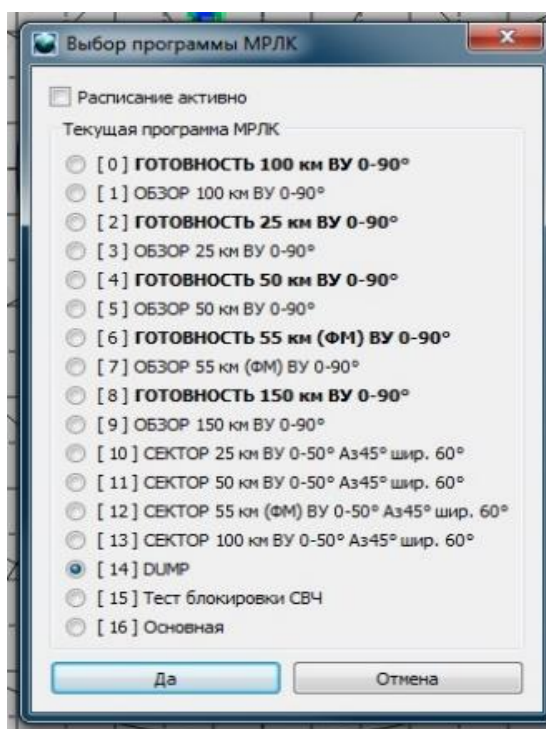


Рисунок 4.22 – Виджет «Выбор программы МРЛК» выпадающего меню «Метео»

Назначение пункта меню «Подтвердить ОЯ» – отключение звукового сигнала тревоги до момента его окончания по регламенту.

На виджете над ИКО выведены следующие органы управления:

1) флажок «Только ОЯ». При активации флажка на ИКО отображаются только опасные метеоявления;

2) кнопка «Выбор РМД». При нажатии на кнопку появляется панель выбора радиолокационной информации, отображаемых на ИКО. Оператор имеет возможность комбинировать в рамках одного виджета несколько слоёв с отображением различных радиометеорологических данных. Например, как показано на рисунке 4.23 – карта метеорологических явлений в ячейках и векторное поле скоростей. Для выбора того или иного слоя карты следует установить флажок напротив соответствующей позиции меню;

3) поле с выпадающим списком «Вектор перемещения». При выборе временного интервала (5, 10, 15 или 20 минут) в центре ИКО индицируется вектор

прогнозируемого перемещения метеоявлений на выбранный интервал времени, рассчитанный по текущим измерениям (рисунок 4.23);

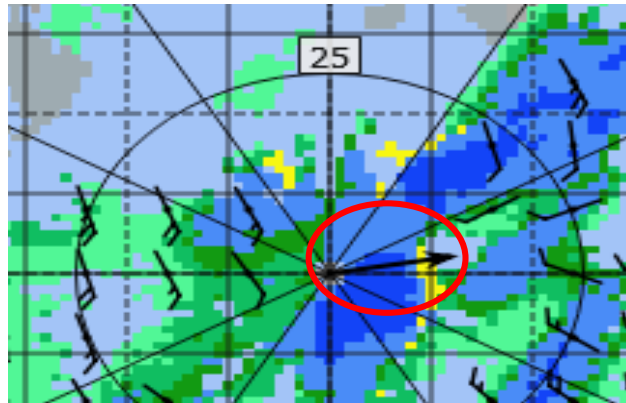


Рисунок 4.23 – Вектор прогнозируемого перемещения метеоявлений (в красной окрестности)

4) кнопки «Маркер», «Линейка», «Маршрут в/с», поле «Масштаб, %» активируют соответствующий инструментарий.

5) служебный виджет запроса к базе данных (БД) (рисунок 4.24).

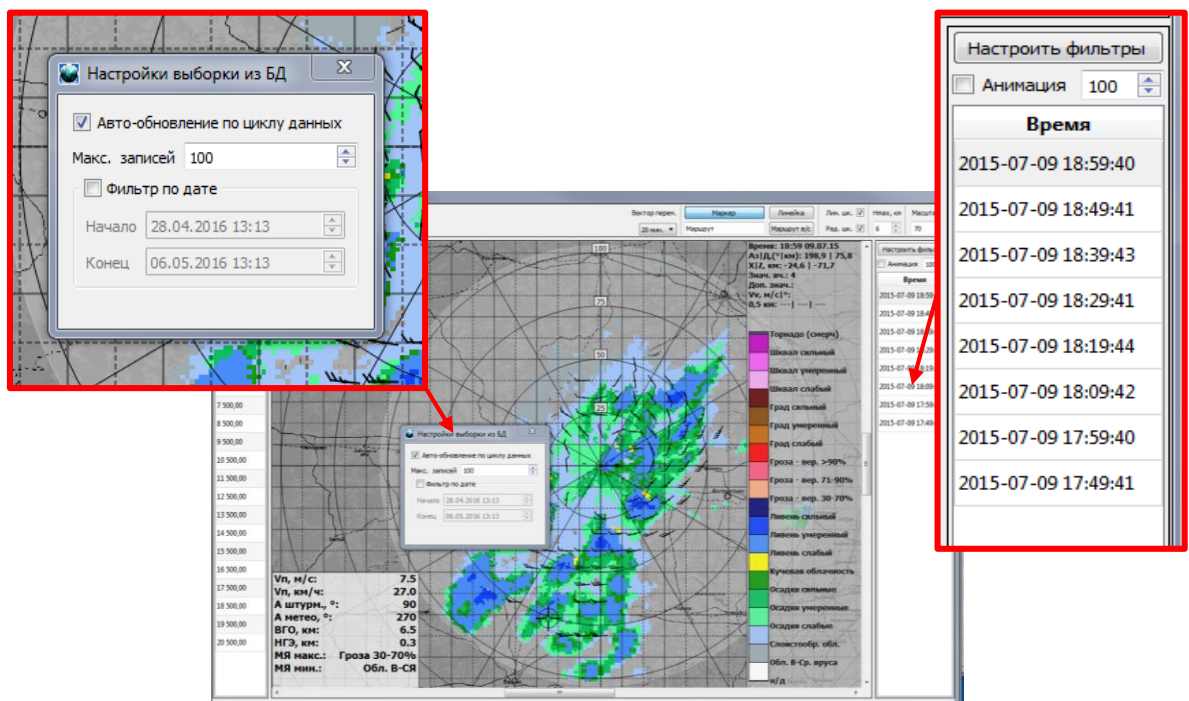


Рисунок 4.24 – Поле данных записи и контекстное меню настройки выборки базы данных

Виджет содержит перечень записанных циклов обзора, расположенных в хронологическом порядке. Выбрав любую позицию, можно посмотреть все доступные данные для соответствующего цикла обзора. При этом просматриваемая позиция отмечается другим цветом.

При установке флажка «Анимация» происходит последовательная смена информации на ИКО с интервалом, задаваемым с помощью счётчика, расположенного справа (значение «100» соответствует смене информации на экране через одну секунду).

При нажатии кнопки «Настроить фильтры» появляется контекстное меню, позволяющее настроить выборку из базы данных (обращение к выборке базы данных должно происходить в том времени, которое соответствует часам на компьютере АРМа: локальное время или UTC).

Метеорологические радиолокационные данные МРЛК БАЗ могут использоваться для различных задач среди заинтересованных пользователей, а именно: наблюдение за опасными явлениями погоды, наблюдение за метеорологическими образованиями синоптического мезомасштаба, оценка интенсивности осадков и количества накопленных осадков за интересующий интервал времени.

Основные тактико-технические характеристики МРЛК БАЗ представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Основные тактико-технические характеристики МРЛК БАЗ

Наименование характеристики	Значение
Мощность излучения в импульсе	100 Вт
Рабочая частота	9330-9375 МГц
Тип антенны	Щелевая антенная решётка с горизонтальной поляризацией
Ширина ДНА	3° 15' x 3° 15'
Метеорологический радиолокационный потенциал	не менее 250 дБ
Размеры	диаметр – 115 см высота – 110 см
Масса	не более 75 кг

Таким образом, представленные в таблице 4.4 низкие массогабаритные характеристики метеорологического радиолокационного комплекса позволяют устанавливать МРЛК БАЗ на базе грузопассажирского длиннобазного автомобиля с высокой крышей для осуществления временных наблюдений (рисунок 4.25). Другое возможное размещение МРЛК БАЗ – на крышах административных и других зданий, специальных мачтах (вышках) – рисунок 4.26. Для установки МРЛК БАЗ необходима ровная горизонтальная площадка размером не менее 750х750 мм, обеспечивающая надёжную установку МРЛС с помощью штатного крепёжного комплекта.



Рисунок 4.25 – Размещение МРЛК БАЗ на базе грузопассажирского длиннобазного автомобиля

Областью применения МРЛК БАЗ являются аэродромы, посадочные площадки, площадки приземления, районы возможных чрезвычайных ситуаций.



Рисунок 4.26 – Размещение МРЛК БАЗ на специальной мачте (вышке)

Размещение МРЛК БАЗ на аэродроме должно быть на удалении 100-150 м от траверза точки центра ВПП. На рисунках 4.27-4.29 продемонстрировано возможное положение МРЛК БАЗ на аэродромах классов Д, Е и на аэродромной посадочной площадке соответственно, зелёным цветом показан сектор сканирования МРЛК БАЗ, ширина сектора 70°.

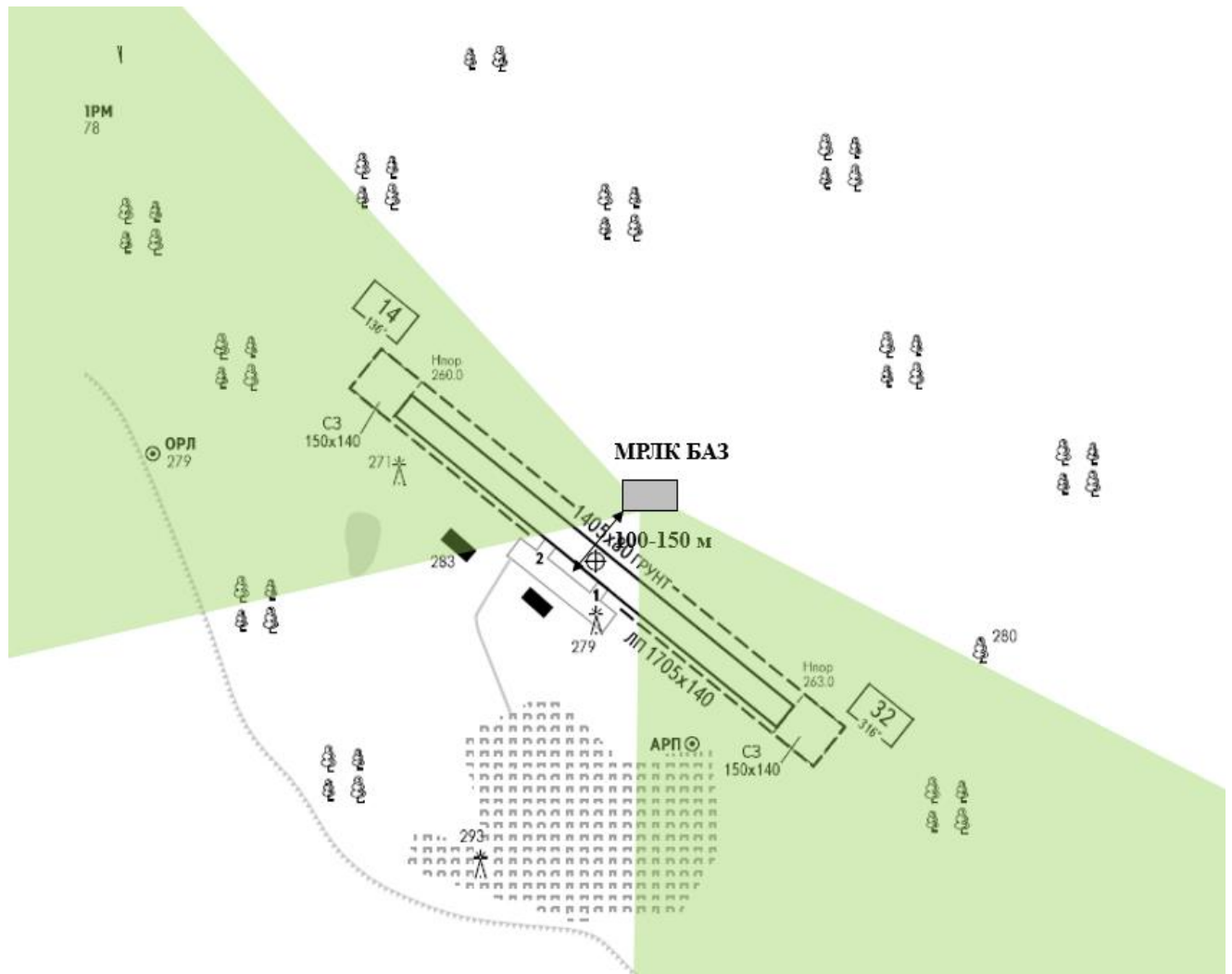


Рисунок 4.27 – Возможное размещение МРЛК БАЗ на аэродроме класса Д (аэропорт Омолон, Чукотский АО)

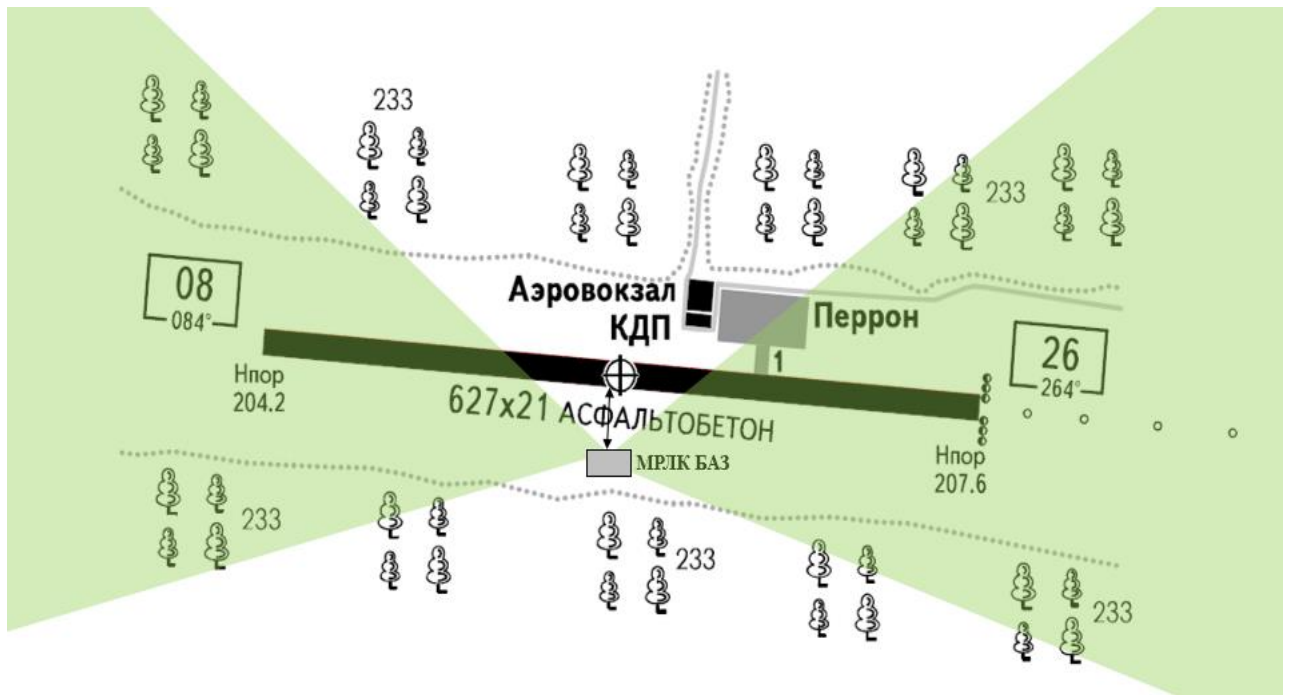


Рисунок 4.28 – Возможное размещение МРЛК БАЗ на аэродроме класса Е (аэропорт Костомукша, Карелия)

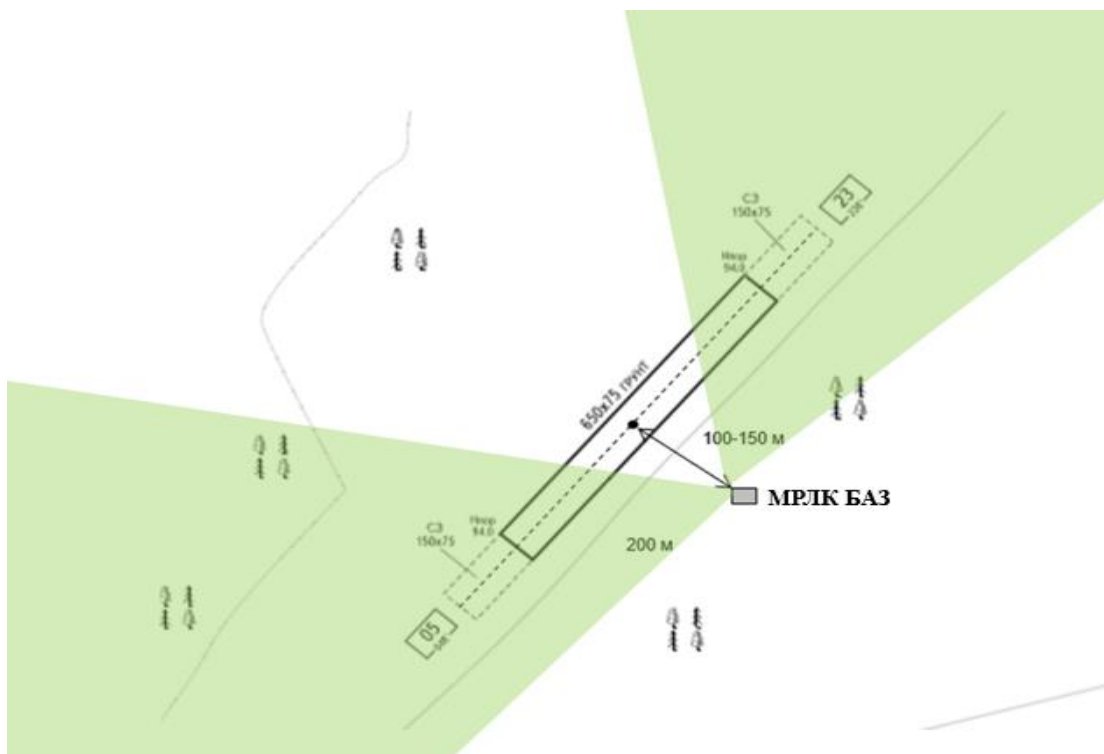


Рисунок 4.29 – Возможное размещение МРЛК БАЗ на аэродромной посадочной площадке (Северные Коряки, Камчатский край)

**Выводы по 4 главе:**

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. Следовательно, одной из задач автора стала разработка методик 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, расчет вероятности ложных тревог ВСВ и ГСВ, турбулентности МРЛК БАЗ.

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

В работе приведены таблицы, карты, статистические диаграммы для изучения результатов валидации. Пределы ошибок в оценках скорости и направления ветра, перемещения метеорологических явлений составили не более  $\pm 3$  м/с и не более  $\pm 30^\circ$ , что удовлетворяет современным требованиям. В ходе сбора статистических данных было выявлено, что выборки оценок ГСВ, ВСВ, EDR являются статистически незначимыми ввиду особенностей сравнения данных по времени и пространству, поэтому в работе приведены расчёты значений диапазонов и дискретности оценок для ГСВ, ВСВ, EDR.



Приведены практические 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.

## Заключение

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.

Решение научно-технической задачи опиралось на проведенный и представленный в работе анализ метеоугроз и состояния метеообеспечения полетов воздушных судов в районе аэродрома, позволивший выявить:

- 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 управления воздушным движением и экипажей воздушных судов о метеорологической обстановке в районе аэродрома;

- противоречие научного характера между необходимостью повышения точности оценки ветровых метеоявлений в секторах взлёта и посадки воздушных судов, с одной стороны, и отсутствием метода и алгоритмов оценки опасных ветровых метеоявлений в наземных метеорологических радиолокаторах ближней аэродромной зоны, с другой стороны.

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 метеообеспечения 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 сдвиги 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. При этом уровень метеорологического обеспечения на аэродромах гражданской авиации по-прежнему остается низко информативным и не соответствует реальным метеоугрозам. Это особенно актуально для аэродромов класса Д, Е, аэродромных площадок и временных аэродромов, расположенных в отдалённых регионах Российской Федерации.

Установлено, что снизить уровень авиационных происшествий можно за счет повышения ситуационной осведомлённости диспетчеров УВД и экипажей ВС о метеорологической обстановке в районе аэродрома.

2. Проведение наблюдений за явлениями погоды, метеоизмерения на аэродромах осуществляется, как правило, комплексными системами КРАМС-4 и АМИС-РФ и др., в составе которых находятся датчики, определяющие погодные явления и характеристики в точке «in situ». Системы КРАМС-4 и АМИС-РФ сильно ограничены в возможностях определения опасных ветровых метеоявлений на аэродроме. Анализ средств метеообеспечения полетов на аэродромах позволил

установить, что для регистрации опасных ветровых метеоявлений, таких как сдвиги ветра, турбулентность требуется компактный, не требующий больших финансовых затрат на установку и наладку метеорологический радиолокатор. Внедрение такого метеорологического радиолокатора позволит повысить уровень безопасности полетов воздушных судов в районе аэродрома при выполнении взлетно-посадочных операций.

3. Существующие метеорологические радиолокаторы, обслуживаемые структурами Росгидромета различны по тактико-техническим характеристикам и частотным диапазонам (X-, C-, S-диапазоны). Установлено, что на территории РФ в оперативную практику внедрены метеолокаторы:

- технически и морально устаревшие некогерентные радиолокаторы МРЛ-5;
- доплеровские поляризационные радиолокаторы ДМРЛ-С, внедряются в рамках ФЦП с 2008 г. с значительной задержкой ввиду их дороговизны, трудностей на этапах монтажа и эксплуатации.

Кроме этого, ДМРЛ-С не является аэродромным метеолокатором, он не предназначен для работы в зоне ответственности аэродрома и не создан для аэродромных метеорологических органов, обслуживанием ДМРЛ-С занимается структура Росгидромета – Центральная аэрологическая обсерватория. Помимо этого, запланированная сеть метеолокаторов ДМРЛ-С не охватывает аэродромы Дальнего Востока, Крайнего Севера. Несмотря на очевидные перспективы промышленного и социального развития Арктической зоны РФ, судоходства по Северному морскому пути, где наблюдаются полярные мезоциклоны с сильнейшими осадками и ураганными ветрами, в указанном регионе запланирована только одна доплеровская радиолокационная станция ДМРЛ-С.

Таким образом, необходимо создание малогабаритного метеорадиолокатора X-диапазона, способного автоматически работать вблизи аэродромов в экстремальных погодных условиях.

4. Анализ характеристик отечественных и зарубежных метеорологических радиолокационных станций позволил установить, что специализированный секторный режим, который является важным для предоставления данных о сдвигах

ветра и турбулентности, представлен только в трех рассмотренных РЛС, из которых к малогабаритным относится только WR-2100. Вместе с тем, метеорадиолокатор WR-2100 с дальностью действия 50 км не покрывает ближнюю зону аэродрома, что делает его практическое использование на аэродромах и аэродромных площадках проблематичным.

Отечественные разработки малогабаритных метеолокаторов с секторным режимом работы отсутствуют. В работе показано, что актуальной является разработка малогабаритного, в перспективе мобильного, метеорадиолокатора ближней зоны аэродрома с секторным режимом работы, обеспечивающим регистрацию опасных ветровых метеоявлений в секторах взлета и посадки воздушных судов.

5. Обработка данных в секторном режиме разделяется на ряд последовательно выполняемых процедур первичной и вторичной обработки информации.

На уровне первичной обработки информации выполняются: 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 и турбулентностей.

Обоснованы основные параметры МРЛК БАЗ в секторном режиме, обеспечивающие 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°.

Разработанный и обоснованный технический облик МРЛК БАЗ, включающий в себя структуру обработки информации и характеристики

секторного режима, являются основой для разработки метода и алгоритма оценки опасных ветровых метеоявлений.

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

7. Разработаны алгоритмы оценки ветровых метеоявлений для секторов взлета и посадки воздушных судов, позволяющие обеспечить высокую ситуационную осведомленность о метеообстановке на в ближней зоне аэродрома.

В алгоритмическом обеспечении МРЛК БАЗ используется алгоритм радиальной скорости VVP, более приближенный к реальным атмосферным условиям по сравнению с другим существующим алгоритмом VAD, предполагающий наличие горизонтальной однородности поля ветра. Оценка радиальной скорости по алгоритму VVP осуществляется в трёхмерном объёме.

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 V и W. Блок-схема алгоритма определения EDR состоит из нескольких составных блоков:

– «Определение количества, начальных элементов и длин серий» формирует из входного массива оценок радиальных скоростей непересекающиеся множества серии;

– «Оценка среднего и дисперсии» возвращает максимально правдоподобные оценки математического ожидания и дисперсии значений радиальной скорости для каждой серии;

– «Оценка интегрального масштаба» возвращает значение интегрального масштаба турбулентных пульсаций скорости ветра.

Выходные массивы алгоритма представляют собой оценки EDR в каналах дальности.

Для оценки сдвигов ветра определяются ГСВ, ВСВ. Для оценки сдвигов ветра требуется 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 сдвигов ветра являются количество каналов дальности, количество угловых и азимутальных углов, декартовы координаты точек области анализа, значения  $V$  и  $W$ .

При выполнении алгоритма выполняются следующие блоки:

– «Инициализация»: задаются начальные значения счётчиков метеоцелей, имеющих различные дальности и азимутальные углы;

– «Формирование матрицы коэффициентов и вектора правой части системы линейных алгебраических уравнений»: по мере формирования оценок радиальных скоростей для различных угловых положений антенны при сканировании выполняются вложенные циклы для определения количества метеоцелей;

– «Решение системы линейных алгебраических уравнений»;

– «Формирование выходных данных оценок горизонтального и вертикального сдвигов ветра».

8. Разработанные методики валидации для сопоставления данных об опасных ветровых метеоявлениях содержат правила сравнения 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, расчет вероятности ложных тревог ГСВ, ВСВ, турбулентности МРЛК БАЗ. В работе приведены таблицы, карты, статистические диаграммы для изучения результатов валидации. Пределы ошибок в оценках скорости и направления ветра, перемещения метеорологических явлений составили не более  $\pm 3$  м/с и не более  $\pm 30^\circ$ , что удовлетворяет современным требованиям. В ходе сбора статистических данных было выявлено, что выборки оценок ГСВ, ВСВ, EDR являются статистически незначимыми ввиду особенностей сравнения данных по пространству и времени. По этой причине одной из следующих задач стала оценка определения сдвигов ветра и EDR в МРЛК БАЗ.

Приведены оценки для СКО формирования сдвигов ветра. Доказано, что значение дискретности оценки ВСВ составляет 0,5 м/с и соответствует выдвинутому в работе требованиям. В МРЛК БАЗ значение дискретности оценки ГСВ составляет не более 0,2 м/с. и соответствует выдвинутому в работе требованиям. Полученные значения дискретности оценки ГСВ и ВСВ обеспечивают определение уровней градации опасности горизонтального и вертикального сдвига ветра в соответствии с требованиями ИКАО.

Для оценки EDR осуществлено вычисление минимального и максимального значений диапазона оценки EDR. В МРЛК БАЗ диапазоны оценки турбулентности по EDR соответствуют следующим значениям: на дальности до 50 км – от не более  $0,1 \text{ м}^{2/3}/\text{с}$  до не менее  $3 \text{ м}^{2/3}/\text{с}$ ; на дальности до 100 км – 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 покрывают требуемые диапазоны покрытия всех градаций турбулентности согласно требованиям ИКАО.

9. Разработаны практические 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.

Дальнейшее направление исследований в рамках рассматриваемой научно-технической задачи связано с разработкой методов и алгоритмов обнаружения опасных зон обледенения в секторах взлета и посадки воздушных судов. Кроме этого, для МРЛК БАЗ необходимо разработать и внедрить алгоритмы обнаружения скоплений птиц в секторах взлета и посадки воздушных судов. Полученный в результате метеолокатор будет представлять собой многофункциональный аэродромный радиолокационный комплекс, представляющий достоверную информацию о состоянии воздушного пространства в секторах взлета и посадки воздушных судов.

**Список использованных источников**

1. Авиационные правила. Часть 170. Сертификация оборудования аэродромов и воздушных трасс (АП-170). Том II. Сертификационные требования к оборудованию аэродромов и воздушных трасс. Дата актуализации: 01.02.2020.

2. Авиационные происшествия и инциденты. //официальный сайт ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета»//  
<http://www.aviamettelecom.ru/activity/airweather/>.

3. Анализ результатов работы метеорологического радиолокационного комплекса ближней зоны аэродрома. Отчет по НИР №503-18/гр. / Руководитель К.И.Галаева. – М.: МГТУ ГА, 2019

4. Анемометр, 2017 // <http://ru.wikipedia.org/wiki/Анемометр>

5. Анемометр. Характеристика. Виды, 2017 // <http://www.анероид.рф/info/articles/anemometr.htm>

6. **Артюхович М.В., Феоктистова О.Г.** Роль инженерно-технического персонала в обеспечении безопасности полётов. // Научный вестник МГТУ ГА №204, 2014. С. 39-43.

7. **Архипов М.С.** Безопасность полетов летательных аппаратов. Учеб. для инж. вузов ВВС/ В.С. Иванов, А.М. Киселев и др. – Киев: ВВАИУ, 1989, 209 с.

8. **Банах В.А., Смалихо И.Н.** Когерентные доплеровские ветровые лидары в турбулентной атмосфере. Томск: СО РАН, 2013. – 304 с.

9. **Баталов К.А., Кулаков М.В., Чехов И.А.** Исследование технологии взаимодействия службы обслуживания воздушного движения и аэродромно-технической службы аэропорта//Научный Вестник МГТУ ГА. Том 24, №4, 2021. С.8-19.

10. **Баттан Л.Дж.** Радиолокатор наблюдает за погодой: Научно-популярное издание. – Л.: Гидрометеиздат, 1964 – 105 с.

11. Безопасность полётов. Общая оценка аварийности в гражданской авиации 2011 г.// официальный сайт ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета»// [http://old.aviamettelecom.ru/index.php?id\\_top=6](http://old.aviamettelecom.ru/index.php?id_top=6)
12. **Бин Б.Р., Даттон Е.Дж.** Радиометеорология. Монография. / Под ред. А.А. Семенова. – Л.: Гидрометеиздат, 1971– 362 с.
13. **Богаткин О.Г.** Основы авиационной метеорологии. Учебник. - СПб.: Изд. РГГМУ, 2009. – 339 с.
14. **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.
15. **Болелов Э.А.** Методы и алгоритмы комплексной обработки метеоинформации при метеорологическом обеспечении полетов воздушных судов гражданской авиации. Дисс. докт. наук.: 05.22.14 / Болелов Эдуард Анатольевич; МГТУ ГА. – М., 2020. – 421 с.
16. **Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К.** Турбулентность в пограничном слое атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 263 с.
17. **Васильев О.В., Богданов А.В., Болелов Э.А., Галаева К.И., Зябкин С.А., Козлов В.Н.** Способ обнаружения в метеорологическом радиолокационном комплексе зон обледенения в секторах взлета и посадки летательных аппаратов. РФ 2755491. // <https://patenton.ru/patent/RU2755491C1>.
18. **Васильев О.В., Галаева К.И., Фридзон М.Б.** Метеорологический радиолокационный комплекс ближней зоны для обеспечения безопасности полетов гражданской и государственной авиации // Метеоспектр №4, 2016. С.40-43.
19. **Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М.** Мезометеорологические процессы. Учебное пособие. – М.: Географический факультет МГУ, 2007 – 127 с.
20. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике – М., 2014 – 110 с.

21. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике – М., 2017 – 121 с.

22. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – мировой центр данных // <http://meteo.ru/>.

23. Высотная метеорологическая мачта, 2018 // официальный сайт высотной метеорологической мачты Обнинска// [typhoon-tower.obninsk.org](http://typhoon-tower.obninsk.org)

24. **Галаева К.И.** Анализ результатов испытаний и сертификации метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны // Научный вестник МГТУ ГА, т.23, №1, 2020, С.28-40.

25. **Галаева К.И.** Анализ этапов развития метеорологической радиолокации // Сборник докладов XV Всероссийской научно-технической конференции «Научные чтения по авиации, посвящённые памяти Н.Е. Жуковского». – М.: НаукаСофт. №6. 2018. С.360-366.

26. **Галаева К.И.** Назначение и задачи метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны МРЛК БАЗ // Сборник докладов XV Всероссийской научно-технической конференции «Научные чтения по авиации, посвящённые памяти Н.Е. Жуковского». – М.: НаукаСофт. №6. 2018. С.353-359.

27. **Галаева К.И.** Обоснование требований к современным метеорологическим локаторам ближней зоны аэродрома // Электронный сборник докладов .XIV Всероссийской научно-технической конференции «Научные чтения по авиации, посвящённые памяти Н.Е. Жуковского». – М.: НаукаСофт. №5. 2017 (CD-ROM).

28. **Галаева К.И.** Описание режимов работы метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны // Сборник тезисов XLIV Международной молодёжной научно-технической конференции «Гагаринские чтения». – М.:МАИ. 2018. С.12-13.

29. **Галаева К.И.** Применение метеорологических радиолокационных станций // Сборник научных статей Международной научно-практической

конференции «Гражданская авиация: социально-культурные основания и инновации». – М.: Модуль К, 2017. С.16-17.

30. **Галаева К.И.** Развитие отечественной метеорологической радиолокации // Сборник тезисов Международной научно-технической конференции «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», Конференция в МГТУ ГА. – М.: ИД Академия имени Н.Е. Жуковского, 2018. С.163.

31. **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 (331), 2018. С.74-81.

32. **Галаева К.И., Болелов Э.А., Фридзон М.Б.** Обнаружение сдвигов ветра в секторах взлёта и посадки воздушных судов // Сборник тезисов Международной научно-практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ». – СПб.: РГГМУ, 2020. С.136-137.

33. **Галаева К.И., Васильев О.В., Фридзон М.Б.** Требования к наземным метеорологическим радиолокаторам X-диапазона // Сборник материалов II Международной заочной научно-практической конференции «Авиация: история, современность, перспективы развития». – Минск: БГАА, 2017.С.63-64.

34. **Галаева К.И., Фридзон М.Б.** Обоснование требований к наземным метеорологическим локаторам ближней аэродромной зоны // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции, посвящённой 50-летию Иркутского филиала МГТУ ГА «Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации». – Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, 2017. С.31-35.

35. Гидрометцентр России // <https://meteoinfo.ru/>

36. Глобальная эксплуатационная концепция OpВД. Doc 9854. Изд. 1-ое. ИКАО. 2005. 93 с.

37. Глобальный аэронавигационный план на 2016-2030. ГАНП 2016. Doc 9750-AN/963. Изд.5-ое. ИКАО, 2016. 151 с.

38. Государственный реестр аэродромов и вертодромов на 20.03.2020 г. // Официальный сайт ФАВТ// <https://www.favt.ru/deyatelnost-ajeroporty-i-ajerodromy-reestr-grajdanskikh-ajerodromov-rf/>
39. **Гущина Д.Ю.** Синоптическая метеорология. Атмосферные фронты: учебное пособие/ Д.Ю.Гущина. – М.: Изд-во Московского университета, 2013 – 103 с.
40. **Довиак, Р., Зрнич Д.** Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. Монография/Под ред. А.А. Черникова. – Л.: Гидрометеиздат, 1988 – 512 с.
41. Доплеровский метеорологический радиолокатор «ДМРЛ-С»// Официальный сайт ТОО «ЛЭМЗ»// <https://lemz.ru/%d0%b4%d0%bc%d1%80%d0%bb-%d1%81>
42. **Ефремов В.С., Вовшин Б.М., Вылегжанин И.С., Лаврукевич В.В., Седлецкий Р.М.** Поляризационный доплеровский метеорологический радиолокатор С-диапазона со сжатием импульсов // Электронный журнал радиоэлектроники, 2009, №10 // <http://jre.cplire.ru/iso/oct09/6/text.html#1>
43. **Жуков В.Ю.** Состояние и перспективы сети метеорологических радиолокаторов // Дистанционное зондирование атмосферы и земных покровов, радиометеорология, электронный журнал РРВ-24, 2014, С. 133-136. // <http://rrv.iszf.irk.ru/sites/default/files/conf2014/articles/tom3/133-136.pdf>.
44. **Иванов В.Э., Фридзон М.Б., Ессяк С.П.** Радиозондирование атмосферы. Технические и метрологические аспекты разработки и использования радиозондовых измерительных средств. – Екатеринбург: Научное издание НИСО УрО РАН, 2004. – 590 с.
45. **Иванова А.Р.** Опыт верификации численных прогнозов влажности и оценка их пригодности для прогноза зон обледенения воздушных судов. // Метеорология и гидрология. 2009. № 6. С. 33 – 46.
46. **Калистратова М.А., Кон А.И.** Радиоакустическое зондирование атмосферы.— М. : Наука, 1985. — 198 с.

47. Катастрофа SSJ 100 в Шереметьеве // URL:[https://ru.wikipedia.org/wiki/Катастрофа\\_SSJ\\_100\\_в\\_Шереметьеве](https://ru.wikipedia.org/wiki/Катастрофа_SSJ_100_в_Шереметьеве).

48. **Киселев В.Н., Кузнецов А.Д.** Методы зондирования окружающей среды (атмосферы). Учебник. – СПб., изд. РГГМУ, 2004. – 429 с.

49. Комплексная радиотехническая аэродромная метеорологическая станция «КРАМС-4» // Официальный сайт «Институт радарной метеорологии» <http://iram.ru>.

50. Концепция развития аэродромной (аэропортовой) сети Российской Федерации на период до 2020 года. М. 2008.

51. **Луценко Э.И., Лагун В.Е.** Полярные мезомасштабные циклоны в атмосфере над Баренцевым и Карским морями //Проблемы Арктики и Антарктики: электронный научный журнал – 2013.// Режим доступа: <http://www.aari.ru/misc/publicat/paa/РАА-96/РАА96-07-%2876-9%29.pdf>

52. Метеообсерватория МГУ // <http://momsu.ru/>.

53. Метеорологический радиолокационный комплекс ближней зоны аэродрома. Отчет по НИР №504-17/гр. / Руководитель К.И.Галаева. – М.: МГТУ ГА, 2018

54. Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации. Прил.3 к Конвенции о международной гражданской авиации. ИКАО, Монреаль, 2013.

55. Методические указания по производству метеорологических радиолокационных наблюдений на ДМРЛ-С на сети Росгидромета – СПб., 2013 – 164 с.

56. Методическое пособие. Расследование авиационных происшествий и инцидентов, связанных с метеорологическими факторами. Изд. 3. – Москва, 2009 – 57 с.

57. Наземные РЛС ООО «Контур-НИИРС» // [www.kontur-niirs.ru/](http://www.kontur-niirs.ru/).

58. Наставление гидрологическим станциям и постам. Вып.3. Ч.1 – Л.: Гидрометеиздат, 1985 – 150 с.

59. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации России (НМО ГА-95). – М.: Росгидромет, 1995.

60. **Немудрый К.В.** Аэродромы и аэропорты как один из элементов системы региональной авиации России //Электронный журнал «Труды МАИ». 2008. №75.// <https://mai.ru/upload/iblock/3d8/3d861abaeabeacea2d677527b4fe34ca.pdf>

61. Нормы годности к эксплуатации гражданских аэродромов (НГЭА-92). – Новосибирск, 1992. – 138 с.

62. О выделении полос радиочастот 2935-2965 МГц и 9550-9650 МГц для метеорологических радиолокационных станций нового поколения. Решение ГКРЧ № 14-23-04 от 16.04.2014 г.

63. О выделении полос радиочастот и внесении изменений в решения ГКРЧ по заявлениям юридических и физических лиц Российской Федерации. Решение ГКРЧ № 14-26-12 от 22.07.2014 г.

64. О выделении полос радиочастот, внесении изменений в решения ГКРЧ, продлении и установлении срока действия решений ГКРЧ в соответствии с информационным листом. Решение ГКРЧ №13-21-08-4 Решение от 24.10.2013 г.

65. Об использовании полос радиочастот 2900-3100 МГц, 9200-9500 МГц, 9500-9800 МГц, 16,6-17,1 ГГц и 33,4-34,2 ГГц радиоэлектронными средствами радиолокационной службы. Решение ГКРЧ №12-15-05-1 от 2.10.2012 г.

66. Об утверждении таблицы распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации и признании утратившим силу некоторых постановлений Правительства Российской Федерации. Постановление Правительства РФ №1049-34 от 21.12.2011 г.

67. Опасные явления в коде WAREP // [http://esimo.ru/dataview/viewresource?resourceId=RU\\_RHMI-WDC\\_2887](http://esimo.ru/dataview/viewresource?resourceId=RU_RHMI-WDC_2887)

68. Основные технические требования к системе обнаружения опасных атмосферных явлений и штормового оповещения на базе метеорологических радиолокаторов. Приказ Росгидромета №95 от 21.06.2004 г.

69. **Павлов Н.Ф.** Аэрология, радиометеорология и техника безопасности. – Л.: Гидрометеиздат, 1980 – 432 с.



70. **Панчев С.** Случайные функции и турбулентность. – Л.: Гидрометеиздат, 1967 – 447 с.
71. **Плотников А.Д., Сучкова Л.И.** Сравнительный анализ приборов и методов измерения скорости и направления ветра // Ползуновский альманах, электронный журнал АлтГТУ, №2, 2010 – С. 119-122 // [http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pa2010\\_2/pdf/119plotnikov.pdf](http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pa2010_2/pdf/119plotnikov.pdf)
72. Погода METAR и TAF // <http://metartaf.ru>.
73. Предварительные испытания АС МП. Приложение 02 к Протоколу № 22 «Дискретности оценок РЛП». М., 2017 – 120 с.
74. Предварительный отчёт по результатам расследования авиационного происшествия// Официальный сайт Мак// [https://mak-iac.org/upload/iblock/4e4/report\\_ra-89098\\_pr.pdf](https://mak-iac.org/upload/iblock/4e4/report_ra-89098_pr.pdf)
75. Преимущества анемометра акустического, 2017 // [http://www.tehnopribor.ru/termin/anemometr\\_akusticheskij.html](http://www.tehnopribor.ru/termin/anemometr_akusticheskij.html)
76. Применение анемометров, 2017 // <http://www.eksis.ru/materials/articles/anemometers.php>
77. Программное обеспечение вторичной обработки информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С (Шифр «ГИМЕТ-2010»). Описание программы. 623.02572456.01001-01 13 01, 2011 – 108 с.
78. Радиозондирование атмосферы, 2017// [www.riastk.ru/mi/adetail.php?ID=30717](http://www.riastk.ru/mi/adetail.php?ID=30717)
79. Расследование авиационных происшествий и инцидентов, связанных с метеорологическим факторами. Методическое пособие. Изд.3. М.:Росгидромет, 2009 – 110 с.
80. Руководство по авиационной метеорологии. Изд.10. ИКАО, Монреаль, 2015.
81. Руководство по Глобальной системе наблюдений. Изд.3-е. ВМО №488, Женева, 2010.
82. Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений. ВМО-№8, Женева, 2010.

83. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. СПб. – 1993.
84. Руководство по сдвигу ветра на малых высотах. Дос 9817 AN/449. ИКАО, Монреаль, 2005.
85. Руководство по требованиям к системе организации воздушного движения. Дос 9882. ИКАО, Монреаль, 2008.
86. **Рытов М.С., Кравцов Ю.А., Татарский В.И.** Введение в статистическую радиофизику. Часть II. Случайные поля. 2-е изд. – М.: Наука, 1978 – 463 с.
87. Самолётные данные AMDAR:  
<http://www.wmo.int/pages/prog/www/GOS/ABO/AMDAR/>.
88. **Седунов Ю.С.** Атмосфера. Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1991 – 510 с.
89. Сколник М.И. Справочник по радиолокации. Книга 2. – М.: Техносфера, 2015 – 945 с.
90. **Соболь И. М.** Численные методы Монте-Карло. – М.: Наука, 1973 – 313 с.
91. **Стерлядкин В.В., Горелик А.Г., Щукин Г.Г.** Обзор методов и средств ветрового зондирования атмосферы/Электронный научный журнал МГУПИ. – 2013. – 19 с. // [http://www.mivlgu.ru/conf/armand2013/lecture-2013/pdf/lec\\_2.pdf](http://www.mivlgu.ru/conf/armand2013/lecture-2013/pdf/lec_2.pdf)
92. Технический проект «Общесистемные решения по сбору, анализу, контролю и предоставлению радиолокационной информации от ДМРЛ-С». Министерство природных ресурсов и экологии РФ. Долгопрудный. 2013 – 64 с.
93. Ультразвуковой датчик скорости и направления ветра Ultrasonic3D // [http://www.adalmeteo.kz/ultrazvukovoi\\_datchik\\_skorosti\\_i\\_napravleniya\\_vetra\\_ultrasonic\\_anemometer\\_3d.html](http://www.adalmeteo.kz/ultrazvukovoi_datchik_skorosti_i_napravleniya_vetra_ultrasonic_anemometer_3d.html)
94. Федеральные авиационные правила «Использование воздушного пространства Российской Федерации», приказ Минтранса РФ №138 от 11.03.2010 г.

95. Федеральные авиационные правила «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации», приказ Минтранса РФ №128 от 31.07.2009 г.

96. Федеральные авиационные правила «Предоставления метеорологической информации для обеспечения полетов воздушных судов» 3.03.2014 г. №60.

97. **Фридзон М.Б., Васильев О.В., Галаева К.И.** Применение наземных метеорологических радиолокационных станций // Сборник материалов I Международной заочной научно-практической конференции «Авиация: история, современность, перспективы развития». – Минск: БГАА, 2016. С.112-115.

98. **Фридзон М.Б., Галаева К.И.** Обоснование принципов построения метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны МРЛК БАЗ // Сборник тезисов Международной научно-технической конференции «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», Конференция в МГТУ ГА. – М.: ИД Академия имени Н.Е. Жуковского, 2018. С.199.

99. **Хинце И.О.** Турбулентность, её механизм и теория: монография/ под ред. Г.Н. Абрамовича. – М.: Физматизд, 1963 – 680 с.

100. Центр физики облаков и активных воздействий // <http://www.cao-rhms.ru/OFAV/>.

101. Центральная аэрологическая обсерватория // <http://meteorad.ru/>.

102. **Abreu V.J., Barnes J.E., and Hays P.B.** Observations of Winds with an Incoherent Lidar Detector // Appl. Optics. 1992. V.31. No22. p.4509–4514.

103. **Albrecht B., Fang M. and Ghate V.** Exploring stratocumulus cloud-top entrainment processes and parameterizations by using Doppler cloud radar observations// Journal of the Atmospheric Sciences.2016. №73. p. 729–742.

104. **Atlas D.**, Advances in Radar Meteorology. Advances in Geophysics. – New York: Academic Press Inc., 1964, V.10, p. 318-468.

105. **Atlas, D., Kerker, M., and Hitschfeld, W.** Scattering and attenuation by non-spherical atmospheric particles. J. Atmospheric Terrest. Phys., 1953, №3, p. 108-119.

106. **Austin P.M., and Bemis, A.C.** A quantitative study of the “bright band” in radar precipitation echoes. // *J. Meteorol.*, 1950, № 7, p.145-150.
107. **Battaglia A.** G band atmospheric radars: a new frontier in cloud physics/ A. Battaglia, C.D. Westbrook, S. Kneifel, P. Kollias, N. Humpage, U. Löhnert, J. Tyynelä, G.W. Petty// *Atmospheric Measurement Techniques*. 2014. № 7. P. 1527–1546.
108. **Battan, L. J.** *Radar Meteorology*. – Chicago: Univ. of Chicago Press, 1959, p.161.
109. **Bechini R., Baldini L., Chandrasekar V.** Polarimetric radar observations of the ice region of precipitation clouds at C-band and X-band radar frequencies// *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2013. № 52. P. 1147–1169.
110. Beijing Metstar radar// <http://www.metstar.net>.
111. **Bent A.E.** Radar echoes from atmospheric phenomena. M.I.T., Radiation Lab., Rep., 1943, № 173, p. 10.
112. **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.
113. **Boodoo S.** Quantitative precipitation estimation from a C-band dual-polarized radar for the 8 July 2013 flood in Toronto/ S. Boodoo, D. Hudak, A. Ryzhkov, P. Zhang, N. Donaldson, D. Sills, J. Reid // *Journal of Hydrometeorology*. 2015. № 16. P. 2027–2044.
114. **Conor T. Lahiff.** Vertically integrated liquid density and its associated hail size range across the Burlington, Vermont county warning area. Eastern Region Technical Attachment №05-01, June 2005, P.1-20
115. **Crum T, Horvat D., Horvat C., Calvert C.** NWS WSR-88D and TDWR-SPG data collection and distribution network status and plans // [https://www.researchgate.net/publication/242177691\\_NWS\\_WSR88D\\_AND\\_TDWRSPG\\_DATA\\_COLLECTION\\_AND\\_DISTRIBUTION\\_NETWORK\\_STATUS\\_AND\\_PLANS](https://www.researchgate.net/publication/242177691_NWS_WSR88D_AND_TDWRSPG_DATA_COLLECTION_AND_DISTRIBUTION_NETWORK_STATUS_AND_PLANS).

116. Doppler radar meteorological observations. Part C WSR-88D products and algorithms. Federal meteorological handbook No.11. FCM-H11C-2006, Washington, DC, 2006, p.390
117. Eldes radar // <http://www.eldesradar.com/Radar-meteorologici-banda-X.html>.
118. **Emersic C., Saunders C. P. R.** Further laboratory investigations into the relative diffusional growth rate theory of thunderstorm electrification// Atmos. Res. 2010. №98. P. 327-340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.07.011>
119. EWR radar systems // <http://www.ewradar.com/>.
120. **Fabry F.** Radar meteorology: principles and practice. Cambridge University Press, 2015. p.248.
121. **Fishman George S.** Monte Carlo: concepts, algorithms, and applications.– Springer, 1996, p.698
122. FM-94 BUFR Collected papers and specification/European center for medium – range weather forecasts, WMO, 1998.
123. Furuno radar // [www.furuno.com](http://www.furuno.com).
124. **Germann U., Figueras J., Gabella M., Hering A., Sideris I. and Calpini B.** Radar network // Meteorological technology international. The international review of weather, climate and hydrology technologies and services. April 2016. P.62-65
125. **Gunn K. L. S., Langleben M. P., and Dennis A. S.** Radar evidence of a generating level for snow. J. Meteorol.,1954, № 11, P. 20-26.
126. **Istok M., Crum T.** WSR-88D and TDWR-SPG data status and plans. // National Weather Service. Family Of Services. Partners Meeting. Phoenix, AZ. 15 January 2009.  
//[https://www.roc.noaa.gov/WSR88D/PublicDocs/Level\\_II/FOS\\_011509.pdf](https://www.roc.noaa.gov/WSR88D/PublicDocs/Level_II/FOS_011509.pdf).
127. **Koistinen, J.** Diagnosis of precipitation detection range //Preprints of 32nd International Conference on Radar Meteorology. AMS, 2005. p.3.
128. **Köpp F., Schwiesow R.L., and Werner Ch.** Remote measurements of boundary-layer wind profiles using a CW-Doppler-Lidar // J. Climate Appl. Meteor., 1984. V.23. P.148–154.

129. **Korb C.L., Gentry B.M., and Weng C.Y.** Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind // *Appl. Optics*. 1992. V.31. No21. P.4202–4213.
130. **Kumjian R. M.** *Weather Radars. Remote Sensing of Clouds and Precipitation.* Springer International Publishing, February 2018, p.15-63. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-72583-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72583-3_2).
131. **Ligda, M.G.H.** Radar storm observation. *Compendium Meteorol. Am. Meteorol. Soc.* – Boston, 1951, P.1265-1282.
132. **MacGorman D.R., Biggerstaff M.I., and Schuur T.J.** Formation of charge structures in a supercell// *Monthly Weather Review*. 2010. №138 (10), P. 3740–3761
133. **Marshall J.S., and Palmer W.M.K.** The distribution of raindrops with size. *J.Meteorol.*, 1948, № 5, P.165-166.
134. **Marshall, J. S.** Precipitation trajectories and patterns. *J. Meteorol.*, 1953, № 10, P. 25-29.
135. **Marshall, J. S., and Hitschfeld, W.** The interpretation of the fluctuating echo for randomly distributed scatterers. *J. Phys.*, 1953, №31, P. 962-994.
136. **Nanding N., Rico-Ramirez M.A.** *Precipitation Measurement with Weather Radars. ICT for Smart Water Systems: Measurements and Data Science/Springer Nature.* November 2019. P.1-24. DOI: [https://doi.org/10.1007/698\\_2019\\_404](https://doi.org/10.1007/698_2019_404)
137. Novimet radar // <http://www.novimet.com>.
138. Opera. observation. Opera data// <http://eumetnet.eu/activities/observations-programme/current-activities/opera/>
139. *Polar Lows. Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions / Eds: E A.Rasmussen, J.Turner.* Cambridge: Cambridge University Press, 2003, p. 612.
140. **Ronald E. Walpole, Raymond H. Myers, Sharon L. Myers, Keying Ye.** *Probability & Statistics for Engineers & Scientists.* 9 edition, University of Texas at San Antonio. 2011. p.812.

141. RTCA DO-220A. Minimum Operational Performance Standards (MOPS) For Airborne Weather Radar with Forward-Looking Windshear and Turbulence Detection Capability. 2016.
142. RXM-25 X-Band Polarimetric Doppler Weather Radar // <http://www.rli-radar.com/rli/hardware/rxm25/index.html>.
143. Toshiba weather radar TSSWR-X100D // <http://www.toshiba.html>.
144. **Wexler R.** An evaluation of the physical processes in the melting layer. Proc. 5th Weather Radar Conf., Am, Meteorol. Soc. – Boston, 1955, p. 302-334
145. **Wexler R.** Theory of observation of radar storm detection. Compendium of Meteorol., Am. Meteor. Soc. – Boston, 1951, p. 1283-1289

## **Приложения**



**Основные технические характеристики существующих наземных метеорологических радиолокационных станций X-диапазона отечественного и иностранного производства**

1) РЛС «Контур-К» производства ООО «Контур-НИИРС»

Разработанная ООО «Контур-НИИРС» метеорологическая радиолокационная станция РЛС «Контур-К» позволяет обнаруживать и классифицировать метеорологические образования.

РЛС «Контур-К» обеспечивает построение следующих карт: Z на различных высотах; атмосферных явлений погоды (ливни, грозы, град); интенсивности осадков и видимости в осадках; высоты верхней границы облачности.

Технические характеристики РЛС «Контур-К» приведены в таблице А.1 согласно источнику [57]. В Интернет-ресурсе разработчика [57] указано, что РЛС «Контур-К» может быть установлен в стационарном и мобильном варианте.

Таблица А.1 – Основные технические характеристики РЛС «Контур-К»

Наименование параметра	Значение
Метеорологический потенциал радиолокатора, не менее, дБ	48
Габариты купола, мм	Диаметр-1250, высота-1000
Масса РЛП, кг, не более	60
Напряжение питания	220В, 50Гц
Диапазон рабочих температур, °С	От минус 40 до 55
Сектор сканирования по азимуту, град	0-360
Пределы перемещения антенной решетки по углу места, град	От минус 15 до 105
Скорость сканирования в обеих плоскостях, град/с	от 6 до 24
Импульсная мощность, кВт	не менее 5
Длительность импульсов, мкс	от 0,6 до 4,0
Частота повторения импульсов, Гц	от 200 до 1400
Размеры антенной решётки, мм	560x560
Ширина диаграммы направленности антенной решётки, град	4,2x4,2
Коэффициент усиления антенной решётки, дБ	33

Недостатком настоящего радиолокатора является его некогерентность, т.е. невозможность получить данные о ветровых характеристиках (векторное поле ветра, сдвиги ветра, турбулентность).

2) ДМРЛ-3 производства АО НПО «Лианозовский электромеханический завод»

В таблице А.2 указаны основные тактико-технические характеристики ДМРЛ-3.

Таблица А.2 – Основные технические характеристики ДМРЛ-3

Наименование параметра	Значение
Диапазон, МГц	9550-9650
Ширина диаграммы направленности, град (*уточняется при разработке)	1,2/1,7/2,2*
Максимальная рабочая дальность, км Режим «Локация» Режим «Измерение профиля»	60/125/250 5-20
Максимальная измеряемая скорость, м/с До дальности 60 км, не менее	±50
Диапазон измерения ширины спектра, м/с	до 10
Диаметр антенны, м (*уточняется при разработке)	2,0/1,5/1,0*
Импульсная мощность, кВт	0,3-0,5
Уровень боковых лепестков, дБ, не более (*уточняется при разработке)	-27*
Погрешность установки угла антенны, град	±0,1
Максимальная скорость движения антенны, град/с В горизонтальной плоскости В вертикальной плоскости	36 36
Тип передатчика	транзисторный
Длительность зондирующего импульса, мкс	0,2...100,0
Частота повторения зондирующего импульса, Гц	300...7500
Коэффициент шума приемника, дБ	5
Стабильность передатчика, дБ	50
Темп обновления метеоинформации, сек	5-300
Динамический диапазон приемника, дБ, не менее (*уточняется при разработке)	70 (линейный)*

Задача: предоставление информации об ОЯП, связанных с нестационарным состоянием атмосферы (сдвиги ветра, турбулентность, спутные струи).

Назначение: обеспечение метеоинформацией различных потребителей (Гидрометслужба, Авиация, МЧС).

Предполагается, что ДМРЛ-3 будет выдавать следующие данные: радиолокационная отражаемость, радиальная скорость, ширина спектра скоростей.

3) Метеорологическая РЛС WR10X фирмы Eldes (Eldes Lassen International, Italy) [117] – рисунок А.1.

Задача: мониторинг за явлениями погоды, в том числе опасными, в режиме реального времени.

Назначение: обеспечение населения и заинтересованных организаций данными об атмосферных явлениях в районах со сложным рельефом, в труднодоступных регионах, в местах активного отдыха населения, в окрестностях бассейнов ГЭС, автомобильных и железных дорог, портов и аэродромов, вблизи сельскохозяйственных посадок.



Рисунок А.1 – Метеорологическая РЛС WR10X фирмы Eldes (Eldes Lassen International, Italy)

Таблица А.3 – Основные технические характеристики РЛС WR10X

Наименование параметра	Значение
<b>Трансивер</b>	
Рабочая частота	9410 МГц $\pm$ 30 МГц (опционально 9375 МГц $\pm$ 30 МГц)
Пиковая мощность	10 кВт (магнетрон)
Длительность импульса	0,3; 0,6; 1,2 мкс
Частота повторения импульсов	1600; 800; 500 Гц
Модулятор	Твердотельный
Приёмник	Логарифмический
Динамический диапазон	более 90 дБ
Промежуточная частота	60 МГц
Ширина полосы пропускания	4 МГц
Коэффициент шума	менее 4 дБ
<b>Антенна</b>	
Тип	Параболическая, с горизонтальной поляризацией, защищен обтекателем
Ширина ДНА по азимуту	менее 3,2°
Ширина ДНА по углу места	менее 3,2°
Боковые лепестки в пределах $\pm 10^\circ$	менее -23 dB
Усиление	менее 35 dB
Движение	Непрерывное азимутальное сканирование с шагом по высоте 0,1° в диапазоне от 0° до 90°
<b>Сигнальный процессор</b>	
Тип	Цифровая обработка с 14 битным АЦП
Параметры оценки	Отражаемость (Z) в dBZ
Коррекция помех	Статистическая
Чувствительность	7 dBZ на 25 km (стандарт)
Отображение и управление	Стандартные погодные продукты: РР-радиолокационная отражаемость, радиолокационная отражаемость с выборкой по максимуму и на различных высотах, сверхкраткосрочный прогноз.
Формат изображений	GIF, BMP, TIFF, JPEG, PNG
Дополнительные продукты	интенсивность осадков, накопленное количество осадков, выбор горизонтальных сечений, вертикальная выборка по максимуму, максимальная отражаемость, вертикальный профиль отражаемости, интегрированная карта сети локаторов, передача данных в коде BUFR
<b>Другие характеристики</b>	
Размеры	Цилиндрический обтекатель. Диаметр – 90 см. Высота – 130 см
Вес	<90 кг – без башни
Диапазон рабочих температур	Стандартно: 0÷40 °С (опционально нагреватели и охлаждение доступны по запросу для расширенных диапазонов)

4) Метеорологическая РЛС E700XD фирмы EWR Radar Systems (США) [119] – рисунок А.2.

Задача: наблюдения за метеорологическими явлениями и прогнозирование погоды.

Назначение: мобильная РЛС E700XD может быть установлена в труднодоступных регионах, характерна лёгкость монтажа/демонтажа.



Рисунок А.2 –Метеорологическая РЛС E700XD фирмы EWR (EWR Radar Systems, USA)

Таблица А.4 – Метеорологическая РЛС EWR E700XD X Band

Наименование параметра		Значение
Тип		X band
Диапазон однозначного измерения дальности		100-150 км
Метеорологические продукты		Все продукты Vaisala Iris + EWR/Mexrad level III
Диапазон однозначного измерения скорости		16 м/с - 64 м/с
Передатчик		
Тип		твердотельный EWR
Пиковая мощность		200 Вт; 500 Вт - опционно
Несущая частота		9,345 ГГц ±25 МГц
Длительность импульса		1 – 80 мкс
Частота повторения импульсов		варьируется от 500 Гц до 2500 Гц
Антенна		
Тип		щелевая решетка
Диаметр		стандартный – 75 см
Ширина луча		3,3°
Азимут		360° - непрерывное вращение
Угол места		-2° ÷ 90°
Скорость сканирования		0 ÷ 14 оборотов в минуту
Точность углового позиционирования		не более 0,1°
Цифровой приёмник и процессор сигналов		
Тип		Vaisala Sigmet RVP901
IF оцифровка		16 бит до 100 МГц в 5 каналов
Разрешающая способность по дальности		75 м с 2 МГц сигнала
Контроль радара		
Контроль радара		EWR WeatherScout III
Процессор		Vaisala Sigment Iris
Режимы сканирования		отображение карт в конических сечениях PPI, в горизонтальных сечениях. Volume and Sector and WeatherScout 3D
Локальный и удалённый дисплей		Windows 7 с EWR WeatherScout
Установка		
Легко устанавливается в любой ситуации, включая телескопическую мачту, автомобиль, трейлер, башню, неподвижное основание или морское крепление		
Системные требования		
Вес обтекателя в сборе		170 кг
Рабочая среда		-30°C ÷ 60°C

5) Метеорологическая РЛС EMPAR фирмы EWR Radar Systems (США)  
[119]

Задача: наблюдения за метеорологическими явлениями и прогнозирование погоды. Назначение: мобильное, временное, тактическое применения – рисунок А.3.

Таблица А.5 – Метеорологическая РЛС E750 фирмы EWR (США)

Наименование параметра 1	Значение 2
Системные параметры EMPAR X band Phased array Dual Pol Radar	
Несущая частота	9345 МГц ± 50 МГц, с шагом – 1 МГц
Частота повторения импульсов	500 ÷ 2500 Гц, с шагом 1 Гц
Диапазон однозначной дальности	150 км (60 км с максимальной ЧПИ)
Диапазон однозначной скорости при 1 кГц PRF (радиус 150 км)	± 8 м/с – без вобуляции ± 16 м/с – 2:3 отношение ЧПИ ± 24 м/с – 3:4 отношение ЧПИ ± 32 м/с – 4:5 отношение ЧПИ
Чувствительность радара на 50 км (80 мкс – длительность импульса)	+ 3 dBZ
Длительность импульса	1 мкс (несжатый) 10, 40, 80 мкс (полоса 2 МГц)
Интервалы дальности	125, 250, 500, 625, 750, 875, 1000 м
Активная антенна с электронным сканированием (АЕСА)	
Тип передатчика	Полностью когерентный, твёрдотельный с воздушным охлаждением
Пиковая мощность передатчика	1000 Вт пиковая мощность диафрагмы (массив - 3 панели) 360 Вт на панель
Поляриметрические режимы передачи	Однополяризационный (Н и V) Чередующиеся двойным поляриметрическим (Н и V – передатчик и приёмник)
Ширина луча антенны	3,8° (горизонтальная) 2° (вертикальная) – массив из 3° панелей 3,8° (горизонтальная) 6° (вертикальная) – единичная панель
Уровень БЛ	>25 дБ
Ослабление по кросс-поляризации	>25 дБ
Сканирование по азимуту	Механическое вращение, 360° непрерывно, оба направления
Сканирование по высоте	-20° ÷ +90°
Точность углового позиционирования	0,1°
Изменяемые пользователем опции сканирования	Индикатор диапазона высоты Сканирование секторов по азимуту Подавление излучения секторов
Цифровой приёмник / сигнальный процессор	

Цифровой приёмник и сигнальный процессор	EMPAR Multi-mode процессор
Приёмник	2 параллельных канала, 16 бит, 60 МГц средняя частота (IF)
Динамический диапазон	>95 дБ
Коэффициент шума приёмника	<2,5 дБ
Режимы обработки	Обработка импульсов пар или спектральная обработка (FFT/DFT)
Фильтрация помех	Фиксированное качество и адаптивная фильтрация помех
Подавление помех от земли	>40дБ
Предоставление информации в реальном времени	отражаемость средняя радиальная скорость ширина спектра
Поляриметрические измерения	Дифференциальная отражаемость ρHV – коэффициент корреляции ДФР – дифференциальная фаза распространения
Представляемый метео продукт	Вертикальный профиль ветра Горизонтальное поле ветра композитное отражение (низкие, средние, высокие слои) темпы накопления осадков Устанавливаемые пользователем предупреждения об ОЯП
Пользовательский интерфейс и программное обеспечение	
Программное обеспечение пользовательского интерфейса	EWR WeatherScout™
Операционная система	Windows XP или Windows 7
Рекомендованная компьютерная платформа	Коммерческий PC, двухъядерный процессор, 2,5 Гц, 4 Гб оперативной памяти
Вывод погодной информации	Geo-tiff, Google Earth .KML, .PNG, .JPG. NEXRAD Level III (опционально)
Вывод информации воздушного наблюдения	Asterix XML track files



Рисунок А.3 – РЛС EMPAR фирмы EWR (EWR Radar Systems, USA)



6) Метеорологическая РЛС RXM-25 X-Band фирмы Ridgeline Instruments Inc. (США) [142]

Задача: наблюдения за метеорологическими явлениями с горизонтальной дальностью до 50 км и пространственным разрешением ниже 40 метров.

Назначение: создание густой сети метеорологических РЛС – рисунок А.4.

Таблица А.6 – Метеорологическая РЛС RXM-25 фирмы Ridgeline Instruments Inc. (США)

Наименование параметра	Значение
Передатчик	
Тип	Магнетрон
Рабочая частота	9400 ±30 МГц
Число каналов	2
Пиковая мощность	8 кВт
Частота повторения импульса	2.0 КГц
Антенна	
Тип	параболическая
Поляризация	двойная
Диаметр	1,8 м
Усиление	45 dB
Ширина луча	1,4°
Скорость сканирования	60°/с (максимальное значение)
Ускорение сканирования	60°/с <sup>2</sup> (максимальное значение)
Сканирование по углу места	0° - 180°
Приемник	
Тип	Параллельный, линейный
Число каналов	2
Динамический диапазон	90 dB (1 МГц)
Цифровой приемник	
Динамический диапазон	105 dB (1 МГц)
Метеорологические продукты	
Поляризационная обработка	Коррекция затухания, классификация гидрометеоров
Метеорологические продукты	Z, V, W продукты двойной поляризации



Рисунок А.4 –Метеорологическая РЛС RXM-25 фирмы Ridgeline Instruments Inc. (США)

7) Метеорологическая РЛС SSWR-X100D фирмы TOSHIBA (Япония) [143] - рисунок А.5.

Задача: наблюдения за метеорологическими явлениями с высоким временным и пространственным разрешением.

Назначение: обеспечение гидрометеорологической информации различных заинтересованных служб и населения.



Рисунок А.5 -Метеорологическая РЛС SSWR-X100D фирмы TOSHIBA (Япония)

Таблица А.7 – Метеорологическая РЛС SSWR-X100D фирмы TOSHIBA (Япония)

Наименование параметра	Значение	
	Стационарный вариант размещения SSWR-X100D	Мобильный вариант размещения SSWR-X100DT
Система		
Несущая частота	9,3 – 9,8 ГГц (перенастраиваемо)	
Поляризация	Горизонтальная/ Вертикальная	Вертикальная/ Горизонтальная и
Минимальная дальность	>150 м	
Чувствительность	10 дБZ на >100 м	
Антенна		
Диаметр антенны	2 м	
Ширина луча	1,2°	
Рабочий диапазон по азимуту	0° – 360° непрерывно	
Рабочий диапазон по высоте	-2° ...+90°	
Точность углового позиционирования	±0,1°	
Скорость сканирования	0 – 6 оборотов в минуту	
Обтекатель		
Диаметр	4,5 м	-
Потери при передаче	0,4 дБ	-
Передатчик		
Усилитель	Полностью твердотельного типа (GaN HEMT)	
Пиковая мощность	400 Вт	
Ширина импульса	0,5 – 128 мкс	
Частота повторения импульса	100-20000 Гц	
Приемник		
Канал	4	
Динамический диапазон	>110 дБ	
Минимальное пространственное разрешение	75 м	
Максимальная однозначная скорость	>±70 м/с	
Возможность подавления местных отражений	>55 дБ	
Метеорологические продукты	Z, V, W, продукты двойной поляризации	

8) Метеорологическая РЛС CINRAD/XD фирмы BEIJING METSTAR RADAR CO., LTD (Китай) [110] – рисунок А.6.

Задача: наблюдения за ОЯП конвективного характера таких как грозы, град и измерение скорости, интенсивности, ширины спектра, поляризационных параметров целей.

Назначение: обеспечение радиолокационной метеорологической информацией высокой точности служб прогноза погоды для прогнозирования и предупреждения, а также использование данных РЛС CINRAD/XD в научно-исследовательских целях.



Рисунок А.6 -Метеорологическая РЛС CINRAD/XD фирмы BEIJING METSTAR RADAR CO., LTD (Китай)

Таблица А.8 – Метеорологическая РЛС CINRAD/XD фирмы BEIJING METSTAR RADAR CO., LTD (Китай)

Наименование параметра	Значение
Передатчик (полностью согласованный клистронный усилитель)	
Несущая частота	9,3 – 9,5 ГГц
Мощность	≥75 кВт
Ширина импульса	0,2-2,5 мкс
Подавление местных отражений	>46 дБ
Приемник	
Динамический диапазон	≥90дБ
Обтекатель	
Диаметр	4,5 м
Антенна	
Диаметр	2,4 м
Ширина луча	≤1°
Боковые лепески	≤ -28°
Усиление	≥43дБ
Поляризация	горизонтальная и вертикальная
Сканирование	обзорное (предоставление данных по углу места и слоям) и секторное
Дискретность измерений	
Доплеровская радиальная скорость	0,5 м/с
Ширина спектра скоростей	0,5 м/с
Дифференциальная отражаемость	0,2 дБ

9) Метеорологическая РЛС HYDRIX фирмы NOVIMET S.A. (Франция) [137] – рисунок А.7.

Задача: наблюдения за метеорологическими явлениями, высокодискретное и точное представление данных об осадках.

Назначение: обеспечение радиолокационной метеорологической информацией заинтересованных гидрологических, сельскохозяйственных, аэродромных служб.



Рисунок А.7 -Метеорологическая РЛС HYDRIX фирмы NOVIMET S.A.  
(Франция)

Таблица А.9 – Метеорологическая РЛС HYDRIX фирмы NOVIMET S.A. (Франция)

Наименование параметра	Значение
Дальность обнаружения	150 км
Пиковая мощность	70 кВт
Тип антенны	параболическая
Ширина диаграммы направленности	1,5°x1,5°
Размеры антенны	1,6 м
Вес	около 200 кг

10) Метеорологическая РЛС WR-2100 фирмы FURUNO (Япония) [123] – рисунок А.8.



Рисунок А.8 –Метеорологическая РЛС РЛС WR-2100 фирмы FURUNO  
(Япония)

Таблица А.10 – Метеорологическая РЛС WR-2100 фирмы FURUNO (Япония)

Наименование параметра	Значение
Направленность антенны	Двойная поляризация (вертикальная и горизонтальная) Одновременная передача/приём
Рабочая частота	Диапазон - 9,4 ГГц
Раствор луча	2,7 градусов (и вертикальный и горизонтальный лучи)
Максимальная выходная мощность	100 Вт (и вертикальный и горизонтальный лучи)
Вертикальный угол сканирования	-2 до 182 градусов (регулируется)
Скорость вращения антенны	16 оборотов в минуту (регулируется)
Дальность действия	Максимум - 50 км.
Режимы сканирования	PPI, CAPPI, RHI (возможен секторный обзор)
Параметры выходного потока	Коэффициент отражения Zh (dBZ), доплеровская скорость V (м/сек), ширина доплеровской скорости W (м/сек), разность фаз перекрестной поляризации выражаемая в $\Phi$ разности потенциалов (градус), специфичная дифференциальная фаза KDP (градус/км), коэффициент корреляции между двумя поляризациями rHV, фактор дифференциальной отражательной способности ZDR, интенсивность осадков R (мм/ч)
Исправление данных	Ослабление с увеличением дальности, затухание из-за дождя, завышенная доплеровская скорость, подавление возврата сигнала от земли и судна, подавление помех
Источник питания	100-240 напряжение переменного тока,
Потребляемая мощность	Максимально 650 Вт

Задача: наблюдения за метеорологическими явлениями, мониторинг осадков.

Назначение: обеспечение радиолокационной метеорологической информацией заинтересованных служб, мониторинг за водным режимом.

**Базы статистических данных для сравнения ветровых характеристик по данным МРЛК БАЗ и априорно достоверных (эталонных) метеорологических источников**

Таблица Б.1 – Расчёт разности значений скорости и направления ветра по данным АЭ «Долгопрудный» и МРЛК БАЗ «ЦВКГ им. А.А.Вишневого»

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Дата, время UTC		осреднение данных АЭ			данные МРЛК БАЗ			Разность АЭ-МРЛК БАЗ	
		диапазон высот	скорость, м/с	направление, градусы	высота, м (под высотой понимается середина слоя толщиной 1000 метров)	скорость, м/с	направление, градусы	скорость, м/с	направление, градусы
04.07.2018	0:00:00	0-1000	6,78	221,00	500,00	2,40	215,40	4,38	5,60
		1000-2000	6,94	204,50	1500,00	3,20	169,80	3,74	34,70
		2000-3000	6,68	206,00	2500,00	4,30	198,90	2,38	7,10



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		3000-4000	7,45	214,25	3500,00	6,80	224,40	0,65	-10,15
03.09.2018	0:00:00	4000-5000	6,94	274,75	4500,00	15,80	261,70	-8,86	13,05
		5000-6000	9,64	277,50	5500,00	13,90	267,20	-4,26	10,30
		6000-7000	9,25	288,00	6500,00	13,00	276,00	-3,75	12,00
03.09.2018	12:00:00	1000-2000	5,65	77,71	1500,00	2,70	96,70	2,95	-18,99
		2000-3000	3,60	91,00	2500,00	1,00	128,20	2,60	-37,20
		3000-4000	3,50	308,00	3500,00	1,20	219,60	2,30	88,40
		4000-5000	4,11	199,00	4500,00	2,00	238,20	2,11	-39,20
		5000-6000	4,11	231,50	5500,00	2,20	241,50	1,91	-10,00
11.09.2018	0:00:00	0-1000	6,80	134,67	500,00	5,00	170,80	1,80	-36,13
		1000-2000	8,35	182,00	1500,00	6,50	188,00	1,85	-6,00
		2000-3000	8,74	199,50	2500,00	6,40	196,30	2,34	3,20
		3000-4000	5,24	235,00	3500,00	5,20	209,00	0,04	26,00
12.09.2018	12:00:00	1000-2000	25,70	236,00	1500,00	14,60	222,50	11,10	13,50
		2000-3000	29,71	247,20	2500,00	14,20	238,10	15,51	9,10
		3000-4000	23,47	263,00	3500,00	13,80	254,90	9,67	8,10
16.09.2018	12:00:00	0-1000	7,84	331,25	500,00	10,70	5,60	-2,86	-34,35
		1000-2000	4,63	312,50	1500,00	7,50	324,30	-2,87	-11,80
		2000-3000	8,22	260,00	2500,00	7,70	283,70	0,52	-23,70
		3000-4000	11,69	255,50	3500,00	9,00	256,80	2,69	-1,30
		4000-5000	11,82	220,00	4500,00	10,30	237,60	1,52	-17,60
		5000-6000	15,93	197,50	5500,00	11,40	222,20	4,53	-24,70
		7000-8000	22,62	195,50	7500,00	13,30	200,70	9,32	-5,20
18.09.2018	0:00:00	0-1000	11,51	261,00	500,00	14,00	273,90	-2,49	-12,90
		1000-2000	14,05	265,33	1500,00	15,40	277,50	-1,35	-12,17
		2000-3000	17,82	275,00	2500,00	16,80	277,70	1,02	-2,70
		3000-4000	16,96	257,00	3500,00	18,00	276,30	-1,04	-19,30
		5000-6000	21,59	277,50	5500,00	19,40	272,90	2,19	4,60
06.10.2018	12:00:00	3000-4000	21,07	300,00	3500,00	15,60	289,80	5,47	10,20
		4000-5000	20,30	295,00	4500,00	19,50	282,80	0,80	12,20

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		5000-6000	25,01	291,00	5500,00	23,00	281,10	2,01	9,90
08.10.2018	0:00:00	0-1000	10,54	237,50	500,00	19,10	261,30	-8,56	-23,80
		1000-2000	22,79	265,00	1500,00	22,00	262,00	0,79	3,00
		2000-3000	25,53	246,67	2500,00	23,40	260,10	2,13	-13,43
		3000-4000	26,01	248,40	3500,00	24,00	256,60	2,01	-8,20
		4000-5000	35,29	243,67	4500,00	24,50	252,40	10,79	-8,73
		5000-6000	35,72	247,50	5500,00	25,50	248,50	10,22	-1,00
		6000-7000	37,01	260,00	6500,00	27,40	246,20	9,61	13,80
09.10.2018	12:00:00	6000-7000	14,91	255,00	6500,00	18,10	305,40	-3,19	-50,40
17.04.2018	12:00:00	4000-5000	10,79	315,00	4500,00	15,20	226,70	-4,41	88,30
		5000-6000	20,30	324,50	5500,00	30,40	296,80	-10,10	27,70
18.04.2018	0:00:00	0-1000	7,20	189,25	500,00	5,60	231,60	1,60	-42,35
		1000-2000	12,08	212,50	1500,00	13,60	185,30	-1,52	27,20
		2000-3000	13,62	227,25	2500,00	17,00	200,30	-3,38	26,95
		3000-4000	12,85	255,00	3500,00	18,50	223,20	-5,65	31,80
		4000-5000	12,85	270,00	4500,00	18,70	239,70	-5,85	30,30
18.04.2018	12:00:00	0-1000	8,35	317,75	500,00	5,80	263,60	2,55	54,15
		1000-2000	4,28	324,17	1500,00	0,20	77,60	4,08	-113,43
		2000-3000	2,47	269,60	2500,00	3,00	37,30	-0,53	-127,70
		3000-4000	3,08	247,50	3500,00	5,30	3,30	-2,22	-115,80
		4000-5000	5,48	256,33	4500,00	8,30	338,40	-2,82	-82,07
		5000-6000	6,68	186,75	5500,00	11,30	320,90	-4,62	-134,15
		6000-7000	10,79	170,00	6500,00	12,80	304,40	-2,01	-134,40
19.04.2018	0:00:00	0-1000	8,12	32,60	500,00	10,40	56,70	-2,28	-24,10
		1000-2000	11,82	70,00	1500,00	7,60	42,90	4,22	27,10
		2000-3000	10,79	55,00	2500,00	8,20	44,50	2,59	10,50
		3000-4000	10,79	53,00	3500,00	10,70	54,30	0,09	-1,30
		4000-5000	10,79	32,00	4500,00	13,50	63,00	-2,71	-31,00
22.04.2018	0:00:00	0-1000	10,92	318,75	500,00	14,10	329,30	-3,18	-10,55
		1000-2000	22,62	322,50	1500,00	9,10	333,80	13,52	-11,30

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
01.05.2018	0:00:00	0-1000	5,83	156,89	500,00	3,80	268,80	2,03	-111,91
		1000-2000	5,65	265,00	1500,00	2,40	285,80	3,25	-20,80
		2000-3000	7,54	272,17	2500,00	3,00	240,50	4,54	31,67
		3000-4000	11,31	278,00	3500,00	6,50	227,00	4,81	51,00
		4000-5000	11,99	289,67	4500,00	10,40	234,60	1,59	55,07
04.05.2018	12:00:00	0-1000	3,08	113,80	500,00	5,50	205,40	-2,42	-91,60
		1000-2000	4,11	245,00	1500,00	5,10	263,40	-0,99	-18,40
		2000-3000	7,88	250,00	2500,00	8,30	286,10	-0,42	-36,10
		3000-4000	9,77	250,00	3500,00	11,20	289,80	-1,43	-39,80
		4000-5000	9,77	280,00	4500,00	13,10	288,10	-3,33	-8,10
		5000-6000	8,33	262,00	5500,00	13,40	283,60	-5,07	-21,60
		6000-7000	8,22	273,40	6500,00	11,80	275,80	-3,58	-2,40
		7000-8000	8,22	270,00	7500,00	8,40	258,30	-0,18	11,70
05.05.2018	0:00:00	3000-4000	7,20	192,50	3500,00	7,60	186,90	-0,40	5,60
		4000-5000	6,34	227,67	4500,00	11,50	152,80	-5,16	74,87
		5000-6000	7,81	212,80	5500,00	16,20	140,00	-8,39	72,80
		6000-7000	8,57	242,00	6500,00	18,90	136,20	-10,33	105,80
13.05.2018	12:00:00	0-1000	5,65	65,00	500,00	17,40	310,80	-11,75	114,20
14.05.2018	12:00:00	1000-2000	4,11	91,67	1500,00	13,50	313,10	-9,39	138,57
15.05.2018	12:00:00	0-1000	3,60	207,50	500,00	3,90	165,30	-0,30	42,20
		1000-2000	6,68	157,33	1500,00	6,90	167,90	-0,22	-10,57
		2000-3000	8,74	155,50	2500,00	7,60	164,10	1,14	-8,60
		3000-4000	8,35	151,50	3500,00	7,20	157,90	1,15	-6,40
		4000-5000	8,22	165,00	4500,00	6,60	151,90	1,62	13,10
		5000-6000	9,25	175,00	5500,00	6,50	152,00	2,75	23,00
		6000-7000	7,45	155,50	6500,00	7,90	162,90	-0,45	-7,40
		7000-8000	10,45	165,00	7500,00	12,10	177,00	-1,65	-12,00
17.05.2018	12:00:00	2000-3000	9,51	211,00	2500,00	26,70	274,80	-17,19	-63,80
18.05.2018	12:00:00	0-1000	3,45	303,57	500,00	6,30	10,20	-2,85	-66,63

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		1000-2000	4,80	261,00	1500,00	4,80	338,80	0,00	-77,80
		2000-3000	9,25	201,25	2500,00	3,30	308,80	5,95	-107,55
		3000-4000	11,82	203,00	3500,00	2,10	242,90	9,72	-39,90
		4000-5000	8,74	188,43	4500,00	4,10	182,90	4,64	5,53
19.05.2018	0:00:00	0-1000	3,08	303,75	500,00	6,30	308,90	-3,22	-5,15
		1000-2000	3,34	349,75	1500,00	6,40	344,40	-3,06	5,35
		2000-3000	2,40	55,83	2500,00	5,50	10,90	-3,10	44,93
		3000-4000	2,06	114,00	3500,00	4,60	46,00	-2,54	68,00
20.05.2018	0:00:00	0-1000	5,91	345,83	500,00	5,60	325,50	0,31	20,33
		2000-3000	3,08	227,50	2500,00	4,80	305,50	-1,72	-78,00
		3000-4000	2,31	184,25	3500,00	1,70	252,50	0,61	-68,25
		4000-5000	3,94	233,83	4500,00	9,00	120,30	-5,06	113,53
27.05.2018	12:00:00	0-1000	8,91	270,00	500,00	14,10	278,40	-5,19	-8,40
05.06.2018	12:00:00	1000-2000	9,25	313,75	1500,00	3,30	353,80	5,95	-40,05
		2000-3000	13,45	281,83	2500,00	10,60	312,30	2,85	-30,47
		3000-4000	14,73	268,67	3500,00	16,80	310,80	-2,07	-42,13
07.06.2018	12:00:00	0-1000	6,17	271,25	500,00	3,00	177,90	3,17	93,35
		1000-2000	8,74	280,00	1500,00	7,00	235,10	1,74	44,90
		2000-3000	9,77	285,00	2500,00	11,90	288,90	-2,13	-3,90
		3000-4000	9,68	292,17	3500,00	22,80	304,00	-13,12	-11,83
10.06.2018	12:00:00	0-1000	3,21	270,50	500,00	0,60	320,80	2,61	-50,30
		1000-2000	4,85	332,00	1500,00	4,60	315,40	0,25	16,60
		2000-3000	13,19	322,67	2500,00	8,60	314,90	4,59	7,77
12.06.2018	12:00:00	0-1000	6,34	203,00	500,00	12,30	194,30	-5,96	8,70
		1000-2000	14,91	213,33	1500,00	18,00	197,80	-3,09	15,53
		2000-3000	21,07	245,00	2500,00	22,80	211,80	-1,73	33,20
		4000-5000	13,36	249,00	4500,00	27,20	232,40	-13,84	16,60
		5000-6000	12,85	255,00	5500,00	21,00	233,50	-8,15	21,50
15.06.2018	0:00:00	4000-5000	8,74	295,00	4500,00	15,70	336,70	-6,96	-41,70
		5000-6000	13,67	281,00	5500,00	4,80	295,90	8,87	-14,90

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		6000-7000	22,10	290,00	6500,00	13,50	199,20	8,60	90,80
24.06.2018	12:00:00	3000-4000	21,07	167,50	3500,00	3,60	301,40	17,47	-133,90
		5000-6000	25,91	166,40	5500,00	19,00	161,80	6,91	4,60
		6000-7000	23,13	190,00	6500,00	28,00	174,10	-4,87	15,90
		7000-8000	21,33	181,00	7500,00	34,10	182,40	-12,77	-1,40
25.06.2018	0:00:00	0-1000	7,97	323,75	500,00	17,40	319,20	-9,43	4,55
		1000-2000	3,60	297,14	1500,00	5,90	340,70	-2,30	-43,56
		2000-3000	10,28	192,50	2500,00	4,90	259,40	5,38	-66,90
		3000-4000	8,74	182,00	3500,00	15,70	252,90	-6,96	-70,90
29.06.2018	0:00:00	4000-5000	11,82	200,50	4500,00	23,20	163,20	-11,38	37,30
		5000-6000	14,73	223,33	5500,00	12,00	198,10	2,73	25,23
		6000-7000	14,91	230,00	6500,00	23,30	281,60	-8,39	-51,60
30.06.2018	12:00:00	5000-6000	16,06	191,25	5500,00	15,50	196,20	0,56	-4,95
		6000-7000	14,56	196,33	6500,00	8,50	178,00	6,06	18,33
01.07.2018	12:00:00	5000-6000	20,05	170,00	5500,00	25,30	241,90	-5,25	-71,90
04.07.2018	0:00:00	0-1000	5,65	184,17	500,00	2,40	215,40	3,25	-31,23
		1000-2000	6,94	204,50	1500,00	3,20	169,80	3,74	34,70
		2000-3000	6,68	206,00	2500,00	4,30	198,90	2,38	7,10
		3000-4000	7,45	214,25	3500,00	6,80	224,40	0,65	-10,15
04.07.2018	12:00:00	0-1000	7,20	202,25	500,00	2,00	227,70	5,20	-25,45
		1000-2000	9,77	223,33	1500,00	6,50	240,40	3,27	-17,07
		2000-3000	9,77	200,00	2500,00	8,10	226,50	1,67	-26,50
		5000-6000	6,85	188,33	5500,00	10,10	156,90	-3,25	31,43
		6000-7000	10,28	199,00	6500,00	9,70	138,30	0,58	60,70
08.07.2018	0:00:00	0-1000	2,26	215,20	500,00	6,50	145,20	-4,24	70,00
		1000-2000	2,88	222,20	1500,00	0,70	165,80	2,18	56,40
		2000-3000	5,78	194,00	2500,00	3,90	134,80	1,88	59,20
		3000-4000	5,91	207,50	3500,00	5,40	115,10	0,51	92,40
09.07.2018	12:00:00	0-1000	6,94	305,00	500,00	9,90	272,30	-2,96	32,70
		1000-2000	8,22	325,00	1500,00	9,30	293,50	-1,08	31,50

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		2000-3000	8,22	337,00	2500,00	8,10	306,20	0,12	30,80
		3000-4000	6,68	348,50	3500,00	5,90	323,60	0,78	24,90
		4000-5000	6,94	330,00	4500,00	4,90	12,30	2,04	-42,30
12.07.2018	12:00:00	0-1000	3,60	355,00	500,00	0,60	339,70	3,00	15,30
		1000-2000	3,77	33,33	1500,00	14,20	99,20	-10,43	-65,87
14.07.2018	12:00:00	8000-9000	8,74	250,00	8500,00	1,60	18,20	7,14	-128,20
		9000-10000	9,77	235,00	9500,00	2,60	251,40	7,17	-16,40
		10000-11000	10,28	227,33	10500,00	6,90	231,70	3,38	-4,37
16.07.2018	12:00:00	1000-2000	8,48	80,00	1500,00	22,40	132,60	-13,92	-52,60
17.07.2018	12:00:00	0-1000	9,77	50,00	500,00	9,90	350,90	-0,13	59,10
		1000-2000	11,82	56,50	1500,00	28,90	298,90	-17,08	117,60
20.07.2018	12:00:00	0-1000	4,88	122,50	500,00	6,80	165,00	-1,92	-42,50
		1000-2000	10,59	165,40	1500,00	19,40	107,30	-8,81	58,10
21.07.2018	12:00:00	0-1000	5,14	100,00	500,00	15,90	349,90	-10,76	110,10
24.07.2018	0:00:00	1000-2000	6,00	120,50	1500,00	12,70	122,60	-6,70	-2,10
		2000-3000	4,63	105,00	2500,00	9,60	114,00	-4,97	-9,00
		3000-4000	6,17	102,50	3500,00	7,60	105,00	-1,43	-2,50
		4000-5000	6,17	135,00	4500,00	6,50	98,80	-0,33	36,20
		5000-6000	4,88	105,00	5500,00	6,00	99,30	-1,12	5,70
25.07.2018	0:00:00	0-1000	9,77	114,17	500,00	6,90	132,00	2,87	-17,83
		1000-2000	16,96	143,00	1500,00	10,80	139,10	6,16	3,90
		2000-3000	16,45	120,33	2500,00	13,00	129,10	3,45	-8,77
		3000-4000	12,51	112,67	3500,00	14,60	115,20	-2,09	-2,53
		4000-5000	12,85	130,00	4500,00	16,30	104,20	-3,45	25,80
		5000-6000	11,97	140,29	5500,00	17,30	100,30	-5,33	39,99
27.07.2018	0:00:00	3000-4000	8,22	112,50	3500,00	5,20	100,90	3,02	11,60
		4000-5000	9,77	131,67	4500,00	1,00	141,40	8,77	-9,73
		5000-6000	6,17	149,50	5500,00	2,90	240,00	3,27	-90,50
		6000-7000	8,22	155,50	6500,00	6,90	238,70	1,32	-83,20

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
27.07.2018	12:00:00	2000-3000	13,54	145,00	2500,00	7,70	285,10	5,84	-140,10
		3000-4000	20,05	150,00	3500,00	6,30	174,10	13,75	-24,10
		4000-5000	14,78	130,50	4500,00	16,80	145,40	-2,02	-14,90
		5000-6000	10,07	141,40	5500,00	25,20	138,30	-15,13	3,10
		6000-7000	10,54	136,50	6500,00	27,90	134,70	-17,36	1,80
		7000-8000	10,79	157,50	7500,00	21,90	131,90	-11,11	25,60
28.07.2018	0:00:00	1000-2000	6,27	137,40	1500,00	2,10	89,60	4,17	47,80
		2000-3000	6,17	166,33	2500,00	3,40	186,00	2,77	-19,67
		3000-4000	6,34	145,33	3500,00	5,10	159,60	1,24	-14,27
		4000-5000	5,65	157,50	4500,00	9,40	140,10	-3,75	17,40
29.07.2018	0:00:00	5000-6000	5,48	106,67	5500,00	18,90	125,40	-13,42	-18,73
		6000-7000	5,65	85,00	6500,00	16,60	125,50	-10,95	-40,50
		7000-8000	4,88	2,50	7500,00	14,80	125,30	-9,92	-122,80
04.08.2018	12:00:00	4000-5000	10,02	302,00	4500,00	6,20	180,70	3,82	121,30
		5000-6000	10,02	306,00	5500,00	7,30	202,50	2,72	103,50
		6000-7000	10,79	313,00	6500,00	8,60	218,80	2,19	94,20
		7000-8000	12,85	327,33	7500,00	9,80	232,40	3,05	94,93
05.08.2018	12:00:00	0-1000	8,33	296,80	500,00	9,40	303,00	-1,07	-6,20
		1000-2000	8,74	240,00	1500,00	6,10	293,20	2,64	-53,20
		2000-3000	8,12	240,00	2500,00	6,10	277,30	2,02	-37,30
		3000-4000	14,26	254,75	3500,00	7,90	268,60	6,36	-13,85
		4000-5000	19,87	253,33	4500,00	10,20	265,30	9,67	-11,97
		5000-6000	21,76	246,67	5500,00	11,70	262,50	10,06	-15,83
		6000-7000	21,59	247,00	6500,00	11,50	256,90	10,09	-9,90
		7000-8000	23,30	254,67	7500,00	9,00	240,50	14,30	14,17
15.08.2018	0:00:00	0-1000	6,43	201,67	500,00	8,80	184,70	-2,38	16,97
		1000-2000	8,22	230,00	1500,00	10,10	173,70	-1,88	56,30
		2000-3000	9,00	260,00	2500,00	13,80	250,90	-4,81	9,10
		3000-4000	12,34	280,50	3500,00	28,70	270,20	-16,36	10,30
15.08.2018	12:00:00	0-1000	9,11	239,86	500,00	14,30	227,10	-5,19	12,76

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		1000-2000	12,51	250,00	1500,00	13,80	243,60	-1,29	6,40
		2000-3000	20,05	253,00	2500,00	14,50	252,40	5,55	0,60
		3000-4000	20,05	261,00	3500,00	15,10	254,60	4,95	6,40
		4000-5000	19,70	263,00	4500,00	15,00	252,20	4,70	10,80
		5000-6000	17,99	250,00	5500,00	13,90	246,30	4,09	3,70
		6000-7000	17,99	250,00	6500,00	11,90	235,90	6,09	14,10
16.08.2018	12:00:00	0-1000	3,73	331,00	500,00	7,20	311,80	-3,47	19,20
		1000-2000	5,45	327,80	1500,00	10,90	319,50	-5,45	8,30
21.08.2018	12:00:00	0-1000	6,99	275,80	500,00	12,10	338,20	-5,11	-62,40
		1000-2000	9,08	264,00	1500,00	17,70	298,70	-8,62	-34,70
		3000-4000	11,82	250,00	3500,00	14,50	279,10	-2,68	-29,10
		4000-5000	27,04	244,60	4500,00	9,60	269,00	17,44	-24,40
30.08.2018	12:00:00	3000-4000	11,05	165,75	3500,00	14,10	129,60	-3,05	36,15
		4000-5000	13,88	167,00	4500,00	15,30	150,40	-1,42	16,60
		5000-6000	13,36	182,00	5500,00	16,60	162,10	-3,24	19,90
		6000-7000	13,36	181,00	6500,00	16,50	163,80	-3,14	17,20
среднее значение разности параметров ветра (АЭ-МРЛК БАЗ)								-0,32	-1,34
СКО разности параметров ветра (АЭ-МРЛК БАЗ)								4,70	35,77



Таблица Б.2 – Сравнительная таблица скорости и направления ветра по данным AMDAR и МРЛК БАЗ за 2015 год

№ п/п	дата	Самолетные данные измерений ветра AMDAR						Данные МРЛК БАЗ Санкт-Петербург						Отклонение	
		время	х, км	у, км	высота, км	скорость ветра м/с	направление ветра, °	время МРЛК	х, км	у, км	высота, м	скорость ветра м/с	направление ветра, °	по скорости ветра, м/с	по направлению ветра, °
1	21.05.	13:33	-32,3	-11,7	2900	17	221	13:38	-32	-8	2500	18	246,6	-1	-25,6
2	15.06.	11:27	-22,8	-10,7	2300	12,9	231	11:39	-24	-8	2500	17,2	233,5	-4,3	-2,5
3	07.07.	13:35	-12,7	-9,6	1600	13,9	246	13:39	-16	-8	1500	9,3	210,1	4,6	35,9
4	07.07.	13:35	-16	-9,6	2000	15,9	254	13:39	-16	-8	2500	10,5	227	5,4	27
5	07.07.	13:36	-21,6	-9,6	2700	13,9	266	13:39	-24	-8	2500	9,5	228,9	4,4	37,1
6	07.07.	13:37	-27,8	-11,8	3200	15,4	261	13:39	-24	-8	3500	10,2	243,8	5,2	17,2
7	13.07.	15:34	-16	-10,7	1100	7,7	298	15:39	-16	-8	1500	6,9	273,2	0,8	24,8
8	13.07.	11:19	4,1	-17,4	2000	15,9	191	11:19	8	-16	2500	17,6	179,3	-1,7	11,7
9	31.07.	13:41	-17,7	-10,7	1600	11,3	268	13:49	-16	-8	1500	9,6	268	1,7	0
10	31.07.	4:03	-2	-16,3	1300	10,3	171	4:03	0	-16	1500	8,8	151,5	1,5	19,5
													среднее значение	1,66	14,51

Таблица Б.3 – База статистических данных для сравнения скорости и направления перемещения метеорологических явлений по данным МРЛК БАЗ

№ пп	цикл обновления данных, с	Расстояние, м	Аз, град	Средняя скорость, м/с	Средний азимут, град	Средняя скорость Доппл, м/с	Аз Доппл, град	Отклонение скорости, м/с	Отклонение направления, град
1	448	13580	104,6	26,07	106,97	23,60	100,00	-2,47	-6,97
		9420	104						
		12040	112,3						
2	448	9680	108,1	21,47	108,20	19,10	107,00	-2,37	-1,20
		9430	107,3						
		9740	109,2						
3	447	9230	107,7	20,95	108,17	20,30	109,00	-0,65	0,83
		9020	102,8						
		9850	114						
4	448	5440	54	10,60	57,90	7,30	49,00	-3,30	-8,90
		4330	56,3						
		4470	63,4						
5	307	4050	57,1	11,40	68,27	8,70	61,00	-2,70	-7,27
		3350	72,6						
		3100	75,1						
6	447	4870	19,2	11,25	15,23	10,20	10,00	-1,05	-5,23
		6200	20,8						
		4020	5,7						
7	463	6710	26,6	11,63	17,63	11,20	7,00	-0,43	-10,63
		3010	5,7						
		5980	20,6						
8	600	4030	82,9	8,21	91,47	5,80	96,00	-2,41	4,53
		5140	103,5						
		5600	88						
9	600	6010	86,2	10,45	87,47	6,70	94,00	-3,75	6,53
		7800	88,5						
		5000	87,7						
10	600	5730	77,9	8,52	83,63	5,70	86,00	-2,82	2,37
		5610	85,9						
		4000	87,1						
11	600	3060	78,7	7,82	73,63	5,20	77,00	-2,62	3,37
		5830	67,8						
		5190	74,4						

№ пп	цикл обновления данных, с	Расстояние, м	Аз, град	Средняя скорость, м/с	Средний азимут, град	Средняя скорость Доппл, м/с	Аз Доппл, град	Отклонение скорости, м/с	Отклонение направления, град
12	600	3200	180	5,75	182,60	6,80	199,00	1,05	16,40
		2910	195,9						
		4240	171,9						
13	600	4370	164,1	6,62	168,00	5,80	163,00	-0,82	-5,00
		3350	162,6						
		4200	177,3						
14	600	5690	169,9	7,40	175,63	6,90	185,00	-0,50	9,37
		3810	183						
		3820	174						
15	600	3060	191,3	5,14	183,80	6,70	194,00	1,56	10,20
		4100	182,8						
		2100	177,3						
16	600	6080	152,6	9,68	161,33	7,00	161,00	-2,68	-0,33
		4750	165,4						
		6600	166						
17	600	7070	171,9	11,97	173,83	12,00	174,00	0,03	0,17
		7050	173,5						
		7420	176,1						
18	600	9200	181,2	14,59	176,77	15,50	171,00	0,91	-5,77
		9230	175						
		7840	174,1						
19	600	5450	42,8	12,57	43,07	14,90	43,00	2,33	-0,07
		8500	47,9						
		8680	38,5						
20	600	2140	127,4	5,03	124,40	5,10	127,00	0,07	2,60
		2730	113,7						
		4180	132,1						
21	600	4390	114,2	7,64	118,97	6,30	108,00	-1,34	-10,97
		3970	130,9						
		5390	111,8						
22	600	3940	117,2	7,45	109,53	7,00	104,00	-0,45	-5,53
		4370	110,1						
		5100	101,3						
23	600	4060	128	8,26	121,93	6,30	131,00	-1,96	9,07
		5140	127,1						

№ пп	цикл обновления данных, с	Расстояние, м	Аз, град	Средняя скорость, м/с	Средний азимут, град	Средняя скорость Доппл, м/с	Аз Доппл, град	Отклонение скорости, м/с	Отклонение направления, град
		5660	110,7						
24	600	3220	25,8	5,68	14,03	6,20	17,00	0,52	2,97
		3410	-3,4						
		3600	19,7						
25	600	6290	17,6	6,90	15,30	5,90	30,00	-1,00	14,70
		3890	18						
		2240	10,3						
26	600	3340	51,1	6,82	45,73	6,10	36,00	-0,72	-9,73
		2280	28,8						
		6660	57,3						
27	600	4320	47,8	7,51	48,13	9,30	39,00	1,79	-9,13
		3380	55,8						
		5810	40,8						
28	600	6960	164,2	13,66	172,80	15,90	169,00	2,24	-3,80
		8310	177,9						
		9320	176,3						
29	600	5840	173,1	13,96	169,00	14,10	162,00	0,14	-7,00
		9610	177						
		9680	156,9						
30	600	8410	176,6	13,03	176,30	13,40	168,00	0,37	-8,30
		7910	177,1						
		7130	175,2						
31	600	7700	175	12,72	172,80	10,80	172,00	-1,92	-0,80
		7670	168						
		7520	175,4						
32	600	5800	-1	8,02	-4,00	5,10	356,00	-2,92	0,00
		2320	7,4						
		6320	-18,4						
33	600	4800	357,6	9,71	353,13	6,90	349,00	-2,81	-4,13
		6320	349						
		6350	352,8						
34	600	5550	25,6	9,64	19,30	8,20	7,00	-1,44	-12,30
		8120	9,9						
		3680	22,4						
35	600	6020	22,4	9,37	22,00	6,40	13,00	-2,97	-9,00

№ пп	ЦИКЛ обновления данных, с	Расстояние, м	Аз, град	Средняя скорость, м/с	Средний азимут, град	Средняя скорость Доппл, м/с	Аз Доппл, град	Отклонение скорости, м/с	Отклонение направления, град
		6600	14						
		4250	29,6						
36	600	6240	6,4	9,39	15,67	6,50	18,00	-2,89	2,33
		5350	20,8						
		5310	19,8						
37	600	10810	129	19,61	124,37	16,50	134,00	-3,11	9,63
		13890	120,3						
		10590	123,8						
38	600	10290	129,9	16,73	127,00	13,10	123,00	-3,63	-4,00
		11150	122,6						
		8680	128,5						
39	600	10210	122,6	15,03	127,33	11,10	120,00	-3,93	-7,33
		9210	124,4						
		7640	135						
40	600	8450	127,1	14,42	126,53	10,30	125,00	-4,12	-1,53
		8950	115,1						
		8560	137,4						
41	600	10710	122,8	15,73	127,87	12,70	119,00	-3,03	-8,87
		8770	133,2						
		8840	127,6						
42	600	8960	128,7	15,34	124,90	12,00	115,00	-3,34	-9,90
		9880	125,9						
		8780	120,1						
43	600	8860	115,4	15,46	116,27	14,10	125,00	-1,36	8,73
		7520	118,6						
		11450	114,8						
44	600	6480	98,9	11,72	90,07	10,80	83,00	-0,92	-7,07
		6990	76,8						
		7620	94,5						
45	600	6710	79,7	11,35	90,83	8,40	86,00	-2,95	-4,83
		6120	101,3						
		7600	91,5						
46	600	8210	92,8	13,08	95,87	10,50	102,00	-2,58	6,13
		7420	94,6						
		7920	100,2						

№ пп	цикл обновления данных, с	Расстояние, м	Аз, град	Средняя скорость, м/с	Средний азимут, град	Средняя скорость Доппл, м/с	Аз Доппл, град	Отклонение скорости, м/с	Отклонение направления, град
47	600	9300	64,5	11,56	54,80	12,30	67,00	0,74	12,20
		5690	50,7						
		5810	49,2						
48	600	10020	61,4	11,74	62,23	12,90	67,00	1,16	4,77
		5000	73,7						
		6120	51,6						
49	600	7140	78,7	11,52	76,33	12,70	75,00	1,18	-1,33
		5060	80,9						
		8540	69,4						
50	600	8000	77	12,59	74,23	11,50	79,00	-1,09	4,77
		8850	71,6						
		5820	74,1						
51	600	2880	110,3	6,22	102,07	6,40	103,00	0,18	0,93
		4400	92,6						
		3910	103,3						
52	600	3610	104,4	5,51	104,47	5,50	95,00	-0,01	-9,47
		2570	103,5						
		3740	105,5						
53	600	2830	98,1	6,05	92,93	5,20	96,00	-0,85	3,07
		3420	83,3						
		4640	97,4						
54	600	4490	110,9	7,21	106,23	6,20	107,00	-1,01	0,77
		4200	90						
		4290	117,8						
55	600	4750	112,2	6,67	106,57	6,60	118,00	-0,07	11,43
		3230	111,8						
		4020	95,7						
56	600	5010	118,6	8,54	125,90	6,50	134,00	-2,04	8,10
		5400	129						
		4970	130,1						
57	600	5460	8,4	10,21	7,23	14,70	9,00	4,49	1,77
		5920	11,7						
		7000	1,6						
58	600	5020	4,6	10,36	2,90	10,70	7,00	0,34	4,10
		8420	4,1						

№ пп	цикл обновления данных, с	Расстояние, м	Аз, град	Средняя скорость, м/с	Средний азимут, град	Средняя скорость Доппл, м/с	Аз Доппл, град	Отклонение скорости, м/с	Отклонение направления, град
		5200	0						
59	600	5410	4,2	9,36	4,00	10,20	7,00	0,84	3,00
		7000	0						
		4440	7,8						
60	600	9930	55,7	13,06	72,47	14,40	81,00	1,34	8,53
		8120	80,1						
		5460	81,6						
61	600	11740	66,9	19,37	68,33	16,00	85,00	-3,37	16,67
		14140	64,9						
		8980	73,2						
62	600	10920	61,6	18,12	68,27	15,10	73,00	-3,02	4,73
		13450	67,2						
		8250	76						
63	443	11830	108,7	24,00	107,43	22,50	107,00	-1,50	-0,43
		10250	107						
		9810	106,6						
64	447	11810	100,7	24,81	113,67	21,50	121,00	-3,31	7,33
		11830	108,7						
		9630	131,6						
65	600	13510	64,6	17,56	67,47	15,70	72,00	-1,86	4,53
		9750	64,5						
		8350	73,3						
66	600	7920	79,8	13,13	77,60	15,00	71,00	1,87	-6,60
		7660	70,1						
		8060	82,9						

### Расчёт точности определения сдвигов ветра

СКО определения  
углового положения

$$\sigma_{\theta} := \sqrt{\left(\frac{0.25 \cdot \pi}{180}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{2^{12}}\right)^2} = 4.625 \times 10^{-3} \text{ рад}$$

Модельное значение  
вектора состояния

$$\mathbf{X} := \left( 10 \quad 2 \quad 10 \quad \frac{2}{600} \quad \frac{2}{30} \quad \frac{2}{600} \quad 0 \quad \frac{2}{30} \quad \frac{-2}{600} \right)^T$$

Корреляционная матрица ошибок

$$\mathbf{R} := \left| \begin{array}{l} \mathbf{R}_{L-1,L-1} \leftarrow 0, \mathbf{B}_{L-1,L-1} \leftarrow 0 \\ \text{for } n \in 0..I-1 \\ \quad \mathbf{s} \leftarrow \mathbf{r}_n, \mathbf{d} \leftarrow \delta_n, \mathbf{a}_0 \leftarrow (\rho_n)_0, \mathbf{a}_1 \leftarrow (\rho_n)_1, \mathbf{a}_2 \leftarrow (\rho_n)_2 \\ \quad \mathbf{a} \leftarrow \left( \begin{array}{ccccccc} \mathbf{a}_0 & \mathbf{a}_1 & \mathbf{a}_2 & \mathbf{a}_0 \cdot \mathbf{d}_0 & \mathbf{a}_0 \cdot \mathbf{d}_1 & \frac{\mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{d}_0 + \mathbf{a}_0 \cdot \mathbf{d}_2}{2} & \mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{d}_1 & \mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{d}_1 & \mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{d}_2 \end{array} \right)^T \\ \quad \zeta_0 \leftarrow -\mathbf{a}_2, \zeta_2 \leftarrow \mathbf{a}_0, \eta_1 \leftarrow \sqrt{1 - (\mathbf{a}_1)^2}, \eta_0 \leftarrow \frac{-\mathbf{a}_0 \cdot \mathbf{a}_1}{\eta_1}, \eta_2 \leftarrow \frac{-\mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{a}_2}{\eta_1} \\ \quad \zeta \leftarrow \left[ \begin{array}{ccccccc} \zeta_0 & 0 & \zeta_2 & \zeta_0 \cdot (\mathbf{s}_0 + \mathbf{d}_0) & \zeta_0 \cdot \mathbf{d}_1 & \frac{\zeta_2 \cdot \mathbf{d}_0 + \zeta_0 \cdot \mathbf{d}_2}{2} & 0 & \zeta_2 \cdot \mathbf{d}_1 & \zeta_2 \cdot (\mathbf{s}_2 + \mathbf{d}_2) \end{array} \right]^T \\ \quad \eta_3 \leftarrow \eta_0 \cdot (\mathbf{s}_0 + \mathbf{d}_0), \eta_4 \leftarrow \eta_0 \cdot \mathbf{d}_1 + \eta_1 \cdot \mathbf{s}_0, \eta_5 \leftarrow \frac{\eta_2 \cdot (\mathbf{s}_0 + \mathbf{d}_0) + \eta_0 \cdot (\mathbf{s}_2 + \mathbf{d}_2)}{2} \\ \quad \eta_6 \leftarrow \eta_1 \cdot (\mathbf{s}_1 + \mathbf{d}_1), \eta_7 \leftarrow \eta_2 \cdot \mathbf{d}_1 + \eta_1 \cdot \mathbf{s}_0, \eta_8 \leftarrow \eta_2 \cdot (\mathbf{s}_2 + \mathbf{d}_2) \\ \quad \xi \leftarrow \sqrt{\sigma_{\theta}^2 \cdot \left[ (\zeta^T \cdot \mathbf{X})^2 + (\eta^T \cdot \mathbf{X})^2 \right]} + \sigma_V^2 \cdot \mathbf{a}, \mathbf{R} \leftarrow \mathbf{R} + \mathbf{a} \cdot \mathbf{a}^T, \mathbf{B} \leftarrow \mathbf{B} + \xi \cdot \xi^T \\ \mathbf{S} \leftarrow \mathbf{R}^{-1} \\ \mathbf{S} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}^T \end{array} \right.$$

СКО мезомасштабных дивергенций

$$\begin{aligned} \sqrt{\mathbf{R}_{3,3}} &= 1.339 \times 10^{-4} & \sqrt{\mathbf{R}_{5,5}} &= 7.579 \times 10^{-4} & \sqrt{\mathbf{R}_{8,8}} &= 1.44 \times 10^{-3} \\ \sqrt{\mathbf{R}_{4,4}} &= 7.42 \times 10^{-4} & \sqrt{\mathbf{R}_{6,6}} &= 1.381 \times 10^{-3} & \sqrt{\mathbf{R}_{7,7}} &= 1.251 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (1/c)$$

СКО сдвигов ветра

$$\sigma_{\Gamma} := \sqrt{\mathbf{R}_{3,3} + \mathbf{R}_{5,5} + \mathbf{R}_{8,8}} \cdot 600 = 0.98 \quad \sigma_{\mathbf{B}} := \sqrt{\mathbf{R}_{4,4} + \mathbf{R}_{6,6} + \mathbf{R}_{7,7}} \cdot 30 = 0.06$$