

Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГЛАВНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ ИМ. А.И.ВОЕЙКОВА»
(ФГБУ «ГГО»)**

Утверждаю

Директор ФГБУ «ГГО»

д. ф-м. н.


В.М.Катцов



**«Методические указания
по производству метеорологических радиолокационных наблюдений
на ДМРЛ-С на сети Росгидромета»**

в целях штормооповещения и метеообеспечения авиации

Санкт-Петербург

2013 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	6
ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ	9
ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ.....	10
1 ОСНОВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИЕ ПОРЯДОК ОСВОЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДМРЛ-С.....	12
1.1 Нормативные документы.....	12
1.2 Используемые стандарты.....	12
1.3 Нормативно-технические пособия.....	13
2 ДОПЛЕРОВСКИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ РАДИОЛОКАТОРЫ.....	14
2.1 Задачи, решаемые доплеровскими метеолокаторами	14
2.2 Методология доплеровских измерений	15
2.3 Базовый набор информационных продуктов, получаемых с помощью доплеровских МРЛ.....	18
3 ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ СЕЛЕКЦИЯ СИГНАЛОВ В ДМРЛ-С.....	23
3.1 Методология поляризационных измерений	23
3.1.1 Поляризационные параметры электромагнитных волн	23
3.1.2 Форма и ориентация гидрометеоров	24
3.1.3 Поляризационные свойства гидрометеоров	25
3.2 Базовый набор информационных продуктов, получаемых с помощью ДМРЛ-С в режиме поляризационной селекции сигнала.....	26
3.2.1 Дифференциальная отражаемость	26
3.2.2 Дифференциальный фазовый сдвиг	28
3.2.3 Коэффициент взаимной корреляции (кросскорреляции)	28
3.3 Практическое использование поляризационных методов измерений в метеоролокации.....	29
3.4 Сравнительная характеристика технических параметров современных ДМРЛ и радиолокаторов прошлого поколения	31

4 ДОПЛЕРОВСКИЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ РАДИОЛОКАТОР С ДВОЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ДМРЛ-С	33
4.1 Назначение и возможности ДМРЛ-С	33
4.2 Технические характеристики ДМРЛ-С.....	33
4.3 Ограничения радиолокационного метода наблюдений. Дальность радиовидимости	35
4.4 Состав ДМРЛ-С.....	39
4.4.1 Антенная система ДМРЛ-С	39
4.4.2 Волноводный тракт	41
4.4.3 Передающий тракт ДМРЛ-С	41
4.4.4 Приемный тракт ДМРЛ-С	42
4.4.5 Центральный управляющий вычислительный комплекс (ЦУВК)	42
4.4.6 Удаленный управляющий вычислительный комплекс (УУВК).....	44
4.5 Устройство и работа ДМРЛ-С	45
5 ОПАСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПОГОДЫ ОБНАРУЖИВАЕМЫЕ ДМРЛ-С НА ОСНОВАНИИ ИНФОРМАЦИИ О РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ОТРАЖАЕМОСТИ..	48
5.1 Распознавание форм облачности и ОЯП на основе информации о радиолокационной отражаемости	48
5.2 Радиолокационные критерии принятия решений об ОЯП.....	51
5.2.1 Облачность.....	52
5.2.2 Осадки.....	54
5.2.3 Ливни	54
5.2.4 Грозы.....	55
5.2.5 Град	56
5.2.6 Шквалы.....	57
5.2.7 Смерч	58
5.3 Оценка качества работы ДМРЛ-С	58
6 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОПЛЕРОВСКОЙ РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ОЯП	62
6.1 Приземный ветер	62
6.2 Вертикальный и горизонтальный сдвиг ветра.....	64
6.2.1 Турбулентность.....	69
6.2.2 Фронт порывов (линия шквала)	73

6.2.3	Микрошквал.....	75
6.2.4	Смерчи (торнадо).....	76
7	ОПИСАНИЕ РАБОТЫ С ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» (ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПО НАЗНАЧЕНИЮ)	78
7.1	Назначение ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010»	78
7.2	Графический интерфейс пользователя ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010»	79
7.3	Рабочее окно ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010».....	79
7.4	Формы представления данных	82
7.4.1	Индикатор кругового обзора PPI (Plan Position Indicator).....	85
7.4.2	Индикатор кругового обзора постоянной высоты Constant Altitude PPI (CAPPI)	85
7.4.3	Распределение радиолокационной отражаемости на различных высотных уровнях по типу псевдо-CAPPI.....	87
7.5	Просмотр и анализ карт радиолокационной метеорологической информации в ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010»	88
7.5.1	Карта радиальных доплеровских скоростей.....	88
7.5.2	Карты распределения радиальной составляющей ветра в атмосфере	93
7.5.3	Карта вертикального и горизонтального сдвига ветра	103
7.5.4	Карта ширины доплеровского спектра.....	107
7.5.5	Карты дифференциальной отражаемости, дифференциальной фазы и модуля коэффициента кросскорреляции	109
8	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ДМРЛ-С В СИНОПТИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ.....	111
8.1	Получение информации о скорости и направлении воздушного потока в атмосферных слоях на основании оперативного анализа карт радиальной составляющей доплеровской скорости	111
8.2	Определение зон дивергенции и конвергенции воздушного потока на основании анализа данных доплеровской скорости ДМРЛ-С	128
	ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	134
	БИБЛИОГРАФИЯ	136

**«Методические указания
по производству метеорологических радиолокационных наблюдений
на сети ДМРЛ-С Росгидромета»**

1 РАЗРАБОТАНЫ	ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»
2 РАЗРАБОТЧИКИ	И.А. Тарабукин, канд. физ.-мат. наук, зав. ОРМИ; Е.В. Дорофеев, канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией РМИ и КАВ ОРМИ; М.В. Львова, научный сотрудник ОРМИ; О.А. Дмитриева, ведущий геофизик ОРМИ; В.В. Зверев, ведущий геофизик ОРМИ; И.А. Басов, ведущий геофизик ОРМИ; И.Б. Попов, инженер-программист 1 категории ОРМИ; В.Б. Попов, ведущий инженер – программист ОРМИ.
3 ВНЕСЕНЫ	ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»
4 УТВЕРЖДЕНЫ	Директором ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» «01» октября 2013 г.
5 ВВЕДЕНЫ ВПЕРВЫЕ	01 октября 2013 г.

Предисловие

Настоящие методические указания устанавливают основные положения и правила проведения метеорологических радиолокационных наблюдений на доплеровских метеорологических радиолокаторах С-диапазона (далее по тексту ДМРЛ-С), знакомят с основами доплеровских наблюдений, порядком метеорологической интерпретации, критического контроля и передачи данных, полученных с помощью ДМРЛ-С. Особое внимание уделяется также техническому исполнению ДМРЛ-С и его составляющих, вопросам сопоставления радиолокационных данных с данными наземной наблюдательной сети (ННС) Росгидромета.

В настоящее время (по информации на 01.05.2013 г.) на сети «МРЛ-Штормооповещения» эксплуатируются 28 комплектов метеорологических радиолокаторов типа МРЛ-5 [12]. На сегодняшний день они полностью выработали свой технический ресурс, сильно устарев как физически, так и морально. Актуальной остается проблема обеспечения МРЛ запасными частями, ввиду прекращения производства многих комплектующих изделий, входящих в их состав. Моральное устаревание связано с тем, что за время, прошедшее с момента запуска серийного производства МРЛ-5 (конец семидесятых годов прошлого века), радиометеорология шагнула далеко вперед. Современные изделия большинства фирм, работающих в рассматриваемой области, измеряют шесть параметров сигнала, отраженного гидрометеорами, в то время как МРЛ-5 продолжает оценивать только один – радиолокационную отражаемость. На протяжении трех десятилетий этого было достаточно, чтобы с высокой степенью вероятности обнаруживать такие опасные явления как град, гроза и ливневые осадки. Введение методов спектральной и поляризационной обработки значительно расширяет список получаемых информационных продуктов, позволяя тем самым оценить как динамические свойства метеообъекта, так и особенности его микрофизической структуры.

В 2008 году Правительством Российской Федерации были приняты две Федеральные целевые программы: «Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации» и «Создание и развитие системы мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации». В рамках этих программ началось оснащение метеорологической радиолокационной сети Росгидромета современными доплеровскими МРЛ, предназначенными для оперативного получения радиометеорологической информации об опасных явлениях погоды (ОЯП).

В 2010 году на радиолокационной позиции Валдайского филиала ФГБУ «ГГИ», г. Валдай, были успешно проведены государственные испытания опытного образца ДМРЛ-С, разработанного по техническому заданию Росгидромета по контракту с Лианозовским электромеханическим заводом Концерна «Алмаз-Антей». В ходе испытаний радиолокатора ДМРЛ-С были подтверждены его высокие эксплуатационные характеристики, по ряду параметров превосходящие зарубежные аналоги. Успешное завершение испытаний с 2011 года позволило начать серийное производство ДМРЛ-С.

Модернизация радиолокационной сети Росгидромета совпала с техническим переоснащением наблюдательной сети многих европейских и мировых держав (в 2011 году Германия заменяет свои сетевые радары поляриметрическими, США начинает реконструкцию уже стоящих на сети WSR-88 с целью введения в них двух поляризационных каналов). Так, мы, в плане реконструкции метеородиолокационной сети, становимся в один ряд с ведущими странами. Особенность России при этом состоит в том, что наша сеть развертывается без той скрупулезной и планомерной методической подготовки, которая имела место, например, в США. Сеть ДМРЛ-С разворачивается с программным обеспечением, ориентированным на методику, разработанную для некогерентных и неполяриметрических локаторов типа МРЛ-5 [1]. Таким образом, поляризационные измерения ведутся, но их результаты выводятся в виде отдельных карт распределения оцениваемых параметров по пространству (без их использования в алгоритмах распознавания ОЯП). Так, например, критерии грозоопасности по-прежнему строятся исключительно по величине Y-параметра, хотя практическая ценность от использования доплеровских и поляризационных характеристик отраженного сигнала в качестве дополнительного предиктора в критериях распознавания ОЯП очевидна и бесспорна.

Исключительно важной задачей является не только внедрение на сеть метеородиолокаторов нового поколения ДМРЛ-С, но и создание единой радиолокационной сети с перекрытием информационных областей соседних радиолокационных станций, во всяком случае, для наиболее густонаселенной Европейской части России. В 2011 - 2015 годах планируется создание единого метеородиолокационного поля над территорией Российской Федерации, за счет установки 140 образцов ДМРЛ-С для мониторинга ОЯП с обеспечением возможности доступа к получаемой метеорологической информации широкого круга потребителей, в первую очередь – авиационных служб, МЧС РФ, служб обеспечения безопасности наземного и морского транспорта, служб ЖКХ и многих других.

Авторский коллектив Методических указаний понимает, что для полноценного и безукоризненного использования в оперативной практике штормоповещения данный документ подлежит всесторонней критике и дополнению ряда разделов, связанных с интерпретацией радиолокационных данных в процессе синоптического анализа, а также с использованием доплеровских характеристик, привлекаемых с целью идентификации различных классов ОЯП. Наряду с этим, остается открытым вопрос, связанный с корректировкой критериев обнаружения опасных явлений и обоснованием их применимости в разные сезоны года с учетом физико-географических особенностей региона в каждом конкретном месте расположения ДМРЛ-С. Эта работа невозможна без тесного взаимодействия держателя программного обеспечения (ПО) вторичной обработки информации (ВОИ) ДМРЛ-С – ФГБУ «ЦАО», коллектива ОРМИ ФГБУ «ГГО», ФГБУ «ВГИ» с сотрудниками групп по радиометеорологии, занятыми эксплуатацией ДМРЛ-С, получением, обработкой и анализом метеоинформации непосредственно на радиолокационных станциях сети штормового оповещения и метеообеспечения авиации Росгидромета.

Наряду с техническими и методическими трудностями остается открытым вопрос о преемственности сети МРЛ и ДМРЛ-С. В этой связи неясно (даже на уровне Центрального аппарата Росгидромета) строится ли новая сеть ДМРЛ-С на базе ныне существующих МРЛ-5, или же это совершенно новая ветвь развития наблюдательной сети со своим методическим сопровождением, планом и программой инспекций, специализированным техническим обслуживанием, обучением операторов и обслуживающего персонала и т.д.

ОРМИ ФГБУ «ГГО», выполняя обязанности методического сопровождения создаваемой сети доплеровских локаторов, принимает к рассмотрению вопросы, связанные с режимом наблюдений, интерпретацией и последующим анализом данных (в части количественных и качественных характеристик), полученных в результате обзора ДМРЛ-С, архивированием и передачей оперативной информации потребителям.

За период март – сентябрь 2013 года в адрес ОРМИ ФГБУ «ГГО» поступило 17 отзывов на документ «Методические рекомендации по производству метеорологических радиолокационных наблюдений на сети ДМРЛ Росгидромета» (список организаций, подготовивших отзывы, приведен в Приложении 1). Сбор отзывов и предложений по улучшению структурной и информационной части документа, осуществляли сотрудники Отдела радиолокационной метеорологии «ЦАО», активно взаимодействуя при этом с лабораторией научно-методических основ радиолокационных наблюдений ОРМИ ФГБУ «ГГО». Хочется поблагодарить специалистов (инженеров, радиометеорологов, сотрудников кафедры научно-исследовательских институтов, синоптиков и др.)

принявших участие в написании отзывов на предыдущую версию Методических указаний по эксплуатации ДМРЛ-С на сети Росгидромета (редакция от 29.01.2013 г.). Предложения и пожелания по улучшению документа, изложенные в отзывах, по возможности были максимально учтены в настоящей версии.

Анализ отзывов, полученных с сети ДМРЛ-С, показывает огромную заинтересованность специалистов, занятых эксплуатацией ДМРЛ-С, в решении вопросов поляриметрического анализа данных метеорологического радиолокатора, эффективного распознавания и фильтрации сигналов от неметеорологических рассеивателей с помощью поляризационных данных, возможности автоматического распознавания типа гидрометеоров и т.д.

Сразу следует оговориться, что вопросы исследования микроструктуры облаков, фильтрации радиолокационных сигналов, измерения интенсивности осадков и т.д. с использованием поляризационных параметров (тем более, оценка достоверности поляризационных измерений и возможных погрешностей) требуют более длительного и серьезного исследования чем то, что мы имеем в настоящий момент. Накопленный опыт работы с метеорадиолокатором нового поколения показывает лишь принципиальную возможность таких измерений, но не позволяет получить каких-либо количественных оценок по их использованию в синоптической практике.

«Методические указания по производству метеорологических радиолокационных наблюдений на сети ДМРЛ Росгидромета» будут совершенствоваться, по мере поступления новых отзывов ряд разделов будет изменен и дополнен новой информацией о возможностях доплеровских поляриметрических радиолокаторов. Особое внимание будет уделено методике проведения наблюдений и оценке полученных результатов путем сопоставления информации ДМРЛ-С с данными ННС, температурно-ветрового зондирования, самолетного метеорологического зондирования AMDAR и т.д. Без этих работ невозможно оценить эффективность проводимой модернизации.

Область применения

Методические указания предназначены для специалистов-радиометеорологов и инженеров УГМС (ЦГМС), занятых эксплуатацией ДМРЛ-С, получением и интерпретацией радиометеорологической информации для решения задач сети штормового оповещения и метеообеспечения авиации Росгидромета.

Принятые сокращения

АВОИ	аппаратура вторичная обработка информации
AMDAR	Aircraft Meteorological Data Relay (Международный код)
АМРК	автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс
АКСОПРИ	автоматизированный комплекс сбора, обработки и представления радиолокационной метеорологической информации
АПОИ	аппаратура первичная обработка информации
АРМ	автоматизированное рабочее место
АСКУ	автоматизированная система контроля и управления
АЦП	аналого-цифровой преобразователь
ВГИ	Высокогорный геофизический институт
ВМО	Всемирная метеорологическая организация
ВОИ	вторичная обработка информации
ВП	вертикальная поляризация
ВПП	взлетно-посадочная полоса
ВУМ	выходной усилитель мощности
ВЧ	высокая частота
ГГО	Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова
ГГИ	Государственный гидрологический институт
ГЛОНАСС/ GPS	Глобальная навигационная спутниковая система/ Global Positioning System
ГМО	гидрометеорологическое обеспечение
ГМС	гидрометеорологическая станция
ГП	горизонтальная поляризация
ГСИ	Государственные сертификационные испытания
ДМРЛ	доплеровский метеорологический радиолокатор
ДМРЛ-С	доплеровский метеорологический радиолокатор частотного С- диапазона
ДН	диаграмма направленности
ДЭС	дизельная электростанция
ЗИП	запасные части, инструмент и принадлежности
ИБП	источник бесперебойного питания
ИКАО	Международная организация гражданской авиации
ИКО	индикатор кругового обзора
КАВ	контроль активных воздействий

КСВН	коэффициент стоячей волны по напряжению
КШ	коэффициент шума
ЛВС	локально-вычислительная сеть
ЛС	линия связи
МАРС	метеорологическая автоматизированная радиолокационная сеть
МРЛ	метеорологический радиолокатор
МШУ	маломощный усилитель
ННС	наземная наблюдательная сеть
НЧ	низкая частота
НЧМ	низкочастотная модуляция
ОРМИ	отдел радиометеорологических исследований
ОС	операционная система
ОЯП	опасные явления погоды
ПО	программное обеспечение
ПОВО	программное обеспечение вторичной обработки
ПОИ	первичная обработка информации
ПФК	платы формирования кода
РД	руководящий документ
РЛИ	радиолокационная информация
РЛК	радиолокационный комплекс
РЛП	радиолокационная позиция
РЛС	радиолокационная станция
РПУ	радиопрозрачное укрытие
РЭ	руководство по эксплуатации
СВЧ	сверхвысокая частота
СОТР	система обеспечения теплового режима
СПО	специальное программное обеспечение
ТО	техническое описание
УВК	управляющий вычислительный комплекс
УУВК	удаленный управляющий вычислительный комплекс
УГМС	Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
ФГБУ	Федеральное государственное бюджетное учреждение
ЦАО	Центральная аэрологическая обсерватория
ЦГМС	Центр (областной, краевой, республиканский) по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
ЦУВК	центральный управляющий вычислительный комплекс

ЭВМ	электронно-вычислительная машина
ЭД	эксплуатационная документация

1 Основные документы, регламентирующие порядок освоения оборудования ДМРЛ-С

1.1 Нормативные документы

- 1 «О гидрометеорологической службе» Федеральный закон № 113-ФЗ, 1998 г.
2. «Об обеспечении единства измерений» Федеральный закон, 1993 г.
3. «Положение о Федеральной службе по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». Утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации № 372 от 20.07.2004.
4. «Технический регламент», ВМО - № 49.
5. «Руководство по климатическим практикам». ВМО, № 100.
6. РД 52.04.107-86. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 1. «Наземная подсистема получения данных о состоянии природной среды. Основные положения и нормативные документы».
7. «Порядок выполнения работ в охранных зонах гидрометеорологических станций», утвержденный приказом Госкомгидромета от 29 июня 1983 г. № 132 и согласованный с Минсельхозом СССР и Госстроем СССР.
8. Постановление Правительства Российской Федерации «Об утверждении положения о создании охранных зон стационарных пунктов наблюдений за состоянием окружающей среды, ее загрязнением» от 27 августа 1999 г. № 972.
9. Указание Руководителя Росгидромета А. И. Бедрицкого № 140 – 35/У от 19.10.2001 г. о разработке общих технических требований на автоматизированные радиолокационные метеорологические системы нового поколения и, в частности, на доплеровские метеорологические радиолокаторы (ДМРЛ), позволяющие получать информацию о динамических процессах в облачной атмосфере.

1.2 Используемые стандарты

- 1 ГОСТ 8.002-86 ГСИ. Государственный надзор и ведомственный контроль за средствами измерений. Основные положения.
- 2 ГОСТ 8.437-81 ГСИ. Системы информационно-измерительные. Метрологическое обеспечение. Основные положения.

- 3 ГОСТ 15150-69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.
- 4 ГОСТ 21128-83 Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Нормальные напряжения до 1000 В.
- 5 ГОСТ 24482-80 «Макроклиматические районы земного шара с тропическим климатом. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей».
- 6 ГОСТ 25870-83 «Макроклиматические районы земного шара с холодным и умеренным климатом. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей».

1.3 Нормативно-технические пособия

- 1 Атлас облаков под ред. А.Х. Хргиана, Н.И. Новожилова. Л.: Гидрометеиздат, 1978.
- 2 Инструкция. Критерии опасных явлений и порядок подачи штормового сообщения. 2002.
- 3 РД 52.04.320-91 Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ -2 , МРЛ-5 Гидрометеиздат, СПб, 1993, 357с.
- 4 Основные технические требования к системе обнаружения опасных атмосферных явлений и штормового оповещения на базе метеорологических радиолокаторов, утв. приказом Руководителя Росгидромета А. И. Бедрицкого от 21.06.2004 г. № 95.

2 Доплеровские метеорологические радиолокаторы

2.1 Задачи, решаемые доплеровскими метеолокаторами

В работе [1] рассмотрены возможности эксплуатации в метеорологической практике некогерентных МРЛ, к которым принадлежат используемые на территории России метеолокаторы типа МРЛ-5 (и до 2013 года – МРЛ-2).

При введении в МРЛ доплеровского режима работы частота радиолокационных сигналов, отраженных от перемещающихся объектов (облаков, осадков), отличается от частоты сигнала, излучаемого РЛС, на величину, пропорциональную радиальной составляющей скорости перемещения, то есть имеет место *доплеровский сдвиг частоты*. На существовании доплеровского сдвига частоты основан принцип работы доплеровского метеорологического радиолокатора (ДМРЛ).

ДМРЛ способен проводить наблюдения как в некогерентном режиме – режим «*Отражаемость*», так и в когерентном – режим «*Скорость*». В режиме «*Отражаемость*» принцип действия ДМРЛ и локатора типа МРЛ-5 совпадают. При этом радиус обнаружения ОЯП близок к аналогичному радиусу некогерентного МРЛ-5 и составляет 250 км. Одинаков также и перечень конечных радиолокационных продуктов, получаемых в этом режиме.

Когерентные метеорологические радиолокаторы (ДМРЛ) в сравнении с некогерентными (МРЛ-5 и МРЛ-2) обладают рядом дополнительных возможностей. Когерентность – свойство случайных процессов, которое характеризует их способность взаимно усиливать или ослаблять друг друга при сложении. Случайные процессы некогерентны, если функция их взаимной корреляции равна нулю, и когерентны, если она отлична от нуля. При проведении точных доплеровских измерений требуется обеспечить когерентность принимаемых отраженных сигналов.

Введение когерентного режима в радиолокаторе позволяет, как известно, измерять дополнительную информацию – радиальную составляющую скорости гидрометеоров. За счет такой информации становится возможным решение принципиально иных, чем в некогерентных МРЛ, задач.

В режиме наблюдений «Скорость» ДМРЛ-С функционирует в радиусе 125 км и позволяет при наличии радиоэха:

- выявлять зоны сильного ветра, их временные и пространственные градиенты;
- обнаруживать сдвиги ветра в тропосфере и ее приземном слое, создающие значительную опасность при взлете и посадке воздушных судов;
- определять мезомасштабные движения, т.е. локальные вращения масс воздуха;

- обнаруживать фронты порывов, т.е. вытекающие из облака потоки холодного воздуха, движущегося с большой скоростью;
- вычислять дивергенцию ветра, указывающую на сильные нисходящие потоки;
- проводить идентификацию микрошквалов - резких нисходящих движений воздуха в облаке.

Чаще всего перечисленные выше ОЯП сопровождают кучево-дождевую облачность. На стадии зрелости восходящие токи в кучево-дождевых облаках могут достигать скорости 50 м/с, а нисходящие по краям облака – 30 м/с. Интенсивные токи часто сочетаются с резкими порывами ветра, турбулентностью, обуславливающими штормовую болтанку самолетов. Зачастую в передней части кучево-дождевого облака (по ходу его движения) у земли образуется «крутящий вал», вызывающий шквалистое усиление ветра. К сожалению, некогерентные МРЛ, до настоящего времени используемые на сети “МРЛ-Штормооповещения”, не способны обнаруживать ни одно из вышеупомянутых явлений.

С другой стороны, изучение процессов, происходящих в кучево-дождевых облаках (Cb), представляет больше научный интерес, так как любые полеты в Cb для авиации запрещены. При радиолокационном или визуальном обнаружении мощных кучевых и (или) кучево-дождевых облаков, примыкающих к грозovým очагам, воздушным судам разрешается обходить их на удалении не менее 10 км. Динамические характеристики облака играют, в данном случае, второстепенную роль.

Куда более неоднозначны ситуации, когда опасные для авиации явления погоды наблюдаются на аэродроме. Самолет пересекает самый нижний слой атмосферы (приземный слой) в столь короткое время, что ограниченный запас высоты и скорости полета не позволяют летчику своевременно отреагировать на неожиданное изменение скорости и направления ветра. Как показывает авиационная практика, отсутствие информации о резком усилении или ослаблении ветра в ряде случаев является одной из главных причин летных происшествий. Эти обстоятельства доказывают неоспоримую ценность информации, получаемой с помощью доплеровских МРЛ.

2.2 Методология доплеровских измерений

В когерентно – импульсных ДМРЛ, к семейству которых принадлежит описываемый в настоящих методических указаниях ДМРЛ-С, сравнение частот излученного и отраженного сигналов происходит в течение весьма короткого интервала времени – межимпульсного интервала.

Доплеровский частотный сдвиг f_d представляет собой изменение фазы сигнала, отраженного от движущегося объекта, отсчитываемой последовательно в периоды повторения:

$$f_d = |f_{\text{пр}} - f_{\text{изл}}| = 2 \frac{v_p}{c} f_{\text{изл}} = \frac{2v_p}{\lambda}, \quad (2.1)$$

где:

v_p - радиальная (доплеровская) составляющая скорости цели (м/с),

$f_{\text{изл}}$ – излучаемая частота (Гц),

$f_{\text{пр}}$ - принимаемая частота (Гц),

λ - длина волны источника излучения (м),

c – скорость распространения электромагнитного излучения ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с).

Для импульсного ДМРЛ максимальная измеряемая радиальная скорость ($U_{\text{макс}}$) в зависимости от длины волны λ и частоты повторения зондирующих импульсов $F_{\text{пов}}$ определяется выражением:

$$U_{\text{макс}} = \frac{\lambda F_{\text{пов}}}{4} \quad (2.2)$$

Эта зависимость для длин радиоволн, используемых в радиометеорологии, приводится в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Зависимость $U_{\text{макс}} = \varphi(\lambda, F_{\text{пов}})$

λ , см	F пов, Гц				
	300	600	900	1200	1500
	U макс, м/с				
3	2.25	4,5	6.75	9,0	11,25
5,3	3.98	7.95	11.9	15.9	19.9
10	7.5	15.0	22.5	30.0	37.5

Из таблицы 2.1 следует, что небольшая величина $F_{\text{пов}}$ ограничивает измерение максимальной радиальной скорости ($U_{\text{макс}}$). Увеличение частоты следования импульсов неизбежно приведет к ограничению максимального расстояния $R_{\text{макс}}$, при котором возможно проведение доплеровских измерений. Это видно из выражения (2.3):

$$R_{\text{макс}} = \frac{c}{2F_{\text{пов}}} \quad (2.3)$$

Для расширения диапазона однозначных измерений скорости разработан метод изменения межимпульсных интервалов (*вобуляции*). При использовании этого метода зондирование метеоцелей производится с помощью двух последовательностей равноотстоящих зондирующих импульсов с разными частотами (периодами) повторения F_1 и F_2 . При этом чередование последовательностей зондирующих импульсов может быть произвольным [4].

Использование вобуляции позволяет увеличить величину однозначной скорости согласно формуле (2.4):

$$U_{\text{макс}} = \pm \frac{\lambda F_1}{4(1 - F_1/F_2)} \quad (2.4)$$

При использовании метода вобуляции выбираются кратности частот (периодов) повторения зондирующих импульсов в соотношениях 2/3, 3/4 или 4/5. Это проводится и в целях облегчения энергетического режима магнетрона (клизотрона).

При, например, $F_1 = 900$ и $F_2 = 1200$ $U_{\text{макс}} = \pm 28,8$ м/с.

В [4] также приводится диапазон однозначного определения доплеровской скорости $U_{\text{макс}}$ (м/с) в зависимости от частоты повторения $F_{\text{пов}}$ зондирующих импульсов, длины волны λ (м) в обычном режиме работы ДМРЛ и в режиме с вобуляцией, а также дальности достоверной оценки скорости $R_{\text{макс}}$ согласно выражению (2.3).

Таблица 2.2 - Диапазоны однозначного определения доплеровских скоростей в зависимости от частоты повторения импульсов и длины волны в обычном режиме работы ДМРЛ и в режиме с вобуляцией

$F_{\text{пов}}, \text{Гц}$	$R_{\text{макс}} = c/2F, \text{км}$	Диапазон частот/Длина волны, см		
		S/10	C/5,4	X/3,2
В обычном режиме, м/с				
$F_1 = 900$	165	$\pm 22,5$	$\pm 12,1$	$\pm 7,2$
$F_2 = 1000$	150	± 25	$\pm 13,5$	± 8
$F_3 = 1200$	125	± 30	$\pm 16,2$	$\pm 9,6$
В режиме с вобуляцией, м/с				
$\frac{F_1}{F_2} = \frac{900}{1200} = \frac{3}{4}$	125	± 90	$\pm 48,6$	$\pm 28,8$
$\frac{F_2}{F_3} = \frac{1000}{1200} = \frac{4}{5}$	125	± 125	$\pm 67,5$	± 40

Из таблицы 2.2 видно, как резко (от 3 до 5 раз) возрастает $U_{\text{макс}}$ при использовании метода вобуляции.

2.3 Базовый набор информационных продуктов, получаемых с помощью доплеровских МРЛ

Радиолокационные методы исследования облаков и осадков, применяемые в некогерентных и неполяриметрических радиолокаторах типа МРЛ-2 и МРЛ-5, основаны на измерении радиолокационной отражаемости Z , являющейся характеристикой метеорологических объектов. В настоящее время, радиолокационная отражаемость является единственным базовым информационным продуктом МРЛ, на основании которого, с использованием различных алгоритмов и критериев распознавания ОЯП, строятся карты высоты верхней границы радиоэха, интенсивности осадков, метеоявлений и т.д.

Применение доплеровских (когерентных) радиолокаторов позволяет в качестве базовых информационных продуктов использовать данные как об отражаемости Z , так и о средней радиальной составляющей скорости v и ширине доплеровского спектра радиальных скоростей σ , тем самым значительно расширив количество информационных продуктов, предоставляемых потребителям.

2.3.1 Радиолокационная отражаемость (Z)

Радиолокационной отражаемостью Z называют величину, характеризующую отражающие свойства единичного объема гидрометеоров. Суммарная отражаемость гидрометеоров в единице облучаемого объема может быть представлена формулой (2.5):

$$Z = \sum_i d_i^6 \left| \frac{m_i^2 - 1}{m_i^2 + 1} \right|^2 \quad (\text{мм}^6/\text{м}^3) \quad (2.5)$$

где d_i - диаметры отражающих частиц;

$\left| \frac{m_i^2 - 1}{m_i^2 + 1} \right|$ - множитель, учитывающий диэлектрическую проницаемость отражающих частиц.

Формула (2.5) справедлива при $\lambda \gg d$.

В этом случае, как видно из формулы, радиолокационная отражаемость определяется концентрацией и распределением частиц по размерам в единичном объеме и их комплексным показателем преломления. Отражаемость является специфической метеорологической характеристикой интегральной микроструктуры облаков и осадков. Величина Z не зависит от длины волны λ и от каких-либо других параметров радиолокатора. Вместе с тем, из формулы (2.5) становится очевидным, что отражаемость

хорошо реагирует на изменение крупнокапельной части спектра, т.е. процессы укрупнения частиц в облаках и осадках сразу же приводят к увеличению Z .

В облаках и осадках величина Z ($\text{мм}^6/\text{м}^3$) изменяется от $Z_{\min} = 10^{-3} \text{ мм}^6/\text{м}^3$ (туман) до $Z_{\max} = 10^7$ (сильный град) $\text{мм}^6/\text{м}^3$, ввиду этого, в практике радиолокационных наблюдений отражаемость выражают в дБ или dBZ относительно $Z_0 = 1 \text{ мм}^6/\text{м}^3$.

Стоит обратить внимание на то, что ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» использует в работе единицы отражаемости, выраженные в единицах dBZ, в то время как в Руководстве [1] используется величина $\lg Z$. Здесь следует сделать некоторые пояснения.

Отражаемость может быть также выражена как через диаметр отражающих частиц (2.5), так и через радиусы частиц a . Обозначая отражаемость, выраженную через радиус частиц Z_a , имеет место следующее соотношение:

$$Z = 64 \cdot Z_a \quad (2.6)$$

Далее, переходя к единицам dBZ, выражая Z относительно $Z_0 = 1 \text{ мм}^6/\text{м}^3$:

$$10 \cdot \lg Z = 10 \cdot \lg Z_a + 18 \quad (2.7)$$

В таблицах 2.17 – 2.19 [1] (стр. 99 – 111) для указания пороговых значений отражаемости и расчета комплексных критериев ОЯ используется величина $\lg Z_a$, хотя индексы в таблице опущены.

С другой стороны, результатом радиолокационных измерений является информация об эквивалентной отражаемости Z_e . Если не делается специальных оговорок, то в литературе по радиолокационной метеорологии приводятся результаты измерений Z_e . Эквивалентная отражаемость определяется через уравнение радиолокационных атмосферных образований:

$$Z_e (\text{dBZ}) = 10 \cdot \lg \frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{ш}}} - 10 \cdot \lg \Pi_M + 20 \cdot \lg R \quad (2.8)$$

где:

$\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{ш}}}$ - отношение принимаемого сигнала к уровню собственных шумов радиолокатора;

Π_M - метеорологический потенциал радиолокатора;

R - удаление отражающего объема облаков и осадков от радиолокатора.

При корректно выполненном расчете Π_M для правильно откалиброванного радиолокатора:

$Z_e = Z$, если отраженный сигнал формируется водными частицами;

$Z_e = Z - (7,2 \dots 6,5 \text{ dBZ})$, если отраженный сигнал формируется ледяными частицами.

Обобщая вышесказанное, связь между установленными в [1] критериями ОЯ с используемыми в ПО вторичной обработки ДМРЛ-С:

$$Z_e = 10 \cdot \lg Z_a + 18 \quad (2.9)$$

Получение значений радиолокационной отражаемости в ДМРЛ-С реализовано по 360 дискретным значениям азимута, 400 ячейкам дальности и 24 углам места.

Диапазон шкалы отражаемости в ДМРЛ-С от -30 до 70 dBZ. В зависимости от измеренной величины Z и от вертикальной протяженности поля отражаемости делается вывод о степени опасности наблюдаемого процесса.

2.3.2 Радиальная составляющая скорости

Наряду с получением информации о радиолокационной отражаемости доплеровский МРЛ способен измерять составляющую компоненту скорости движения метеообъекта вдоль линии (луча), проведенной в направлении от радиолокатора к метеоцели. Измеренная радиальная скорость совокупности метеоцелей может при этом быть положительной (если проекция скорости рассеивающих целей на луч направлена к локатору), или отрицательной (если проекция скорости рассеивающих целей на луч направлена от локатора) (Рис.2.1). Скорость движения метеоцелей, направление которой перпендикулярно радиолокационному лучу, не может быть оценена радиолокатором, т.к. в этом случае проекция радиальной скорости на направление визирования равна нулю.

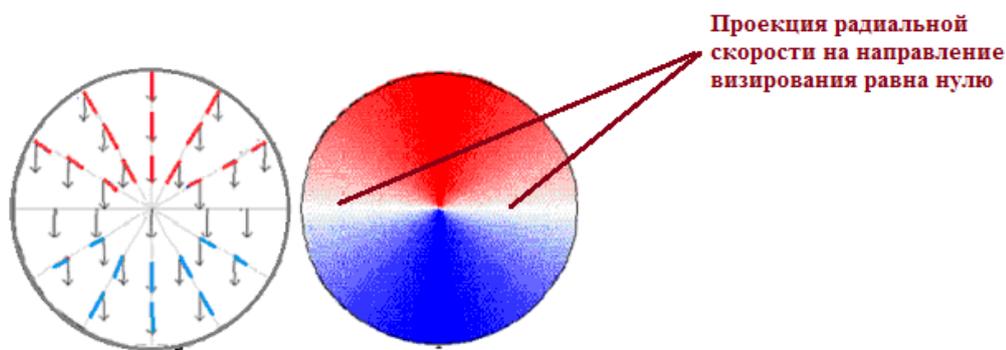


Рис. 2.1 - Радиальные компоненты скорости ветра, измеренной в **направлении** радиолокатора и **от него**

В ДМРЛ-С измерение сдвига частоты излучения, отраженного от движущейся метеоцели, а через нее радиальной составляющей скорости проводится путем измерения вариации частоты импульсов, отраженных от метеоцели, относительно частоты излученного зондирующего импульса. Изменение частоты анализируется в каждом бине (дискрете) дальности вдоль оси радиолокационного луча.

Размер дискрета дальности в радиальном направлении составляет 250 м, а по углу – равным ширине диаграммы направленности антенны (1 градус). Вдоль оси луча радиолокатора в радиусе обзора, равном 125 км, таких дискретов дальности будет 500.

Несмотря на то, что ДМРЛ-С измеряет только радиальную компоненту скорости ветра, для изучения целого ряда метеорологических явлений (таких как атмосферная турбулентность, мезоциклон и т.д.) большое значение может иметь ее пространственное распределение (подробнее об этом в Разделе 7.5).

2.3.3 Ширина доплеровского спектра радиальных скоростей

Доплеровский спектр $S(v)$ – спектр скоростей, который описывает распределение радиальной составляющей скоростей совокупности гидрометеоров в пределах импульсного объема ДМРЛ-С.

Доплеровский спектр ДМРЛ-С обычно считается гауссовским, так как главный лепесток диаграммы параболической антенны близок к гауссовской функции и распределение скоростей частиц в турбулентном воздухе описывается той же функцией. Как и в нормальном (гауссовом распределении), гауссовский доплеровский спектр радиозха метеообразований зависит только от двух параметров: средней частоты спектра (средней радиальной скорости частиц \bar{v}_p и его среднеквадратичной ширины σ_v). Ширина спектра σ_v является мерой распределения значений доплеровской скорости в пределах импульсного объема.

Другими словами, каждый отдельный гидрометеор внутри облучаемого элементарного объема, может быть охарактеризован своей радиальной скоростью и направлением движения. Поскольку метеообразование состоит из огромного числа элементарных целей, то на выходе приемника мы получаем случайный интегральный сигнал, спектр которого содержит информацию о распределении радиальных скоростей частиц внутри разрешающего объема. Аппаратура первичной обработки ДМРЛ-С проводит осреднение всех радиальных скоростей, присущих данному дискрету дальности, с последующим построением функции плотности распределения (рис. 2.2).

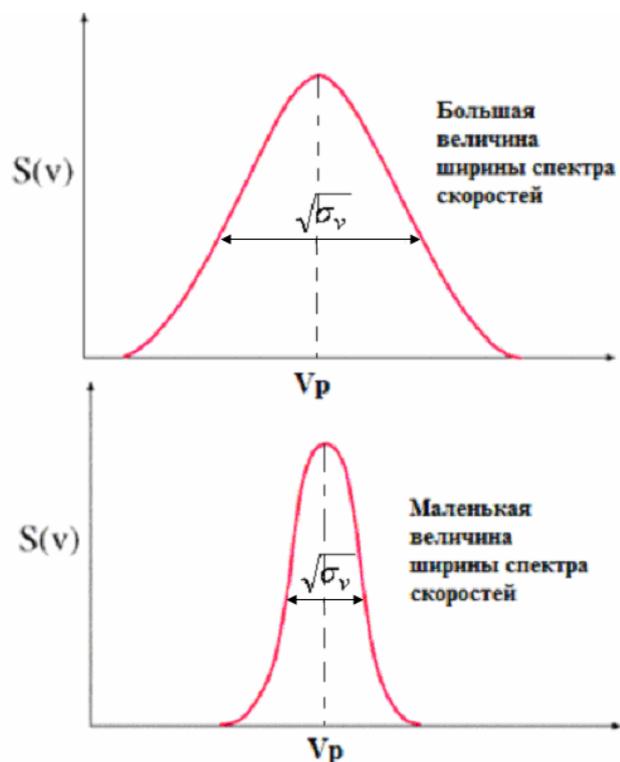


Рисунок 2.2 - Гауссово распределение доплеровского спектра скоростей гидрометеоров $S(v)$ и его среднеквадратическое отклонение ($\sqrt{\sigma_v}$) в пределах импульсного объема

Применительно к описанию меры разброса доплеровской скорости относительно среднего значения v_p ширина доплеровского спектра скоростей $\sqrt{\sigma_v}$ измеряется в тех же единицах, что и сама доплеровская скорость гидрометеоров, т.е. м/с.

Ширина спектра радиальных скоростей является функцией метеопараметров, характеризующих распределение гидрометеоров в пространстве по скоростям. Внутри данных Методических указаний будут рассмотрены вопросы изменения доплеровского спектра вследствие наблюдаемых метеорологических явлений. С метеорологическими явлениями связаны два основных механизма уширения спектра: сдвиг ветра и турбулентность. Детальное обсуждение вклада турбулентности и сдвига ветра в ширину спектра приводится в п.7.5.4, где также приведены некоторые результаты измерения этих параметров.

3 Поляризационная селекция сигналов в ДМРЛ-С

Возможность поляризационной селекции сигналов еще более расширяет базовый набор информационных продуктов, получаемых с помощью доплеровских радиолокаторов. ДМРЛ-С с возможностью поляризационных измерений открывает новые возможности для анализа характеристик облачной атмосферы путем наращивания набора выходной информации с учетом конкретных пожеланий потребителя, степени проработанности алгоритмов, климатических особенностей региона и т.д.

3.1 Методология поляризационных измерений

Методы поляризационной селекции основаны на свойствах метеоцели по-разному реагировать на облучение сигналами разной поляризации.

3.1.1 Поляризационные параметры электромагнитных волн

Все реальные излучатели на расстояниях, значительно превышающих их линейные размеры, создают сферические волны. Однако, при определенных допущениях, ограниченный участок сферы можно считать плоским. Следовательно, электромагнитную волну, возбуждаемую реальным излучателем в ограниченной области пространства, находящуюся на достаточном удалении от этого излучателя, можно считать плоской.

Плоская волна представляет собой два взаимосвязанных вектора: вектор напряжённости электрического поля \vec{E} и вектор напряженности магнитного поля \vec{H} . Векторы \vec{E} и \vec{H} взаимоперпендикулярны и перпендикулярны направлению распространения волны. Ориентация вектора напряжённости электрического поля относительно земной поверхности определяет поляризацию электромагнитной волны.

Если вектор \vec{E} лежит в плоскости падения волны, т.е. плоскости перпендикулярной поверхности Земли, говорят, что такая волна вертикально поляризована (рис.3.1). Если вектор \vec{E} лежит в плоскости, перпендикулярной плоскости падения волны, такая волна называется горизонтально поляризованной (рис.3.2). На рисунках 3.1 и 3.2 плоскость колебания вектора \vec{E} обозначена красным и синим цветом соответственно.

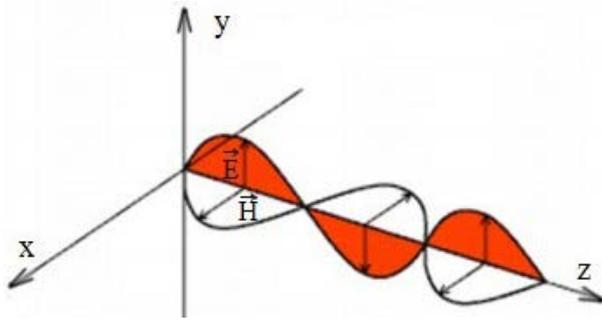


Рис.3.1 – Пример вертикальной поляризации электромагнитной волны

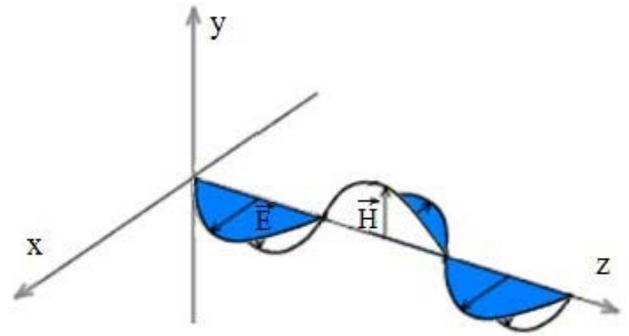


Рис.3.2 – Пример горизонтальной поляризации электромагнитной волны

Режим излучения ортогонально поляризованных волн в ДМРЛ-С допускается как одновременный так и череспериодный. И тот и другой обладают своими достоинствами и недостатками, хотя последние статьи В.М. Мельникова доказывают преимущества одновременного излучения в точности измерений при ограниченном числе импульсов:

- не требуется поляризационного переключателя на большую мощность;
- удобнее подавлять сигналы от местников;
- легче разделить доплеровские и поляризационные эффекты;
- при фиксированном времени накопления информации точность получаемых оценок выше [14].

3.1.2 Форма и ориентация гидрометеоров

При исследовании поляризационных свойств гидрометеоров рассматриваются следующие категории частиц: капли воды, градины, крупа, кристаллы (пластинки, иголки, столбики).

Жидкие капли в атмосфере диаметром $D < 0,35$ мм имеют сферическую форму, а капли диаметром до 1 мм имеют форму, хорошо описываемую сфероидом вращения. У каплей большего диаметра ($D \geq 4$ мм) основание постепенно сплющивается, а затем выгибается внутрь [4]. При наличии мощного электростатического поля, характерного для грозовых облаков, капля принимает форму сфероида, вытянутого вдоль направления поля. Капли воды имеют наиболее упорядоченную ориентацию среди всех гидрометеоров. Ось вращения сфероидальной капли направлена вдоль направления её движения, т.е. близка к вертикальному.

Для частиц града и крупы характерна сферическая или коническая форма, которая практически не зависит от размера частиц. Для этих гидрометеоров характерна меньшая упорядоченность ориентаций.

Ориентация оси вращения ледяных пластинок близка к вертикали, в отличие от кристаллов в виде игл, которые имеют произвольную ориентацию в горизонтальной плоскости.

3.1.3 Поляризационные свойства гидрометеоров

С учётом поляризации отражающие свойства стационарной радиолокационной цели можно полностью описать с помощью четырех величин, которые составляют матрицу рассеяния в линейном поляризационном базисе:

$$\hat{S} = \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

где величины S_{XY} (под X и Y подразумеваются индексы V (вертикальная) и H (горизонтальная)) в общем случае являются комплексными.

В выражении (3.1) индексы означают тип поляризации принимаемой составляющей рассеянного сигнала (первый индекс) и поляризацию зондирующей волны (второй индекс).

В действительности, измерять абсолютные значения амплитуд и фаз рассеянных волн довольно трудно, поэтому часто в практике радиолокационных метеорологических наблюдений используются относительные величины: дифференциальная отражаемость, дифференциальная фаза, коэффициент взаимной корреляции, линейное деполяризационное соотношение.

Таким образом, к базовым поляризационным продуктам, получаемым с помощью ДМРЛ-С, на основании которых рассчитываются остальные поляризационные характеристики метеобъектов, относятся:

- дифференциальная отражаемость (Z_{DR});
- дифференциальный фазовый сдвиг (Φ_{DP});
- коэффициент взаимной корреляции (кросскорреляции) вертикальной и горизонтальной составляющей сигнала (ρ_{HV}).

3.2 Базовый набор информационных продуктов, получаемых с помощью ДМРЛ-С в режиме поляризационной селекции сигнала

3.2.1 Дифференциальная отражаемость

Дифференциальная отражаемость (Z_{DR}) – отношение мощностей отраженного сигнала на горизонтальной и вертикальной поляризациях, определяется выражением:

$$Z_{DR}(\text{дБ}) = 10 \lg \left(\frac{P_H}{P_V} \right) = 10 \lg \left(\frac{\langle |S_{HH}|^2 \rangle}{\langle |S_{VV}|^2 \rangle} \right) = 10 \lg \left(\frac{Z_H}{Z_V} \right) \quad (3.2)$$

где Z_H и Z_V – оценки радиолокационной отражаемости, которые пропорциональны мощности принятого сигнала (P_H и P_V), при облучении цели сигналом горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно.

Исторически, методы измерения и анализ полученных значений дифференциальной отражаемости были предложены с целью повышения эффективности радиолокационного измерения осадков. Величина Z_{DR} является хорошим предиктором, учитывающим различные физические особенности совокупности рассеивающих гидрометеоров (формы, ориентации, диэлектрической проницаемости).

В зависимости от мощности сигнала, принимаемого на ортогональных поляризациях, величина Z_{DR} для метеорологических целей может принимать значения от -2 до +7 дБ. Отрицательным значениям Z_{DR} соответствуют случаи вертикально ориентированной симметрии совокупности гидрометеоров. Положительные значения отношения мощностей Z_{DR} свидетельствует о преимущественной горизонтальной ориентации рассеивающих частиц. Значения Z_{DR} близкие к нулю свидетельствуют о пространственной симметрии совокупности гидрометеоров внутри отражающего объема (Рис. 3.3):

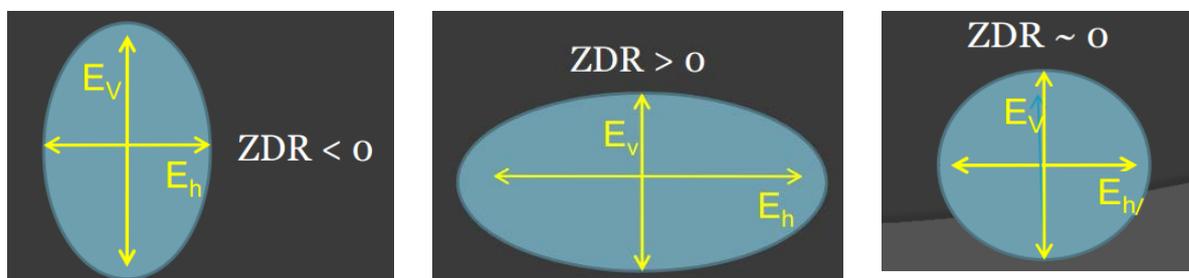


Рисунок 3.3– Примеры пространственной ориентации рассеивающих частиц

Отраженные сигналы с $Z_{DR} \ll 1$ позволяют идентифицировать зоны отражений от местных предметов, а сильно положительные значения Z_{DR} могут свидетельствовать о

наличии в зоне обзора ДМРЛ-С мигрирующих птиц и скопления насекомых (в теплый период года).

Другим, важным направлением практического использования дифференциальной отражаемости является определение фазового состояния гидрометеорологических рассеивателей. Высокие положительные значения Z_{DR} характеризуют крупнокапельную жидкую фазу. Близкие к нулю или отрицательные значения Z_{DR} являются признаком твердых хаотически ориентированных частиц. Зоны больших положительных значений Z_{DR} выше нулевой изотермы могут указывать на локализацию восходящих потоков с выносом крупных капель в верхнюю часть облака, а близкие к нулю или отрицательные значения Z_{DR} ниже нулевой изотермы предположительно обусловлены интенсивными нисходящими потоками [15].

Нижеприведенный рисунок схематично иллюстрирует одно из возможных распределений гидрометеоров (разного фазового состояния, степени изотропии, размера) по высоте в теплый период года и оптимальные углы возвышения антенны для их практического наблюдения (рис. 3.4):



Рисунок 3.4 – Схематичное изображение пространственного распределения гидрометеоров и оптимальные углы возвышения антенны ДМРЛ-С для их обнаружения

Обобщая все вышесказанное, можно сформулировать несколько перспективных направлений, базирующихся на измерении эхосигнала для двух ортогонально поляризованных волн, а именно:

- оценка среднего размера капель в осадках;
- различение снега и дождя;
- различение сухого и мокрого снега.

С другой стороны, дифференциальная отражаемость, хотя и является важным информативным элементом в обнаружении и идентификации типа гидрометеоров, нельзя

переоценивать ее роль в понимании процессов, происходящих в облачной атмосфере. При оценке метеорологической ситуации в зоне обзора ДМРЛ-С данные о дифференциальной отражаемости необходимо сопоставлять с результатами других измерений (радиолокационной отражаемостью, интенсивностью осадков, дифференциальной фазой и т.д.).

3.2.2 Дифференциальный фазовый сдвиг

Отраженные от метеообъектов сигналы на вертикальной и горизонтальной поляризациях отличаются не только по мощности, но и по фазе. Разность фаз обусловлена тем, что в процессе отражения от несферических частиц волны вертикальной и горизонтальной поляризации получают разные фазовые добавки, и постоянные распространения горизонтально и вертикально поляризованных волн в анизотропной среде также различны.

Дифференциальный фазовый сдвиг используется для определения удельного (т.е. на единицу длины) фазового сдвига:

$$K_{DR} = \frac{1}{2} \frac{d\Phi_{DR}}{dr} \quad [3.3]$$

где r – дальность цели.

Величина K_{DR} , аналогично Z_{DR} , зависит от формы и ориентации частиц, а также от их агрегатного состояния (для снега ее значение меньше, чем для дождя). Однако следующие специфические особенности делают ее применение для измерения осадков очень эффективным:

- гораздо меньшая, чем у Z_{DR} , чувствительность к распределению капель по размерам;
- независимость от ослабления в осадках, большом граде и частичного блокирования луча;
- прямая пропорциональная зависимость ее величины от концентрации частиц.

3.2.3 Коэффициент взаимной корреляции (кросскорреляции)

Коэффициент взаимной корреляции вертикальной и горизонтальной составляющей сигнала ρ_{HV} – это модуль коэффициента корреляции между горизонтально и вертикально ориентированными отраженными волнами.

$|\rho_{HV}|$ по сути представляет собой коэффициент взаимной корреляции диагональных элементов матрицы рассеяния (3.1):

$$\rho_{HV} = \frac{\langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle}{\langle |S_{HH}|^2 \rangle^{1/2} \langle |S_{VV}|^2 \rangle^{1/2}} \quad [3.4]$$

Модуль коэффициента взаимной корреляции является исключительно информативным классификационным параметром. Его значение близко к единице для большинства гидрометеоров и отличие его от единицы тем большее, чем больше дисперсия форм и дисперсия ориентаций отражающих несферических частиц. Наличие эффектов нерэлеевского рассеяния также способствует уменьшению величины $|\rho_{HV}|$.

Согласно теоретическим оценкам и экспериментальным данным, полученным в S-диапазоне, величина $|\rho_{HV}|$ для дождей изменяется в пределах от 0,9 до 1,0 с наиболее вероятными значениями 0,96— 0,98. Для града коэффициент $|\rho_{HV}|$ может принимать существенно меньшие значения, что может служить важным диагностическим признаком наличия града в облаке. В нижней части слоя таяния также отмечается хорошо выраженный минимум $|\rho_{HV}|$ [2].

Другой важной особенностью использования $|\rho_{HV}|$ является яркий контраст между радиолокационными сигналами от метеообъектов и подстилающей поверхности. Если для метеообъектов величина $|\rho_{HV}|$ близка к единице, то для подстилающей поверхности она приближается к нулю [16].

3.3 Практическое использование поляризационных методов измерений в метеорадиолокации

Уникальная возможность, которую дает использование поляризационных методов измерения характеристик метеоцели – возможность коррекции ослабления радиоволн гидрометеорами. В настоящее время признано [5], что для длин волн меньше 10 см количественные измерения интенсивности осадков, водности и т.п. при наличии указанных ослаблений возможны только двухполяризационными радарными. При этом фундаментальную роль играет дифференциальная фаза Φ_{DR} , которая не зависит от ослабления. Так, простое линейное соотношение между ослаблением ΔZ и Φ_{DR} позволяет восстановить сигнал, который ослаблен на 30 – 40 дБ.

Из выше изложенного следует, что практическая ценность поляризационных методов измерений в метеорадиолокации состоит в:

1. Улучшении качества радиолокационных измерений, что выражается в:

- автоматической самокалибровке локатора, основанной на независимости удельной дифференциальной фазы K_{DR} от калибровки локатора;
- надежной коррекции сигнала на ослабление в осадках за счет независимости от величины ослабления дифференциальной фазы Φ_{DR} ;
- устойчивости к частичной блокировке луча препятствиями из-за нечувствительности к ней K_{DR} ;
- эффективном распознавании и фильтрации сигналов от неметеорологических рассеивателей, использующих свойства модуля коэффициента корреляции $|\rho_{HV}|$.

2. Уникальной способности автоматического распознавания типа гидрометеоров, основанной на анализе совокупности оценок величин Z , Z_{DR} , K_{DR} и включающей:

- детектирование града с высокой точностью;
- различение дождя от снега;
- выявление зон обледенения.

3. Высокой точности измерения осадков как летних, так и зимних. Доказано, что для дальностей менее 100 км применение поляризационных методов уменьшает ошибку указанных измерений вдвое, что признано самым большим прорывом в измерении осадков за всю историю применения радаров в метеорологии.

Практическая ценность поляризационных измерений для авиации состоит в открытии следующих дополнительных возможностей:

- краткосрочный прогноз конвективных явлений на основе раннего детектирования восходящих потоков;
- определение толщины слоя переохлажденной жидко-капельной фазы;
- обнаружение града на больших высотах в облаках;
- определение высоты расположения зон ледяных кристаллов;
- определение зон потенциального обледенения выше нулевой изотермы.

3.4 Сравнительная характеристика технических параметров современных ДМРЛ и радиолокаторов прошлого поколения

В таблице 3.1 приведена сравнительная характеристика основных параметров МРЛ-5 и МРЛ-2, широко используемых в России и странах СНГ: ДМРЛ-С, устанавливаемого в рамках проводимой модернизации радиолокационной сети РФ и двух зарубежных аналогов «WSR-88D» (США) и «Meteor 500С» (Германия). WSR-88D (weather surveillance radar – 1988 Doppler) с 1988 года и по настоящее время является основным радиолокатором оперативной сети США. «Meteor 500С» и ДМРЛ-С - доплеровские метеорологические радиолокаторы нового поколения, в которых в полной мере учтен опыт эксплуатационников, практиков-метеорологов и достижения радиоэлектроники последних десятилетий.

Таблица 3.1 – Сводная таблица основных технических характеристик когерентных и некогерентных радиолокаторов, выпускаемых серийно и используемых в целях штормового оповещения

Основные параметры	МРЛ-2	МРЛ-5		WSR-88D (USA)	Meteor 500 С (Германия)*	ДМРЛ-С (Россия)
		Канал I	Канал II			
Полоса частот	X	X	S	S	C	C
Длина волны, см		3	10	10-11	5,6	5,3
Импульсная мощность, кВт	210	250	800	1000	250	15**
Минимально принимаемая мощность, дБ/Вт	-132	-134	-136	-136	-142 (2,0 мкс) -138 (0,8 мкс)	-140
Частота повторения зондирующих импульсов (Гц) в режиме: отражаемость скорость	300	250 или 500	250 или 500	250 700-1200	250 1200	300 1500
Длительность зондирующего импульса (мкс) в режиме: отражаемость скорость	1 или 2	1 или 2	1 или 2	2 0,8-0,9	2 0,83	1-60
Однозначно определяемая доплеровская скорость, м/с	–	–	–	±32	±48	±50

Основные параметры	МРЛ-2	МРЛ-5		WSR-88D (USA)	Meteor 500 C (Германия)*	ДМРЛ-С (Россия)
		Канал I	Канал II			
Максимальная дальность обнаружения метеобъектов, км	300	300	300	450	500	250
Диаметр антенны, м	3,0	4,5	4,5	8,54 (29 фт)	4,2	4,5
Ширина ДНА на уровне 3 дБ, град	0,8	0,5	1,5	0,9	1,0	1,0
Уровень боковых лепестков, дБ	-10	-23	-23	-29	-28	-29
Подавление местников, дБ				-50	-45	-50
Потребляемая мощность (3×220; 50 Гц), включая кондиционеры, кВт	19	14	14	10	10	10
Миним. наработка, т. час	20	20	20	50	50	50

Примечания:

* В комплектации, установленной в аэропорту «Пулково» (Санкт-Петербург).

** Импульсная мощность до «сжатия» импульса.

Анализ таблицы 3.1 показывает, что основная тенденция при разработке нового поколения МРЛ – повышение разрешающей способности по угловым координатам (ширина ДНА $\leq 1^0$), увеличение минимальной отражаемости, т.е. повышение вероятности обнаружения облаков любых форм и турбулентных зон при безоблачном небе, а также обеспечение доплеровского режима работы МРЛ в радиусе 100-125 км. Также имеется тенденция к использованию длин волн 5-5,5 см, что является компромиссом между локаторами с длинами волн 3 и 10 см. Данный диапазон в меньшей степени позволяет видеть мелкие морозящие осадки, однако обеспечивает неплохие дальности при обнаружении опасных явлений.

4 Доплеровский метеорологический радиолокатор с двойной поляризацией ДМРЛ-С

4.1 Назначение и возможности ДМРЛ-С

ДМРЛ-С предназначен для обеспечения метеорологической информацией, метеорологических служб аэродромов гражданской авиации, прогностических центров, гидрологических органов Росгидромета, а также других потребителей радиолокационной метеорологической информации.

ДМРЛ-С обеспечивает:

- получение информации о полях облачности, осадков и связанных с ними опасных явлениях погоды (гроза, град, ливни, и т.д.), интенсивности и накопленном количестве осадков за любой промежуток времени, параметрах ветра и турбулентном состоянии атмосферы, фазовом состоянии гидрометеоров в облаках (при возможности работы в режиме двойной поляризации), водности облаков и других геофизических явлениях и процессах;
- определение высоты верхней границы радиоэха;
- отображение распределения радиолокационной отражаемости на различных высотных уровнях по типу псевдо-САРРІ;
- расчет и отображение вертикального профиля скорости и направления ветра до высоты верхней границы обнаружения метеообъектов;
- отображение интенсивности осадков (с возможной оценкой типа осадков - дождь, снег, град);
- отображение накопленного количества осадков за любой интервал времени;
- определение опасных явлений погоды (град, гроза, шквальные усиления ветра, интенсивный дождь и снег, сильная турбулентность);
- отображение скорости и направления перемещения облачных систем;
- отображение радиолокационной отражаемости в трехмерном виде;
- выдачу радиолокационной информации в необходимых кодограммах.

4.2 Технические характеристики ДМРЛ-С

Основные тактико-технические характеристики ДМРЛ-С приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 -Основные тактико-технические характеристики ДМРЛ-С

Наименование		Значение
1	Рабочий диапазон частот, МГц	от 5600 до 5650
2	Зона обзора	
	Инструментальная дальность обнаружения (км)	250
	Минимальная дальность (км), не более	1
	Угол места, град	от -2 до + 91
3	Антенна	
	Тип	зеркальная параболическая
	Ширина ДН в двух плоскостях по уровню 3 дБ на каждой поляризации, град	1,0
	Коэффициент усиления, дБ, не менее	45
	Боковые лепестки, дБ, не более	минус 29
	Поляризация	линейная; ГП / ГП+ВП.
	4	Передатчик
	Тип	Клистронный
	Импульсная мощность, кВт, не менее	15
	Длительность импульса, мкс	1,0; от 25.. 60 мкс
	Средняя частота зондирования, Гц	509
	Тип модуляции	МОНО/НЧМ
5	Приемник	
	Коэффициент шума, ед, не более	2,5
	Промежуточная частота, МГц	60
	Стабильность зондирующего сигнала, дБ, не менее	50
6	Темп обзора, мин, не более	10
7	Наличие АСКУ	Имеется
8	Надежность	
	Наработка на отказ, ч	3000
	Среднее время восстановления, ч, не более	0,5
9	Обработка	
	АЦП, бит	16
	Опорная частота, МГц	80
	Наличие АПОИ и АВОИ	АПОИ+АВОИ
10	Энергопитание	
	Напряжение, В	$3 \times 220 / 380^{+10\%}_{-15\%}$
	Частота, Гц	$50 \pm 2\%$
	Мощность, потребляемая аппаратурой с учетом СОРТ, кВт	не более 10

4.3 Ограничения радиолокационного метода наблюдений. Дальность радиовидимости

Радиоволны сантиметрового диапазона распространяются в атмосфере не по прямолинейным, а по криволинейным траекториям. Причиной такого явления является атмосферная рефракция, обусловленная диэлектрической неоднородностью атмосферы.

Диэлектрическая проницаемость и показатель преломления воздуха в диапазоне радиоволн зависят от давления, температуры и влажности воздуха. Все эти параметры в атмосфере обычно убывают с высотой. Убывает с высотой и величина показателя преломления воздуха, которая у земли может изменяться от 1,0026 до 1,0046.

С другой стороны, показатель преломления атмосферы определяется как отношение скорости распространения радиоволн в вакууме к их скорости в реальной атмосфере. Поскольку в верхних слоях показатель преломления меньше, траектория любой радиоволны, излучаемой при малых углах возвышения антенны, по мере удаления от источника радиоволн загибается вниз, к поверхности Земли.

По аналогии с оптическим горизонтом вводится понятие «радиогоризонт», т.е. линия, образованная точками касания «радиозрения» с поверхностью земли.

Из-за влияния водяного пара, величина показателя преломления воздуха для радиоволн выше, чем величина показателя преломления для световых частот. Отсюда скорость распространения радиоволн в реальной атмосфере должна уменьшаться по сравнению со скоростью распространения в вакууме, а траектория должна искривляться в большей степени, чем траектория световых лучей. Дальность радиогоризонта оказывается в среднем на 15% больше дальности оптического горизонта.

Радиорефракция в атмосфере и расстояние до горизонта определяются не абсолютным значением показателя преломления, а тем, насколько быстро он изменяется с высотой, т.е. его вертикальным градиентом. Для нормальной атмосферы вертикальный градиент показателя преломления воздуха (g_n) равен минус $4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$. Искривление радиолуча в нормальной атмосфере называется *нормальной рефракцией*. Радиус кривизны при этом будет равен 25000 км, что составляет примерно четыре радиуса земли.

При расчёте дальности радиовидимости удобнее траекторию радиоволн представить в виде прямой линии, введя понятие эквивалентного радиуса земли $a_{эkv}$. Например, в условиях нормальной рефракции $a_{эkv} = 4/3 a$.

Тогда дальность радиовидимости r_{gr} (км) при поднятой на высоту h_A (м) над поверхностью земли антенне радиолокатора и находящейся на высоте $H_{Ц}$ (м) над поверхностью Земли цели, будет определяться по формуле:

$$r_{pr} = \sqrt{2a \cdot k \cdot h_A} + \sqrt{2a \cdot k \cdot H_{\text{ц}}} = 4,1 \cdot (\sqrt{h_A} + \sqrt{H_{\text{ц}}}), \quad [4.1]$$

где $a=6370$ км, $k=4/3$ в условиях нормальной рефракции.

С учетом сферичности Земли и рефракции соотношение между высотой цели $H_{\text{ц}}$, дальностью обнаружения R и углом места имеет вид (при $R \ll a_3$):

$$H_{\text{ц}} = \frac{R^2 \cos^2 \Theta}{2k \cdot a_3} + R \cdot \sin \Theta + H_A \quad [4.2]$$

При некоторых условиях может наблюдаться аномальное распространение радиоволн сантиметрового диапазона, связанное с изменением коэффициента рефракции. На рисунке 4.1 изображены траектории распространения радиоволны при различных типах рефракции. Явления рефракции в общем случае трёхмерные, однако градиент показателя преломления практически неизменен в горизонтальной плоскости, поэтому их обычно рассматривают как двумерные.

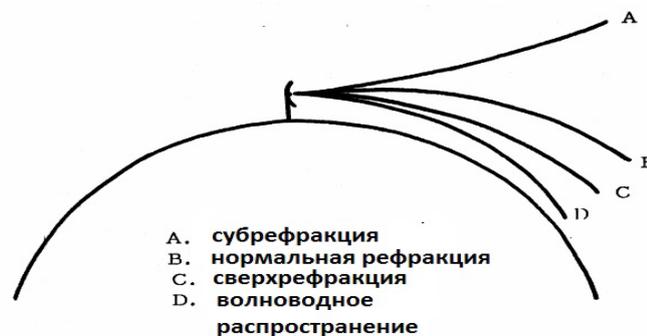


Рисунок 4.1 - Траектории распространения радиоволн при различных типах рефракции

Если коэффициент атмосферной рефракции увеличивается с высотой со скоростью меньше нормальной, то изгиб у траектории радиолокационных лучей будет меньшим, и они в меньшей степени следуют кривизне земной поверхности, что приведёт к уменьшению дальности радиогоризонта. Такое явление называется пониженной рефракцией (субрефракцией) [1].

Субрефракция характерна для холодного времени года, особенно над водной поверхностью, когда температура воздуха более чем на 20°C ниже температуры воды.

Если коэффициент атмосферной рефракции убывает с высотой со скоростью больше нормальной, то радиолокационный луч изгибается сильнее и в большей степени следует кривизне земной поверхности. В этом случае траектория радиолокационных лучей будет стремиться прижаться к земной поверхности, что вызовет увеличение дальности радиолокационного горизонта. Это явление называется повышенной рефракцией (сверхрефракцией) [1].

Предельным случаем сверхрефракции является волноводное распространение, при котором радиоволны, направленные под небольшим углом наклона к горизонту, распространяются внутри высотного атмосферного волновода (между плоскостью поверхности земли или воды и границей температурной инверсии) на большие расстояния, следуя кривизне земной поверхности [20].

Сверхрефракция обычно возникает при наличии инверсии температуры, при пониженной влажности атмосферы в приземном слое. В дни выпадения осадков сверхрефракция, как правило, не наблюдается. Условия для сверхрефракции в основном возникают в следующих метеорологических ситуациях:

- при перемещении теплых сухих масс воздуха с континента на более холодную морскую поверхность в летнее время;

- над сушей при ясной безоблачной погоде ночью, при возникновении приземных радиационных инверсий температуры, сопровождающихся образованием росы;

- в областях повышенного давления (антициклон), вследствие оседания воздуха на верхних уровнях при образовании так называемой инверсии сжатия, сопровождающийся, как правило, значительным уменьшением содержания водяного пара. В этих случаях образуются приподнятые атмосферные волноводы, иногда они сливаются с приземными, образуя высотные волноводы [1].

Тесная связь явления аномальной рефракции с синоптической обстановкой позволяет прогнозировать её появление по метеорологическим данным, что важно, так как ошибка определения положения объекта радиолокационными методами из-за аномальной рефракции может превышать 50% [20].

На рисунке 4.2 приводится пример сверхрефракции в оптическом диапазоне. На верхней маленькой картинке изображён вид Фараллоновых островов при нормальной рефракции в атмосфере, на нижних маленьких и основном изображениях - миражи, вызванные сверхрефракцией.

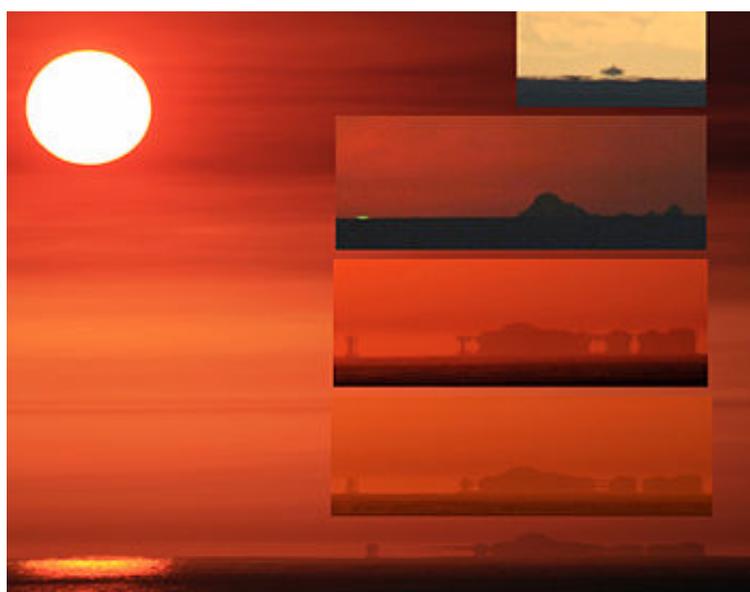


Рисунок 4.2 - Сверхрефракция в оптическом диапазоне

На рисунке 4.3 представлена ДН антенного луча под углом места $\theta = 0,5^\circ$ над линией радиогоризонта (пунктирная линия $\theta=0^\circ$). На том же рисунке представлены два уровня постоянной высоты (2000 м и 3000 м) рассчитанные по формуле (4.2) и обозначенные пунктирной линией.

Как показывают расчеты, при высоте антенны $H_A = 30$ м, облака, находящиеся на высоте $H = 2000$ м, вершины которых находятся выше уровня радиогоризонта (пунктир, $\theta = 0^\circ$), обнаруживаются ДМРЛ-С. Облака, вершины которых ниже уровня радиогоризонта (область радиотени), не обнаруживаются. Это обстоятельство является одним из ограничений радиолокационных методов метеонаблюдений.

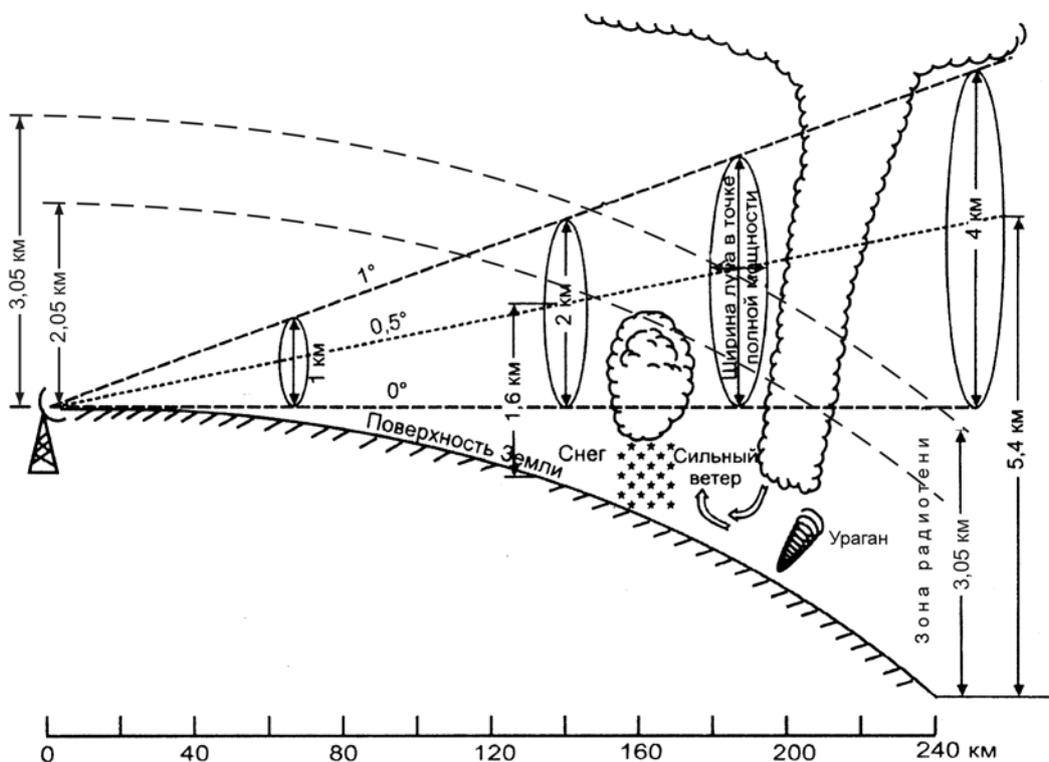


Рисунок 4.3 – Зоны радиотени ДМРЛ-С при ширине ДН в 1°

В таблице 4.2 приведены минимальные высоты целей, видимых радиолокатором с учетом рефракции, а также диаметр луча при ширине диаграммы направленности 1° .

Таблица 4.2 – Характеристики распространения луча ДМРЛ-С

Расстояние от локатора до цели, км	10	30	60	100	120	150	200	250
Минимальная высота видимости, м	6	54	216	600	864	1350	2400	3750
Диаметр луча, м	174	522	1044	1740	2088	2610	3480	4350

4.4 Состав ДМРЛ-С

В состав ДМРЛ-С входят:

- антенная система;
- высокочастотный тракт;
- клистронный передатчик;
- приемная система;
- центральный управляющий вычислительный комплекс (ЦУВК), в составе которого:
 - система первичной обработки сигналов радиолокатора;
 - вторичная обработка управляющего вычислительного комплекса (УВК);
 - автоматизированная система контроля и управления (АСКУ);
- удаленный управляющий вычислительный комплекс (УУВК);
- система электропитания;
- абонентский пункт (АП) (количество АП определяется договором на поставку);
- комплект ЗИП [21].

4.4.1 Антенная система ДМРЛ-С

Антенная система ДМРЛ-С включает :

- параболическую антенну;
- радиопрозрачное укрытие (РПУ);
- опорно-поворотное устройство;
- СВЧ вращающиеся сочленения;

- датчики угловых перемещений по азимуту и углу места;
- приводы азимутального вращения и угломестного качания [21].

4.4.1.1 Антенна

Параболическая антенна с круглым рупором, обеспечивает игольчатые ДН по каналам вертикальной и горизонтальной поляризаций. Устройство поляризации облучателя позволяет работать в режимах:

- излучения *линейной горизонтальной* поляризации с одновременным приемом на вертикальной и горизонтальной поляризациях;
- одновременного излучения *горизонтальной и вертикальной* поляризации с одновременным приемом на вертикальной и горизонтальной поляризациях.

Поляризация излучения, ширина диаграммы в горизонтальной и вертикальной плоскостях, уровень боковых лепестков и коэффициенты усиления антенны ДМРЛ-С приведены выше в таблице 4.1.

4.4.1.2 Радиопрозрачное укрытие

Для обеспечения надежности работы антенного устройства и её привода в различных метеорологических условиях используется радиопрозрачное укрытие (РПУ). РПУ ДМРЛ-С представляет собой сферическую конструкцию без плоскостей, вторгающихся в полезную площадь обтекателя или создающих систематические отражения. Поверхность обтекателя гидрофобна и устойчива к солнечному облучению, пыли, граду, ветру с песком.

- РПУ укрепляется на металлическом кольце, забетонированном в фундамент здания или установленном на металлической платформе – вышке или кунге;
- РПУ снабжен молниеотводами и авианавигационным защитным освещением согласно спецификации ИКАО.
- Купол имеет вход для обслуживающего персонала и вноса тестового оборудования. Внутри РПУ имеется освещение купола;
- Суммарное ослабление, вносимое радиопрозрачным укрытием на прием и передачу, не превышает:
 - в сухом состоянии - 0,5 дБ,
 - при выпадении осадков интенсивностью до 10 мм/час - 3 дБ.

4.4.1.3 Электропривод антенны

В качестве электропривода антенны используется высоконадежный транзисторный статический преобразователь. Данные об угловом положении антенны ДМРЛ-С поступают с плат формирования кода (ПФК) по углу наклона места и азимуту, выполненных на базе АЦП. На основе сравнения текущего углового положения антенны и задаваемого от персонального компьютера в ПФК вырабатывается сигнал управления электроприводом, в котором сигналы, подаваемые на исполнительные механизмы электропривода, усиливаются по мощности транзисторами.

4.4.2 Волноводный тракт

Волноводный тракт ДМРЛ-С предназначен для:

- передачи зондирующих импульсов передатчика к входу антенны;
- фильтрации гармонических составляющих сигнала;
- переключения режимов работы изделия;
- передачи принятых сигналов от антенны к приемным устройствам;
- ответвления прямой и отраженной мощностей на выходе передатчика для измерения КСВН тракта;
- ответвления отраженной мощности на выходе передатчика для защиты (отключения) передатчика;
- для защиты маломощных усилителей приемника (МШУ) от повреждения сигналами собственного передатчика.

Для увеличения электропрочности и для защиты от попадания влаги в волноводном тракте используются герметизированные секции.

В состав волноводного тракта входит система охлаждения клистрона. Предусмотрено аварийное отключение передатчика при повышении температуры клистрона а также при понижении расхода воздуха, проходящего через него [21].

4.4.3 Передающий тракт ДМРЛ-С

Передающее устройство предназначено для усиления импульсных СВЧ сигналов на рабочих частотах до заданного уровня мощности.

Передающее устройство построено по принципу внутренней когерентности и состоит из одного передатчика на базе высокостабильного клистронного усилителя мощности С-диапазона, с полностью твердотельным модулятором, резонансным стабилизатором анодного напряжения 10 кВ и воздушным охлаждением. На выходе формирователя сигналов формируется зондирующий сигнал длительностью от 1 мкс

(короткий импульс) до 100 мкс (НЧМ-импульс) с минимальной скважностью 20, усиливаемый в передатчике до 15 кВт. Такое построение обеспечивает необходимый уровень средней мощности и обеспечивает радиус зоны ответственности от 1 до нескольких сотен километров. На выходе передатчика устанавливается делитель на 2 для обеспечения излучения на двух ортогональных поляризациях.

Использование НЧМ-сигналов позволяет измерять скорость и отражаемость без изменения частоты повторения импульсов, увеличить на коэффициент сжатия динамический диапазон, а также устранить неоднозначную дальность за счет применения ортогональных сигналов (при использовании разного наклона при модуляции частоты). Передающий тракт РЛС предназначен для создания и передачи в антенный блок СВЧ зондирующих импульсов.

Структурная схема передающего устройства ДМРЛ-С и подробное описание его принципа действия описаны в РЭ (часть 2) [21].

4.4.4 Приемный тракт ДМРЛ-С

Приемная система предназначена для усиления, частотной селекции и преобразования частоты принимаемых эхо-сигналов с целью обеспечения нормальной работы аппаратуры обработки сигналов и информации.

Приемная система состоит из двух каналов, обрабатывающих независимо вертикальную и горизонтальную поляризации. Каждый приемный канал состоит из двух подканалов, обеспечивающих прием и преобразование радиолокационных сигналов с выхода волноводного тракта. При этом для обеспечения линейного динамического диапазона на уровне 100 дБ один из каналов работает от выхода направленного ответвителя с ослаблением относительного основного канала 30-40 дБ. Коэффициент шума каждого канала приемного устройства составляет не более 3 дБ. Высокочастотный (ВЧ) модуль приемника предназначен для приема, усиления и преобразования по частоте принимаемых отраженных от метеоцелей сигналов.

Блок-схема приемного тракта ДМРЛ-С и принцип его действия приведен в РЭ (часть 2) [21].

4.4.5 Центральный управляющий вычислительный комплекс (ЦУВК)

Центральный управляющий вычислительный комплекс (ЦУВК) сопрягается с системой цифровой обработки информации приемника радиолокатора и системой управления состоянием составляющих ДМРЛ-С. В состав ЦУВК входят:

- система первичной обработки сигналов радиолокатора;

- программное средство вторичной обработки информации УВК ДМРЛ-С (шифр ГИМЕТ-2010);
- автоматизированная система контроля и управления РЛК (АСКУ) [21].

4.4.5.1 Система первичной обработки

Система первичной обработки реализует аналого-цифровое преобразование эхо-сигналов каждого приемного канала ДМРЛ-С на промежуточной частоте, для чего используется 16-разрядный АЦП. Аппаратура цифровой обработки совместно с приемным трактом обеспечивает линейный динамический диапазон обрабатываемых сигналов порядка 70 дБ в каждом подканале. Совместная обработка двух подканалов позволяет получить сквозной линейный динамический диапазон не менее 100 дБ. Система оценки отражаемости и спектральных характеристик метеообъектов реализуется на специальном сигнальном процессоре.

4.4.5.2 Система вторичной обработки

Система вторичной метеорологической обработки информации УВК ДМРЛ-С не реже одного раза в несколько минут обеспечивает представление метеорологической информации в виде карт:

- отражаемости в горизонтальных сечениях на различных высотных уровнях и вертикальных сечений по различным азимутам;
- высоты облачности;
- радиальных доплеровских скоростей в горизонтальных сечениях на различных уровнях высоты;
- среднеквадратичной ширины спектра скоростей;
- опасных метеоявлений;
- видимости в осадках;
- интенсивности осадков;
- количества осадков за любой промежуток времени наблюдений;
- скорости и направления перемещения облачных систем;
- фазовом состоянии метеообъектов.

Любая из перечисленных карт может быть сохранена в виде файла, выведена

на печать и передана в коде BUFR на удаленный управляющий вычислительный комплекс (УУВК).

4.4.5.3 Автоматизированная система контроля и управления РЛК

Автоматизированная система контроля и управления обеспечивает контроль всех основных параметров ДМРЛ-С (выходной мощности, чувствительности приемника и т.д.), контроль работоспособности всех устройств локатора, а также, совместно с системой первичной обработки радиолокационной информации, управление режимами работы по команде оператора. [21]

4.4.6 Удаленный управляющий вычислительный комплекс (УУВК)

УУВК служит для организации дистанционного управления процессом наблюдений, получения объемных файлов от ЦУВК и их прикладной обработки с целью получения метеорологической информации в интересах различных пользователей.

Удаленный управляющий вычислительный комплекс (УУВК) сопрягается с Центральным вычислительным комплексом (ЦУВК) через выделенный канал связи.

Оператор УУВК имеет возможность:

- ◆ дистанционного управления процессом радиолокационных наблюдений;
- ◆ дистанционной установки режимов и параметров наблюдений;
- ◆ контроля радиолокационного обзора, полноты и достоверности получаемой метеорологической информации.

Вся получаемая и генерируемая на УУВК информация, включая файлы-квитанции о состоянии и оперативных режимах работы ДМРЛ, должна архивироваться и храниться на жестком диске УУВК не менее месяца. По истечении этого срока основная информация, по заранее программируемому перечню, переносится на жесткий диск и подлежит долговременному хранению.[21]

4.4.7 Система первичного электропитания

Система первичного электропитания обеспечивает аппаратуру ДМРЛ-С электроэнергией переменного тока 380В/220В 50 Гц. Электроснабжение изделия осуществляется от двух независимых фидеров промышленной сети или от резервного источника электроснабжения - дизельной электростанции (ДЭС).

Штатное электропитание аппаратуры изделия производится от основного сетевого фидера (фидер 1), при этом второй сетевой фидер не нагружен и находится в резерве.

При отказе основного фидера аппаратурой резервирования нагрузка переключается на резервный сетевой фидер. В случае отказа обоих сетевых фидеров автоматически запускается ДЭС (при наличии) и принимает на себя нагрузку по фидеру 2.

Для исключения перерывов электропитания аппаратуры во время переключений фидеров, в состав электрооборудования ДМРЛ-С введен источник бесперебойного питания (ИБП), обеспечивающий непрерывное электропитание всей основной аппаратуры ДМРЛ-С. Кроме того, ИБП обеспечивает стабилизацию напряжения питания аппаратуры. Мощность, потребляемая основной аппаратурой ДМРЛ-С, не превышает 10 кВт [21].

4.5 Устройство и работа ДМРЛ-С

Доплеровский метеолокатор ДМРЛ-С работает в диапазоне «С» ($\lambda = 5,3$ см) и является высокостабильным радиолокатором, построенным по принципу внутренней когерентности.

Большинство операций по обработке сигнала осуществляется программными способами на ЭВМ.

Упрощенная структурная схема ДМРЛ-С представлена на рисунке 4.4:



Рисунок 4.4 - Структурная схема ДМРЛ-С

В радиолокаторе используется метод работы двумя сигналами: 1 мкс для обеспечения зоны обзора от 1 до 4-10 км и 25-60 мкс для обеспечения зоны обзора от 4-10 до 250 км. Разнос частот по типам сигналов на 5-7 МГц позволяет устранить взаимное влияние на определение параметров метеобъектов.

Обзор пространства осуществляется с использованием 25-ти возбужденных периодов повторения импульсов для определения однозначной скорости метеорообъектов в диапазоне от минус 50 до + 50 м/с [21].

В ДМРЛ-С используется параболическая антенна с игольчатым лучом, выполненная в виде отражателя и облучателя. Устройство поляризации облучателя позволяет работать в режимах:

- излучения линейной горизонтальной поляризации с одновременным приемом на вертикальной и горизонтальной поляризациях;

- одновременного излучения горизонтальной и вертикальной поляризации с одновременным приемом на вертикальной и горизонтальной поляризациях.

Клистронный передатчик состоит из одного шкафа клистронного усилителя мощности. Импульсная мощность излучения каждого частотного канала составляет не менее 15 кВт. В передатчике обеспечивается высокая стабильность частоты, обуславливающая эффективное функционирование системы селекции движущихся целей.

Четырехканальный приемник осуществляет оптимальное режектирование, усиление, преобразование и детектирование принятых эхо-сигналов. На входах приемника устанавливаются защитные устройства и ограничители, которые защищают малошумящий усилитель от просачивающейся высокочастотной энергии собственного передающего устройства и сигналов других радиотехнических средств.

Два канала приемника являются основными каналами горизонтальной и вертикальной поляризации, а два – дополнительными, ослабленными на 30 дБ с целью увеличения линейного динамического диапазона до 100 дБ. При работе в режиме одной поляризации используется два приемника: основной и дополнительной горизонтальной поляризации.

Приемник выполнен по супергетеродинной схеме с однократным преобразованием частоты. Промежуточная частота – 60 МГц. Сигнал промежуточной частоты с выхода приемного устройства поступает на 16-ти разрядный АЦП и далее на вход цифрового фазового детектора, формирующего квадратурные составляющие эхо-сигнала. Дальнейшая обработка эхо-сигналов осуществляется в цифровом виде в аппаратуре обработки [21].

Аппаратура цифровой обработки сигналов осуществляет фильтрацию несинхронных импульсных помех, сжатие НЧМ сигнала, спектральную обработку принятого сигнала и вычисление поляризационных характеристик. Аппаратура цифровой обработки четырехканальная (по числу приемных каналов). В состав аппаратуры входит приемник единого времени (ГЛОНАСС/GPS).

Первичная обработка информации (ПОИ) обеспечивает выдачу информации о метеотражениях с привязкой к пространственным координатам (дальность, азимут, угол места).

Вторичная обработка управляющего вычислительного комплекса (ВОИ УВК) ДМРЛ по локальной вычислительной сети принимает радиолокационную информацию с выхода ПОИ, производит ее идентификацию, осуществляет дальнейшую обработку и трансляцию полученной информации в коде BUFR потребителям и на удаленный управляющий вычислительный комплекс (УУВК).

УУВК также обеспечивает контроль технического состояния аппаратуры комплекса и возможность управления.

Аппаратура ДМРЛ-С не резервируется [21].

5 Опасные явления погоды обнаруживаемые ДМРЛ-С на основании информации о радиолокационной отражаемости

ДМРЛ-С в режиме «*Отражаемость*» позволяет получать метеорологическую информацию об облачности, осадках и связанных с ними опасных явлениях погоды в радиусе 250 км. Классификация опасных явлений (гроза, град, ливневые осадки), обнаруживаемых ДМРЛ-С в режиме «*Отражаемость*», а также их радиолокационная структура подробно описаны в [1]. В настоящем разделе приводится описание общих принципов распознавания облачности и ОЯП, основанных на информации о радиолокационной отражаемости Z, построении критериев принятия решений об ОЯП, а также методике сопоставления радиолокационных данных с данными ННС Росгидромета.

5.1 Распознавание форм облачности и ОЯП на основе информации о радиолокационной отражаемости

Распознавание форм облачности, интенсивности осадков и опасных метеорологических явлений является одной из задач вторичной обработки радиолокационных данных в ПО «ГИМЕТ-2010». Далее по тексту для обозначения этих метеорологических элементов используется термин «Метеоявления», и, соответственно, продукт вторичной обработки носит название «Карты метеоявлений».

Распознавание метеоявлений основано на применении комплексных критериев, учитывающих, в общем случае, высоту верхней границы облаков, профиль радиолокационной отражаемости и аэрологическую информацию. В основу критериев, реализованных в ПО «ГИМЕТ-2010», положены наработки отечественной радиометеорологии, описанные в [1], которые зарекомендовали себя при использовании на сети «МРЛ-Штормооповещения» как на автоматизированных, так и на неавтоматизированных радиолокаторах. По результатам вторичной обработки метеорологической информации каждой ячейке карты метеоявлений размером 500x500 м ставится в соответствие цифровой код в диапазоне от 0 до 19, который обозначает одно из метеоявлений, перечисленных в Таблице 5.1. Приведенный перечень соответствует требованиям приложения 2 Приказа №95 Росгидромета от 21.06.2004 года [13].

Таблица 5.1 - Метеорологические явления и типы облачности по радиолокационным данным (кодовая таблица 0 21 022)

Кодовая цифра	Обозначение
0	Нет явлений
1	Облачность верхнего и среднего яруса
2	Слоистообразная облачность
3	Осадки слабые
4	Осадки умеренные
5	Осадки сильные
6	Кучевая облачность
7	Ливень слабый
8	Ливень умеренный
9	Ливень сильный
10	Гроза с вероятностью 30 - 70%
11	Гроза с вероятностью 71 - 90%
12	Гроза с вероятностью > 90%
13	Град слабый
14	Град умеренный
15	Град сильный
16	Шквал слабый
17	Шквал умеренный
18	Шквал сильный
19	Торнадо (смерч)

Опасные явления град, шквал и ливень указываются в трех градациях, соответствующих интенсивности явления (слабый, умеренный, сильный). Градации грозы имеют вероятностную природу, и через свое наименование указывают на степень неопределенности, которая присутствует при разделении с помощью используемых критериев конвективных облаков на грозовые и ливневые. Подробнее о природе критериев распознавания грозовых облаков можно узнать в [1] и следующих источниках [3, 17, 18].

Как уже упоминалось в Предисловии, реализованные в ПО «ГИМЕТ-2010» критерии распознавания метеоявлений изначально разрабатывались для неавтоматизированных некогерентных радиолокаторов и подразумевали

непосредственное участие операторов в определении типа метеоявлений. В дальнейшем, при внедрении систем автоматизации МРЛ-5, таких как «Метеоячейка», «АКСОПРИ», «МЕРКОМ», «АСУ-МРЛ» были разработаны алгоритмы в определенной степени формализующие и автоматизирующие процедуру распознавания метеоявлений. Опыт эксплуатации автоматизированных МРЛ показал, что такие алгоритмы при правильной настройке параметров, представляющих собой пороговые значения критериев, решают задачи распознавания метеоявлений на высоком уровне без участия оператора. С другой стороны, в отечественной практике на регулярной основе не проводились исследования по использованию доплеровской и поляризационной радиолокационной информации для распознавания метеоявлений. Имеющейся в зарубежных публикациях информации также недостаточно для внедрения подобных алгоритмов в оперативную практику.

В связи с этим, на этапе разработки первой версии ПО «ГИМЕТ-2010» было принято решение в начальный период работы новой сети заимствовать опыт, полученный при создании упомянутых выше систем автоматизации. Отсюда вытекают следующие особенности реализации критериев распознавания метеоявлений в ПО «ГИМЕТ-2010»:

1. Из всех первичных радиолокационных продуктов, получаемых с помощью ДМРЛ-С, используется только информация о радиолокационной отражаемости Z (п.2.3.1). Разработка новых критериев, использующих доплеровские и поляризационные эффекты при распространении электромагнитных волн в облаках и осадках, требует накопления и обработки статистического материала в течение 3 - 5 лет работы новой сети, а также проведения комплекса научно-исследовательских работ по данному направлению.

2. Распознавание проводится независимо по каждому элементу радиолокационного пространства (ячейке) с горизонтальными размерами 500x500 м, на основании вертикального профиля отражаемости в этой ячейке. Таким образом, весь радиолокационный объем делится на элементарные столбики. В этом заключается принципиальное отличие от методов «ручной» обработки метеорадиолокационной информации, для которых изначально разрабатывались критерии распознавания.

3. Построение карт метеоявлений осуществляется полностью в автоматическом режиме. Оператор, как пользователь программного обеспечения и лицо, ответственное за качество и достоверность получаемой информации, через разработчика ПО «ГИМЕТ-2010» может управлять работой алгоритмов распознавания, в первую очередь, посредством изменения пороговых значений критериев (см.раздел 5.2).

5.2 Радиолокационные критерии принятия решений об ОЯП

Здесь приводятся пороговые значения упомянутых выше критериев, используемые в алгоритмах вторичной обработки ДМРЛ-С для распознавания различных типов облачности и явлений. Эти значения устанавливаются разработчиком ПО ВО «Гимет 2010» и используются (отдельно или комплексно) в алгоритмах вторичной обработки информации. К ним относятся:

- высота верхней ($H_{вг}$) и нижней ($H_{нг}$) границы облаков;
- отражаемость хотя бы на одном из трех стандартных уровней $Z1$, $Z2$ и $Z3$ ($Z1$ – отражаемость в слое от 0 до 2 км, середина слоя 1 км; $Z2$ – отражаемость в слое от 2 до 4 км, середина слоя 3 км, $Z3$ – отражаемость в слое от 4 до 6 км, середина слоя 5 км);
- комплексные Y -критерии распознавания грозы и града; пороговые значения этих критериев определяются эмпирическим путем.

Пороговые значения критериев отличаются для разных периодов года, что в первую очередь связано с фазовым состоянием выпадающих осадков. Периоды года определяются по значениям температуры воздуха (T_{ground}) у земли (имеется в виду температура воздуха на высоте 2 м над земной поверхностью, измеряемая на метеостанциях в психрометрических будках) и высоты нулевой изотермы $H_{t0^{\circ}C}$. В радиолокационной метеорологии различают 3 периода:

- теплый;
- холодный;
- переходный.

Теплым считается период, когда $T_{ground} > 3^{\circ}C$ и $H_{t0^{\circ}C} > 0,5$ км, при этом выпадают жидкие осадки.

Переходным считается период, когда $-1^{\circ}C \leq T_{ground} \leq 3^{\circ}C$ и $0,2 < H_{t0^{\circ}C} \leq 0,5$ км, при этом выпадают преимущественно смешанные осадки.

Холодным считается период, когда $T_{ground} < -1^{\circ}C$ и $H_{t0^{\circ}C} \leq 0,2$ км, при этом выпадают твердые осадки.

Регламентом работы станции за оператором может быть закреплена обязанность по занесению информации о текущих значениях T_{ground} и $H_{t0^{\circ}C}$ в ПО «Гимет 2010». В этом случае, сразу же после получения на станции аэрологической информации оператор должен выполнить следующие инструкции:

1. В Главном окне программы UVK1 с помощью пункта меню «Окна» → «Установка метео» активируется панель «Установка параметров обзора» (рис.5.1).

2. В графы панели «Установка параметров обзора» оператором заносится информация Tground (приземной температуры), Ht0°C (высоты изотермы 0°C), Ht22°C (высоты изотермы -22°C), Htгopo (высоты тропопаузы).
3. Зафиксировать изменения нажатием кнопки «Записать».

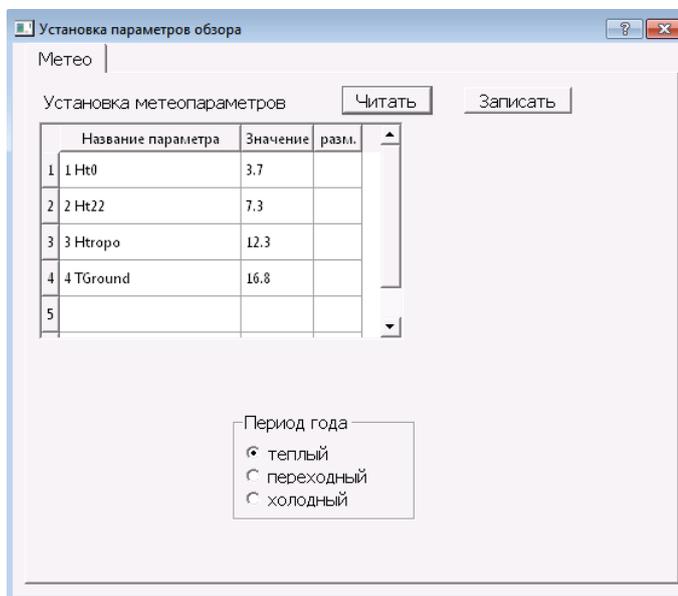


Рисунок 5.1 – Активируемая панель «Установка параметров обзора»

Следует подчеркнуть, что своевременное и правильное занесение в программу информации о Tground и Ht0°C уменьшает вероятность неправильного распознавания ОЯП, в первую очередь, ливней и гроз.

Возвращаясь к вопросу о типах критериев, реализованных в ПО ВОИ «Гимет-2010», следует еще раз подчеркнуть, что эта реализация является базовой, основанной на имеющемся практическом опыте оперативной работы. Пороговые значения критериев устанавливаются разработчиками ПО при вводе станции в эксплуатацию на основании общих закономерностей, характерных для данного климатического региона. В дальнейшем, при достаточном количестве статистических данных, для каждого региона будет проводиться работа по корректировке пороговых значений критериев с учетом местных особенностей. Расширение перечня критериев будет связано с комплексным использованием доплеровской и поляризационной информации.

5.2.1 Облачность

В ПО ВОИ «Гимет-2010» облачность без осадков классифицирована как кучевая, слоистообразная, облачность верхнего и среднего ярусов. Анализируя информацию о типах облачности, следует иметь в виду, что эффективность радиолокационного обнаружения нежданных облаков значительно ниже, чем дожженных, поскольку

отражаемость Z облаков первого типа значительно меньше. Кроме того, из-за низкой отражательной способности, имеется предельная дальность обнаружения облаков разных форм. Поэтому максимальные дальности обнаружения недождевых облаков чаще всего ограничиваются несколькими десятками километров, а облачность с особенно слабой отражаемостью вообще может быть не обнаружена ДМРЛ-С.

Для облачности без явлений настраиваемыми параметрами являются:

- высота верхней (Н_{вг}) и нижней границы (Н_{нг}) облачности;
- минимальное значение отражаемости для классификации явления как облачности;
- значение отражаемости на уровнях Z_2 и Z_3 .

Для облачности верхнего, среднего яруса и слоистообразной облачности Z_{\min} принимает значение «-5 dBZ», для кучевой облачности – «1 dBZ» (рис. 5.2). При этом сведения о Н_{нг} используются только при распознавании облачности верхнего и среднего яруса, где Н_{нг} > 3 км и кучевой облачности, где Н_{нг} > 0,7 км. Пороговыми значениями для высоты верхней границы являются для слоистой облачности Н_{вг} ≥ 0,5 км, для кучевой Н_{вг} ≥ 4,5 км независимо от периода года. Пороговые значения для уровней Z_2 и Z_3 для облачности верхнего и среднего яруса и для слоистой облачности в теплый и переходный период года отсутствуют, а для холодного времени года:

- $Z_2 = Z_3 \geq -1$ – для облачности верхнего и среднего яруса;
- $Z_2 = Z_3 \geq 0$ – для слоистой облачности.

Для кучевой облачности в теплый период года $Z_2 = Z_3 \geq 25$, а в переходный и холодный периоды $Z_2 \geq 25$, $Z_3 \geq 30$.

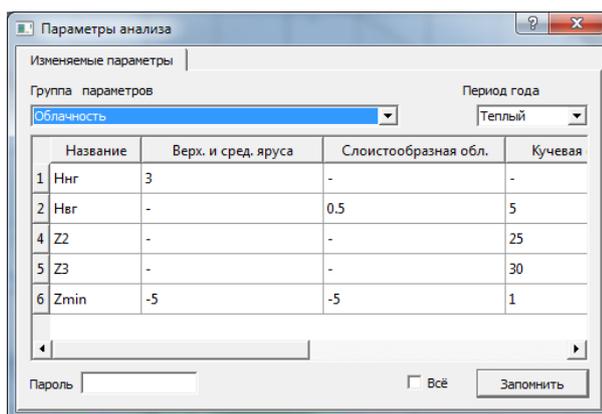


Рисунок 5.2 - Пороговые значения Н_{вг}, Н_{нг}, Z_2 , Z_3 , Z_{\min} для обнаружения облачности без осадков в теплый период

5.2.2 Осадки

Осадки рассчитываются по критерию наличия отражаемости на уровнях Z_1 и Z_2 . Для теплого периода используются данные об отражаемости только на уровне Z_1 (рис.5.3):

- Осадки слабые - $Z_1 \geq 0$.
- Осадки умеренные - $Z_1 \geq 13$.
- Осадки сильные - $Z_1 \geq 23$.

Для переходного и холодного периода на уровне Z_1 все значения сохраняются, а для уровня Z_2 значения отраженного сигнала должны быть ≥ 0 для всех трех градаций осадков (в зависимости от региона критерии могут уточняться).

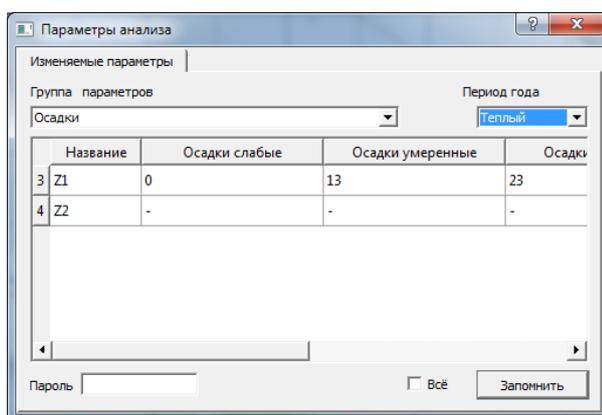


Рисунок 5.3 – Пороговые значения Z_1 , Z_2 для обнаружения осадков в теплый период

5.2.3 Ливни

Для распознавания ливней используются данные на тех же уровнях Z_1 и Z_2 . На уровне Z_2 для всех градаций ливня в течение года значение отражаемости должно быть больше либо равно «0» (рис. 5.4). В течение всего года (в зависимости от региона критерии могут уточняться):

- Умеренный ливень - $Z_2 \geq 37$
- Сильный ливень - $Z_2 \geq 44$

Для слабых ливней:

- в теплый период года $Z_1 \geq 28$
- в переходный и холодный периоды $Z_1 \geq 31$.

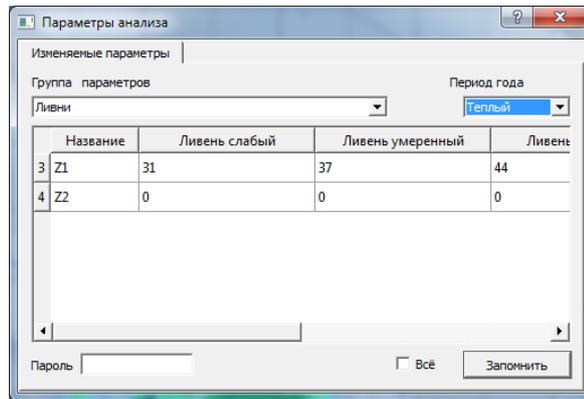


Рисунок 5.4 – Пороговые значения Z1, Z2 для обнаружения ливней в теплый период

Критерии распознавания остальных видов опасных явлений не столь однозначны ввиду использования комплексных пороговых величин ($Y_{кр}$ для гроз и града, $H_{вг}$ – $H_{тр}$ для шквала и т.д.). Пороговые величины могут меняться в широких пределах в зависимости от географического расположения ДМРЛ-С. Поэтому ниже будут даны общие рекомендации по определению пороговых значений комплексных критериев на первом этапе опытной эксплуатации ДМРЛ-С на примере грозы.

5.2.4 Грозы

В настоящее время существует единственная утвержденная методика распознавания гроз с использованием данных метеорологических радиолокаторов, описанная в [1]. Согласно этой методике при наличии данных аэрологических наблюдений по значению высоты изотермы минус 22°C ($H_{-22^{\circ}\text{C}}$), высоты верхней границы облачности ($H_{вг}$) и отражаемости (Z_3) на уровне $H_3 = H_0 + 2$ (2,5 км) рекомендуется рассчитывать значение критерия грозоопасности Y по формуле $Y = H \cdot \lg Z$ и сравнивать его с пороговым значением $Y_{кр} = H_{-22^{\circ}\text{C}} \cdot \lg Z_{3min}$, где Z_{3min} – минимальное значение отражаемости, наблюдаемой в грозах для данного региона. При этом вероятность распознавания гроз зависит от величины превышения Y над $Y_{кр}$. Конкретные зависимости между вероятностью распознавания грозы и разностью ($Y - Y_{кр}$) получены в результате исследований статистических закономерностей распределения отражаемости в грозовых и ливневых облаках в различных регионах.

Чтобы определить пороговые значения Y -критерия для ДМРЛ-С на первом этапе опытной эксплуатации следует придерживаться следующего алгоритма.

1. По результатам аэрологического зондирования определить H_{-22} (например, 6,5 км).

2. Величину lgZ_{3min} для данного периода наблюдений выразить в dBZ. Например, если $lgZ_{3min} = 1,5$, то $Z_{3min(dBZ)} = 1,5 \cdot 10 + 18 = 33$ dBZ.

3. Рассчитать $Y_{кр} = 6,5 \cdot 33 = 205$.

4. Оценить величину Δ_{dBZ} , соответствующую расчету Y через dBZ, можно по формуле:

$$\Delta_{dBZ} \cong 10 \cdot \Delta + 18.$$

В таблице 5.2 приведены результаты расчета Δ_{dBZ} , значений Y-критерия для $Y_{кр} = 205$ и значений Δ , соответствующих шкале вероятности грозы (R), R), R):

Таблица 5.2 – значения Y, соответствующие шкале вероятности гроз

	(R)	R)	R
Δ	0	8	10
Δ_{dBZ}	18	98	118
Y	223	303	323

В заключении еще раз необходимо отметить, что приведенные значения являются лишь «нулевым» приближением. В процессе опытной эксплуатации ДМРЛ-С следует проводить постоянный анализ карт опасных метеоявлений и их сопоставление с данными ННС и, исходя из этой информации, корректировать радиолокационные критерии ОЯ. Все работы по корректировке критериев ОЯ (причины корректировки, изменяемые параметры, результаты проведенных изменений и т.д.) рекомендуем фиксировать в Журнале оперативных наблюдений. Только обобщение этого опыта позволит определить, каким образом следует проводить адаптацию комплексных критериев грозоопасности в алгоритмах ДМРЛ-С.

5.2.5 Град

Град классифицируется по комплексному критерию:

- верхняя граница облачности должна быть выше порога;
- на уровне Z_3 отражаемость должна быть выше порога;
- должно быть превышено значение максимальной отражаемости для любого слоя;

- Y -параметр ($Y = H_{вг} \cdot Z_3$) должен превышать значение, указанное в таблице, и превышать порог $Y_{cr} = H_{-22^{\circ}C} \cdot \text{порог } Z_3$ (произведение высоты изотермы минус 22 градуса на пороговое значение Z_3), указанное на рисунке 5.5).

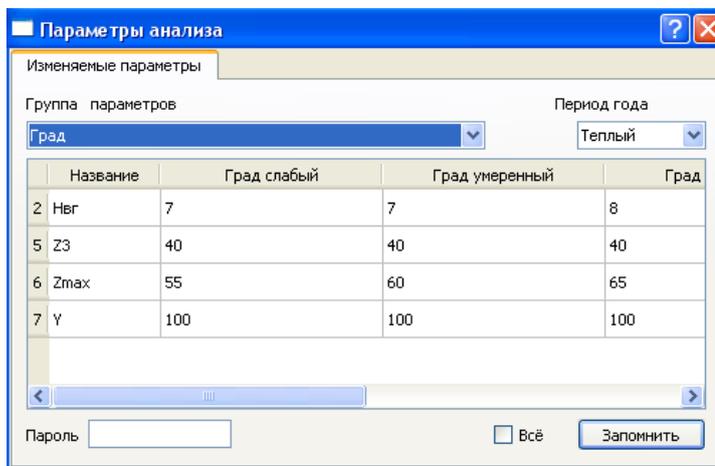


Рисунок 5.5 – Пороговые значения Нвг, Z_3 , Zmax, Y для обнаружения града в теплый период

5.2.6 Шквалы

- Шквалы классифицируются по комплексному критерию:
- верхняя граница облачности Нвг должна отличаться от высоты тропопаузы Нтр более, чем указано в таблице;
- на уровне Z_3 отражаемость должна быть выше порога;
- должно быть превышено значение максимальной отражаемости для любого слоя;
- Y -параметр ($Y = H_{вг} \cdot Z_3$) должен превышать значение, указанное в таблице, и превышать порог $Y_{cr} = H_{-22^{\circ}C} \cdot \text{порог } Z_3$ (произведение высоты изотермы минус 22 градуса на пороговое значение Z_3), указанное на рис.5.6).

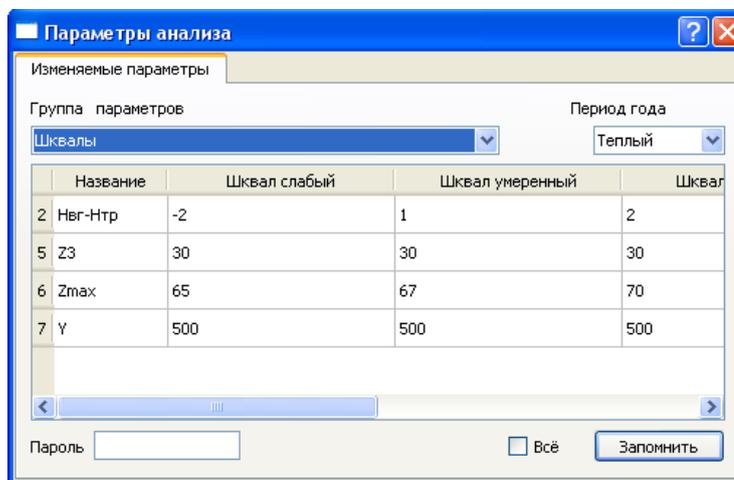


Рисунок 5.6 – Пороговые значения Нвг- Нтр, Z_3 , Zmax, Y для обнаружения шквала в теплый период

5.2.7 Смерч

Смерч классифицируется по комплексному критерию (рис. 5.7):

- верхняя граница облачности должна превышать высоту тропопаузы на $dh = H_{\text{вг}} - H_{\text{тр}}$ более, чем указано на рисунке 5.7;
- Z должно быть превышено значение максимальной отражаемости Z_{max} для любого слоя;
- изменение скорости ветра должно быть более, чем dV между соседними значениями скорости.

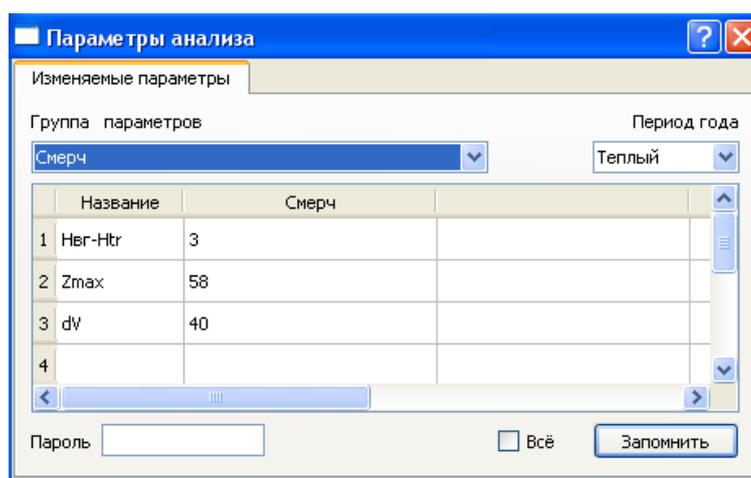


Рисунок 5.7 – Пороговые значения Hвг- Нтр, Zmax, dV для обнаружения смерча в теплый период

5.3 Оценка качества работы ДМРЛ-С

Основными показателями оценки качества работы ДМРЛ-С являются значения оправдываемости ОЯП и достоверности РМИ. В связи с различными интерпретациями этих характеристик в различной литературе методический отдел ОРМИ ФГБУ «ГГО» рекомендует придерживаться приведенных ниже определений.

5.3.1 Оправдываемость ОЯП

Оправдываемость (вероятность обнаружения) – статистическая величина, характеризующая степень соответствия метеорологических явлений, зафиксированных МРЛ, фактически наблюдавшимся. Устанавливается путем сопоставления данных МРЛ и ГМС. Рассчитывается как отношение числа случаев некоторого класса ОЯ, зафиксированных МРЛ, подтвержденных данными ГМС, к общему числу случаев ОЯ того же класса по данным ГМС, выраженное в процентах.

Исходя из определения, формула для расчета оценки оправдываемости $P_{опр}$:

$$P_{опр} = (N_{оя(дмрл+гмс)} / N_{гмс}) * 100\%,$$

где:

$N_{оя(дмрл+гмс)}$ – число случаев некоторого класса ОЯ по данным МРЛ, подтвержденных данными ГМС;

$N_{гмс}$ – общее число случаев ОЯ того же класса, зафиксированных ГМС.

Оправдываемость (она же вероятность обнаружения) гидрометеорологических явлений зависит от технических характеристик, которые контролируются в процессе пуско-наладочных работ ДМРЛ-С, физико-географических условий и величины углов закрытия антенны МРЛ.

Большие углы закрытия (до 3-5°) возникают ввиду наличия в ближней зоне МРЛ высоких «местников» (деревьев, зданий, холмов, горных хребтов и массивов) и препятствуют обнаружению локатором опасных метеоявлений, возникающих позади них. Факторами, снижающими вероятность обнаружения ОЯ, являются также: ограничение дальности прямой радиовидимости МРЛ, ослабление радиоволн в осадках и атмосферных газах, ослабление отраженных сигналов с увеличением расстояния от ДМРЛ.

Сопоставление с данными ГМС проводится в радиусе 180-200 км для гроз и града, и в радиусе 100 км для ливневых осадков.

5.3.2 Достоверность радиолокационной метеорологической информации

Достоверность (вероятность распознавания) РМИ – статистическая величина, характеризующая степень соответствия ОЯ, обнаруженных ДМРЛ и подтвержденных данными метеостанций к общему числу ОЯ, обнаруженных ДМРЛ-С. Рассчитывается как отношение числа случаев некоторого класса ОЯ по данным ДМРЛ-С, подтвержденных данными ГМС, к общему числу случаев ОЯ того же класса по данным ДМРЛ-С, выраженное в процентах.

Исходя из определения, формула для расчета оценки достоверности $P_{дост}$:

$$P_{дост} = (N_{оя(дмрл+гмс)} / N_{дмрл}) * 100\%,$$

где:

$N_{оя(дмрл+гмс)}$ – число случаев некоторого класса ОЯ, распознанных по данным ДМРЛ-С, и подтвержденных данными ГМС;

$N_{дмрл}$ – общее число случаев ОЯ того же класса, зафиксированных МРЛ.

Достоверность РМИ (она же **вероятность распознавания** вида явления) зависит от потенциала ДМРЛ-С, от дальности обнаружения явления, наличия между распознаваемым явлением и ДМРЛ-С экранирующих осадков, состояния радиопрозрачного укрытия антенны (сухое или мокрое).

Высокий показатель достоверности РМИ является критерием, указывающим на правильную калибровку локатора, а также на точное ориентирование (горизонтирование) антенны ДМРЛ.

5.3.3 Вероятность распознавания гроз

При распознавании гроз с использованием ДМРЛ-С (в программах вторичной обработки радиолокационной метеорологической информации) используются три градации:

- (R) - грозы с вероятностью 30-70%;
- R) - грозы с вероятностью 71-90%;
- R - грозы с вероятностью более 90%.

Расчет показателей оправдываемости ОЯ и достоверности РМИ ДМРЛ-С должен быть произведен применительно к каждой из этих градаций. Данные о наблюдаемых явлениях рекомендуется заносить в таблицу 5.3:

- ОЯ, зафиксированных сетью наземных метеостанций в радиусе обзора ДМРЛ-С, с разделением на виды наблюдаемых явлений (град, гроза, ливень, шквал) с указанием интервала наблюдаемых явлений;
- ОЯ, зафиксированных ДМРЛ-С, с разделением как на виды наблюдаемых явлений, так и вероятностные оценки гроз, с указанием времени начала радиолокационного обзора;
- ОЯ, одновременно зафиксированных МРЛ и ГМС.

Предлагаемая форма годовой отчетности об ОЯП, наблюдаемых в грозовой сезон, приведена в таблице 5.3:

Таблица 5.3 – Форма отчетности об ОЯП, наблюдаемых в грозовой сезон

Дата	ГМС		ДМРЛ-С						Причина необна- ружения ОЯ
	Название ГМС	ОЯ, время начала и окончания	Срок, UTC		(R) 30- 70%	(R) 71-90%	(R) >90%		

Под «одновременностью» условимся понимать:

- 1) пространственный радиус обнаружения ОЯ ГМС – 20 км, а не 30 км, как это было в [1];
- 2) временной интервал обнаружения – «-10» минут от времени начала обзора ДМРЛ-С и «+10» минут ко времени конца обзора, а не «±30» минут, как это было ранее в [1], т.к. за 30 минут ГМС могут зафиксировать 2 «независимые» грозы.

Методика сопоставления РМИ и данных сети ГМС, приведенная в [1], была написана и апробирована применительно к неавтоматизированным МРЛ, с помощью которых наблюдение за ОЯП можно было производить не чаще 1 раза в 30 минут. ДМРЛ-С позволяет производить наблюдения каждые 7-10 минут. Кроме того, 10-минутный темп обновления информации в режиме «шторм» регламентирован Приказом [13].

6 Использование доплеровской радиальной скорости для обнаружения ОЯП

Наряду с ОЯП обнаруживаемыми ДМРЛ-С в режиме «Отражаемость», обширный класс опасных метеоявлений может быть выявлен ДМРЛ-С на основе прямых измерений радиальной скорости гидрометеоров в режиме «Скорость».

С точки зрения ветровых характеристик атмосферы опасными для авиации являются присутствующие (или превышающие определенные пороги) процессы:

- приземный ветер;
- вертикальный и горизонтальный сдвиги ветра;
- турбулентность;
- шквал;
- микрошквал;
- смерч.

Эти атмосферные явления могут быть зафиксированы доплеровскими МРЛ при детальном анализе структуры полей радиальной скорости и ширины спектра. Далее дана краткая характеристика этих явлений, хорошо изученных на сети ДМРЛ в ходе экспериментов европейских и американских коллег, описанных в зарубежной и отечественной периодике [3, 4].

6.1 Приземный ветер

Приземным слоем воздуха называется нижняя часть пограничного слоя атмосферы – от земной поверхности до высоты 50-100 м (в некоторых случаях до 200-250 м).

Толщина приземного слоя меняется в зависимости от скорости ветра, шероховатости земной поверхности и устойчивости атмосферы.

Скорость ветра в приземном слое, как правило, возрастает с высотой по логарифмическому закону, а его направление практически не меняется [6].

Наиболее существенно влияние приземного ветра на взлетно-посадочной полосе (ВПП). В зависимости от скорости ветра изменяется длина пробега по ВПП (пробег самолёта при попутном ветре увеличивается). При боковом ветре затрудняются взлёт и особенно посадка самолётов. Для каждого типа самолётов устанавливается предельно допустимая скорость бокового ветра, при которой взлёт и посадка возможны.

Ветер свободно дует в трехмерном пространстве и, обладая скоростью и направлением, должен рассматриваться как вектор, который можно разложить на три

ортогональные составляющие. Относительно земной поверхности это означает, что составляющие имеют направления: север-юг, восток-запад и вверх-вниз (рис. 6.1):

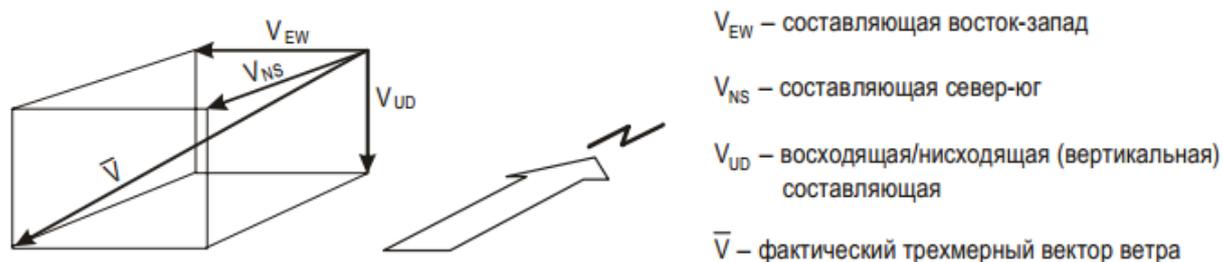


Рисунок 6.1 – Составляющие ветра относительно земной системы координат [7]

Если же данный вектор берется относительно траектории взлета-посадки воздушного судна, это означает использование следующих составляющих направлений: встречная/попутная (продольные) составляющие ветра, боковые (поперечные) составляющие ветра и восходящая/нисходящая (вертикальные) составляющие (рис.6.2).

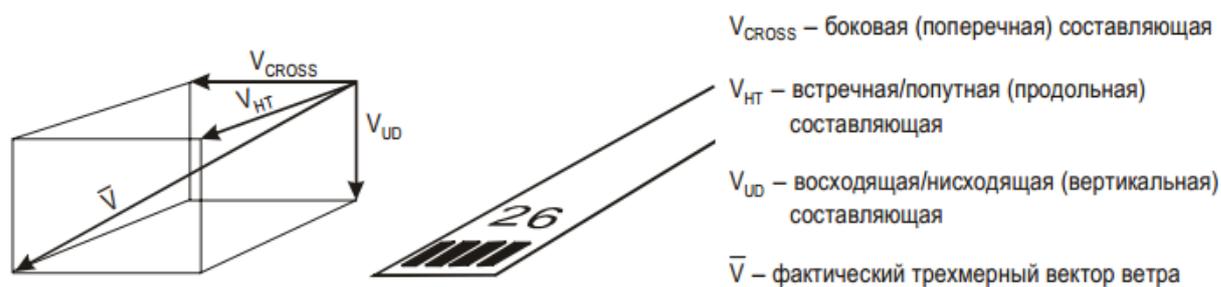


Рисунок 6.2 - Составляющие ветра относительно направления ВПП [7]

За исключением особых случаев, вертикальная составляющая ветра в приземном слое обычно невелика в сравнении с одной или обеими горизонтальными составляющими. Особые случаи, когда преобладает вертикальная составляющая, возникают при наличии конвективных облаков (особенно при грозах), горных хребтах и восходящих потоках теплого воздуха. Первые два явления имеют самое непосредственное отношение к сдвигу ветра (п.6.2).

В связи с малой вертикальной протяженностью интересующей области ДМРЛ-С может определять скорость и направление ветра в приземном слое только при наличии выпадающих осадков и на расстоянии не более 40 км (без учета рефракции) от места расположения ДМРЛ-С. Далее приземный слой будет располагаться за линией горизонта и расчет ветровых характеристик в области радиотени будет технически неосуществим.

6.2 Вертикальный и горизонтальный сдвиг ветра

Под термином «сдвиг ветра» понимается совокупность перемещений воздушных масс в различных по высоте слоях атмосферы, способных оказывать воздействие на воздушное судно. Диапазон мощности – от незначительных завихрений и порывов до массивированного перемещения воздушных масс между слоями, вплоть до замещения соседних слоев. Сдвиг ветра относится к одному из опасных природных явлений для гражданской авиации [4, 7, 9]. Данное явление может наблюдаться на любых высотах, однако наибольшую опасность для полета воздушных судов представляет в приземном слое (от 0 до 100 м), при этом максимальную – на высотах от 0 до 30 метров. В соответствии с Приказом Минтранса РФ от 31.07.2009 №128 (ред. От 16.11.2011) «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации» на территории РФ сдвиги ветра на территории аэродрома измеряются именно в слое 0 - 30 м.

Сдвиг ветра, представляющий собой изменение вектора ветра от одной точки пространства до другой, выражается разностью между векторами ветра в двух точках, которая сама является вектором (так как обладает как скоростью, так и направлением). Сдвиг ветра действует в свободной атмосфере и существует безотносительно к наличию или отсутствию в ней воздушного судна. Однако, при движении самолета (при взлете-посадке, маневрировании и т.д.), компоненты суммарного вектора скорости (рис.6.2), а также его сдвига, следует рассматривать как поперечную, продольную и вертикальную составляющую ветра (сдвига ветра) относительно воздушного судна.

Действующие наземные системы оповещения о сдвиге ветра основаны на инструментальных измерениях с помощью датчиков ветра, расположенных, в основном, на территории ВПП. Дистанционный метод оценки сдвига ветра основан на измерении ДМРЛ-С значений скорости ветра в соседних дискретах дальности, вычислении величины сдвига ветра согласно используемому в ПО алгоритму [5], дальнейшем усреднении полученной величины по всей толщине слоя и приведении полученной величины к рекомендованным ИКАО табличным значениям (табл. 6.1). Необходимо иметь ввиду, что с учетом ширины луча антенны слой усреднения для сдвига ветра может составлять от нескольких десятков метров (на расстоянии 10-15 км от ДМРЛ-С) до 2 км (на расстоянии 100 км).

Интенсивность сдвига рассчитывается путем деления величины модуля разности между векторами в двух точках на расстояние между ними с использованием одних и тех

же единиц измерения. В зависимости от расположения двух точек в пространстве, между которыми определяется сдвиг ветра, различают *вертикальный сдвиг ветра*, описывающий изменение горизонтального движения воздуха по вертикали, и *горизонтальный сдвиг ветра* – изменение движения воздуха по горизонтали.

Градации сдвига ветра применительно к задачам метеобеспечения авиации

Единицей измерения вертикального и горизонтального сдвига ветра является c^{-1} , однако, для практических целей метеорологического обеспечения авиации (в соответствии с требованиями ИКАО), значения сдвигов ветра в ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» указываются в м/с для:

- слоя высотой 30 м применительно к вертикальному сдвигу ветра;
- расстояния 600 м применительно к горизонтальному сдвигу ветра.

По своей интенсивности сдвиги ветра (согласно классификации ИКАО) подразделяются на слабые, умеренные, сильные и очень сильные. Критерии интенсивности сдвигов ветра приведены в табл.6.1.

Таблица 6.1 - Градации сдвига ветра согласно классификации ИКАО

Вертикальный сдвиг ветра на единицу измерения 30 м или горизонтальный сдвиг ветра на единицу измерения 600 м, м/с	Вертикальный сдвиг ветра на единицу измерения 100 м, м/с	Характеристика сдвига ветра
0 – 2	0 - 6,5	Слабый
2 – 4	6,5 – 13	Умеренный
4 – 6	13 – 20	Сильный
> 6	> 20	Очень сильный (опасный)

Данные критерии интенсивности сдвига ветра были впервые рекомендованы около 50 лет назад на пятой Аэронавигационной конференции (Монреаль, 1967 г.). В тот период полагали, что преобладающая угроза сдвига ветра связана с фронтами, включая фронты порывов (*линии шквалов*) при грозах и профили сильных ветров вблизи земли, которые легко выразить в виде градиентов скорости ветра.

Однако впоследствии стало очевидным, что такой относительно простой подход к классификации интенсивности сдвига ветра не является полностью удовлетворительным в силу ряда объективных причин, главной из которых является

различие массовых и технических характеристик воздушных судов. Так, сдвиг ветра одной и той же интенсивности (согласно табл. 6.1) может по-разному воздействовать на воздушные суда различных типов; то, что для воздушного судна одного типа может расцениваться как очень сильный сдвиг ветра, для другого будет лишь умеренным.

Ввиду этого, согласно рекомендациям ИКАО, требуется представлять донесения, сообщения, прогнозы и предупреждения о сдвиге ветра без определения его интенсивности. Вместе с тем пилоты в сообщениях о сдвиге ветра могут использовать такие классифицирующие термины, как «умеренный», «сильный» или «очень сильный», основанные в значительной степени на их субъективной оценке интенсивности имеющегося сдвига ветра.

Классификация и условия возникновения сдвига ветра

С точки зрения прогнозирования удобно классифицировать сдвиги ветра как *устойчивые* и *неустойчивые*. Устойчивый сдвиг как правило связан с заметными температурными инверсиями на малых высотах, горными массивами, или обтеканием воздушным потоком препятствий и т.п., имеет тенденцию затрагивать определенный район и сохраняется в течение относительно длительных периодов времени (измеряемых часами). Неустойчивый сдвиг ветра, в свою очередь, обуславливается конвективной облачностью и особенно грозами, обычно скоротечен (измеряется минутами), маломасштабен, перемещается с большой скоростью и характеризуется большими значениями.

Устойчивый сдвиг ветра чаще всего определяется рельефом местности:

– наличие горных хребтов и склонов способствует возникновению феновых и кататических ветров, образованию устойчивых приземных инверсий в долинах. Феновый ветер, часто сильный и порывистый, с высокой температурой и пониженной относительной влажностью воздуха, дующий с вершин горного хребта в долину может продолжаться до 5 суток [6]. Катабатический ветер наблюдается только в ночное время над наклонной земной поверхностью при отсутствии облачности и слабом барическом градиенте, преимущественно в антициклоне. Ветер образуется из-за стекающего вниз по склону гравитационного потока более холодного и плотного воздуха, соприкасающегося со склоном ниже более теплого и менее плотного воздуха, находящегося на той же высоте, но на некотором удалении от поверхности склона. В данном случае сдвиг ветра и турбулентность на малых высотах наблюдаются вдоль передней кромки и верхней границы более холодного воздуха при его движении вниз по склону холма;

– наличие в долине между горными хребтами устойчивой приземной инверсии приводит к сдвигу ветра на некоторой высоте над уровнем земли вдоль верхней границы инверсии [7];

– наличие крупных водоемов (морей, океанов, больших внутренних озер и рек) обуславливает возникновение суточных колебаний приземного ветра. Вследствие температурного градиента, который в дневное время возникает между воздухом над нагретой сушей и охлажденным воздухом над прибрежными водами, приземный ветер (морской бриз), дует в дневное время с воды на сушу, а в ночное – с суши в сторону воды (береговой бриз). Особенно ощутимы эти ветра при слабом воздушном потоке в приземном слое, солнечных днях и ясных ночах. Морской бриз намного сильнее берегового и может проникать на сушу в послеполуденные часы на расстояние до 48 км, захватывая высоты до 360 м над уровнем земли. Выше, как правило, наблюдается перенос воздуха в обратном направлении (антибриз), образующий вместе с бризом, замкнутую циркуляцию. Смена берегового бриза на морской происходит в первой половине дня, морского на береговой – вечером [6]. Морской бриз представляет собой пологий холодный фронт, в котором холодный воздух с воды вытесняет более теплый воздух над сушей. Существенный сдвиг ветра проявляется у поверхности земли вдоль передней кромки при продвижении фронта в глубь суши. На высотах наблюдается более слабый сдвиг ветра [7].

Все эти явления имеют сугубо локальный характер в отличие от синоптических процессов, порождающих неустойчивый сдвиг ветра. Данный сдвиг ветра, как правило, является более сильным и опасным для авиации. Он наблюдается:

- при прохождении атмосферных фронтов, особенно холодных фронтов второго рода и предшествующих им фронтов порывов (линий шквалов);
- под развитыми внутримассовыми грозовыми Сб на фронтах порывов (линиях шквалов) (Рис.6.3);
- при возникновении микропорывов (микрошквалов);
- при возникновении смерчей (торнадо);
- при наличии на малых высотах (50-200м) задерживающих слоев (инверсии или изотермии).

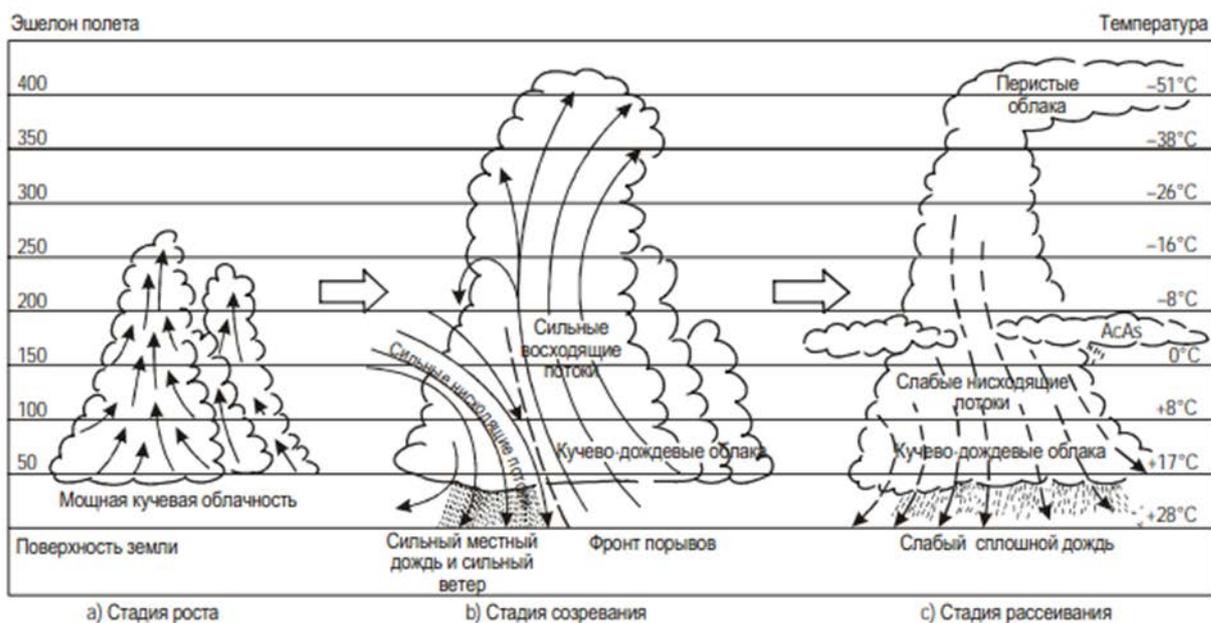


Рисунок 6.3 – Функциональный цикл грозы [7]

Зона **вертикального сдвига** ветра в атмосферных фронтах располагается:

- непосредственно перед линией теплого фронта,
- на линии шквалов, расположенной перед холодным фронтом,
- на самой линии холодного фронта и позади него.

Уровень максимального вертикального сдвига ветра опускается до земли перед приближением теплого фронта и поднимается от уровня земли вслед за прохождением холодного фронта. На уровне земли в направлении поперек фронта наблюдается и горизонтальный сдвиг ветра [7].

Теплый фронт смещается медленнее холодного, и условия возникновения сдвига ветра, существующие впереди теплого фронта на поверхности земли, могут оставаться значительно дольше, чем аналогичные условия, существующие позади холодного фронта.

В связи с тем, что в приземном слое скорость воздушного потока, как правило, увеличивается с высотой, вертикальный сдвиг ветра может быть **положительным** и **отрицательным** [22].

Положительным сдвигом называется такое распределение ветра, при котором его скорость на высоте больше чем у земли. Отрицательным сдвигом – такое распределение ветра, при котором его скорость уменьшается с высотой.

Горизонтальный сдвиг ветра делится на **циклонический** и **антициклонический**.

Циклоническим сдвиг ветра считается при уменьшении скорости ветра в северном полушарии справа налево. **Антициклоническим** – когда скорость по потоку в северном полушарии уменьшается слева направо [22].

Подробно о режиме отображения вертикального и горизонтального сдвига ветра см. п.7.5.3.

6.2.1 Турбулентность

Другим источником опасности для самолетовождения не только при взлете и посадке самолета, но и при полете на эшелоне на больших высотах является повышенная **турбулентность**. Полет самолета в турбулентной зоне сопровождается пульсациями его скорости, изменением угла атаки, крена и других характеристик движения.

Основной причиной атмосферной турбулентности является образование в атмосфере вихрей различных масштабов (от долей миллиметра и более). Атмосферная турбулентность особенно значительна в слое трения (пограничном слое атмосферы) и в областях струйных течений [6].

Возникновение турбулентности связано с действием целого ряда факторов. По преобладанию того или иного фактора принято условное деление турбулентности на механическую, термическую, турбулентность, связанную с кучево-дождевой облачностью), фронтальную (в зоне атмосферных фронтов), турбулентность ясного неба и орографическую.

ДМРЛ-С может определить турбулентность только в облачном слое. Поэтому рассмотрим случаи возникновения турбулентности при наличии облаков:

1. Турбулентность термического вида является следствием развития неупорядоченных конвективных движений при неустойчивой термической стратификации атмосферы. При неравномерном прогреве в дневные часы над сильно нагретыми участками земной поверхности образуются элементы конвекции – термики. Развитие термической турбулентности может происходить при наличии 3-4 баллов облаков кучевых форм с вертикальной протяженностью до 1 км в воздухе с большой влажностью. Под основаниями таких облаков может наблюдаться болтанка от умеренной до сильной. При увеличении облачности до 5-7 баллов интенсивность термической турбулентности и вероятность болтанки уменьшается.

Облака слоистых форм препятствуют развитию термиков и, соответственно, развитию турбулентности.

При перистых облаках и наличии сильной неустойчивости в приземном слое возможность образования термиков сохраняется.

При 10-и балльной облачности термическая турбулентность не развивается.

2. В зоне кучево-дождевой облачности турбулентность, помимо самой облачной зоны, возникает на линии шквалов в передней части облака, при

восходящих/нисходящих конвективных движениях в нижнем слое вблизи Сб и под ними. Восходящие потоки зарождаются в нижнем 500-метровом слое атмосферы за 20-40 км перед Сб. При слабых ветрах в пограничном слое конвективный подъем начинается на расстоянии 5-10 км от передней части облака. В результате этого турбулентные зоны с «засасывающими» потоками внутри основания облака возникают вблизи земной поверхности на расстоянии в несколько десятков километров от передней части Сб. По результатам исследований максимальные скорости вертикальных токов в Сб в 50% случаев составляют 5 м/с, реже доходят до 30 м/с, а в суперячейковых Сб могут достигать 50 м/с [9].

Наиболее интенсивная турбулентность развивается на границах восходящих/нисходящих потоков. Интенсивность вертикальных движений возрастает в нижних двух третях облака, а выше она убывает, приближаясь к нулю у верхней кромки облака (рис.6.4). Интенсивность болтанки обычно усиливается от основания облака вверх, до нижней части наковальни, выше она ослабевает. Внутри периферийной части (отрогов) наковальни болтанка не превышает умеренную, а в купольной части вершины она может быть и сильной. Наиболее интенсивная турбулентность развивается рядом с растущими Сб *calvus* (кучево-дождевые лысые) и внутри них, и сохраняется в облаках, прекративших свой рост. Средняя толщина турбулентной зоны над такими облаками составляет 500 м, но сильная болтанка может наблюдаться в слое 50-100 м над ними. В постепенно распадающихся облаках Сб *incus* (кучево-дождевые с наковальней) турбулентность ослабевает. Мощность турбулизированного слоя над ними не превышает 100-200 м, а интенсивность болтанки – не более умеренной.

Турбулентные зоны вокруг вершин Сб и над ними ассиметричны. Повторяемость и значения максимальных порывов имеют наибольшие значения перед подветренной стороной облака (т.е наиболее удлиненной частью наковальни). Длина области повышенной турбулентности в слое 200-300 м над Сб и перед ним в 2-3 раза больше, чем за его тыловой частью и рядом с флангами. Сильная турбулентность наблюдается и на расстоянии 30-40 км от изолированных Сб вниз по потоку.

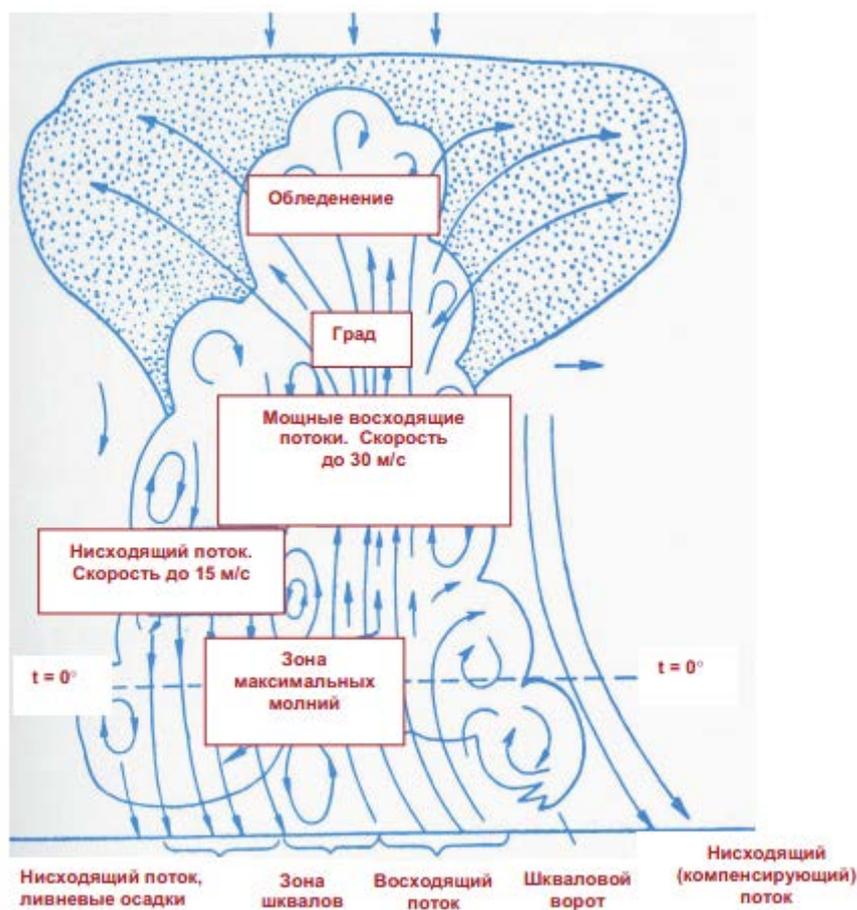


Рисунок 6.4 – Упрощенная модель кучево-дождевого облака в стадии максимального развития с зонами турбулентности [9]

3. Турбулентность в зоне атмосферных фронтов. Развитию турбулентности в зонах атмосферных фронтов способствуют резкие контрасты температуры и изменчивость поля ветра.

В зоне холодного фронта развитие турбулентности связано с резким изменением направления и скорости ветра и развитием вынужденной конвекции и образованием Сб.

Наиболее интенсивная турбулентность наблюдается при прохождении холодных атмосферных фронтов II рода. При этом турбулентность отмечается не только в зоне фронта, но и за ним на расстоянии до 100 – 150 км от приземной линии фронта.

На малоактивных и медленно смещающихся холодных фронтах I рода болтанка практически отсутствует, но в летнее время в тылу такого фронта при прояснениях в результате термической неустойчивости холодного воздуха за фронтом создаются условия для развития термической турбулентности.

Иногда в зоне холодных фронтов в слое 300 – 1500 м наблюдаются струйные течения низких уровней (мезоструи), которые могут располагаться как перед фронтом, так и за ним и сопровождаются развитием интенсивной турбулентности.

На теплых фронтах возникновение турбулентности связано с вертикальным сдвигом ветра, определяемым изменением направления и скорости ветра с высотой. Поэтому зоны турбулентности располагаются непосредственно в зоне линии фронта и перед ней на расстоянии нескольких десятков км в виде отдельных тонких слоев и пятен. В зонах теплых фронтов интенсивность турбулентности слабее, чем в зонах холодных.

Интенсивная турбулентность возникает в зонах низкотропосферных струйных течений перед теплыми фронтами в холодном воздухе на расстоянии 150-200 км от приземной линии фронта в слое 1000 – 1500 м.

В зоне фронтов окклюзии развитие турбулентности определяется скоростью ветра и степенью развития конвекции. Процесс окклюдирования вызывает резкое усиление турбулентности в зоне повышенных вертикальных и горизонтальных сдвигов ветра и вертикальных потоков в нижних слоях атмосферы. Сформировавшийся фронт окклюзии при своем продвижении вызывает развитие турбулентности, характерное для фронта, по типу которого образовалась окклюзия.

Согласно [14] умеренная и сильная турбулентность чаще всего наблюдается:

- если горизонтальный градиент средней скорости ветра на коротких участках больше 50 км/ч на 100 км;
- при сравнительно малых горизонтальных сдвигах ветра (меньше 10 м/с на 100 км), но при сравнительно больших вертикальных сдвигах (больше 0,8 м/с на 100 м).

Значительно реже сильная турбулентность встречается при больших горизонтальных сдвигах (больше 10 м/с на 100 км) и малых вертикальных сдвигах (меньше 0,8 м/с на 100 м).

ИКАО подразделяет интенсивность турбулентности на четыре категории [8]:

- слабая;
- умеренная;
- сильная;
- чрезвычайная.

В ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» турбулентность характеризуется скоростью диссипации турбулентной энергии ξ . В таблице 6.2 представлены четыре градации скорости диссипации турбулентной энергии, используемые для отображения в ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010».

Таблица 6.2 -Градации скорости диссипации турбулентной энергии

ξ см ² /с	Характеристика турбулентности
0-10	Слабая
10-100	Умеренная
100-400	Сильная
> 400	Очень сильная (опасная)

6.2.2 Фронт порывов (линия шквала)

Термин «**Фронт порывов**» обозначает переднюю кромку холодного, плотного нисходящего потока, вытекающего из грозовых Сб, который достигает земли и распространяется во всех направлениях, подрезая более теплый и менее плотный окружающий воздух. **Фронт порывов** напоминает пологий холодный фронт, но скорости ветра, сдвиг ветра и турбулентность при его прохождении намного выше [7].

Вначале **фронт порывов** расходится под облаком по земной поверхности во всех направлениях одинаково. Но, при смещении грозового облака, **фронт порывов** движется с опережением грозы в направлении ее смещения. Этот эффект может быть усилен, если холодный нисходящий поток их грозового облака ударяет в землю не вертикально, а под углом, придавая холодному течению определенное направление (рис.6.5) [7].

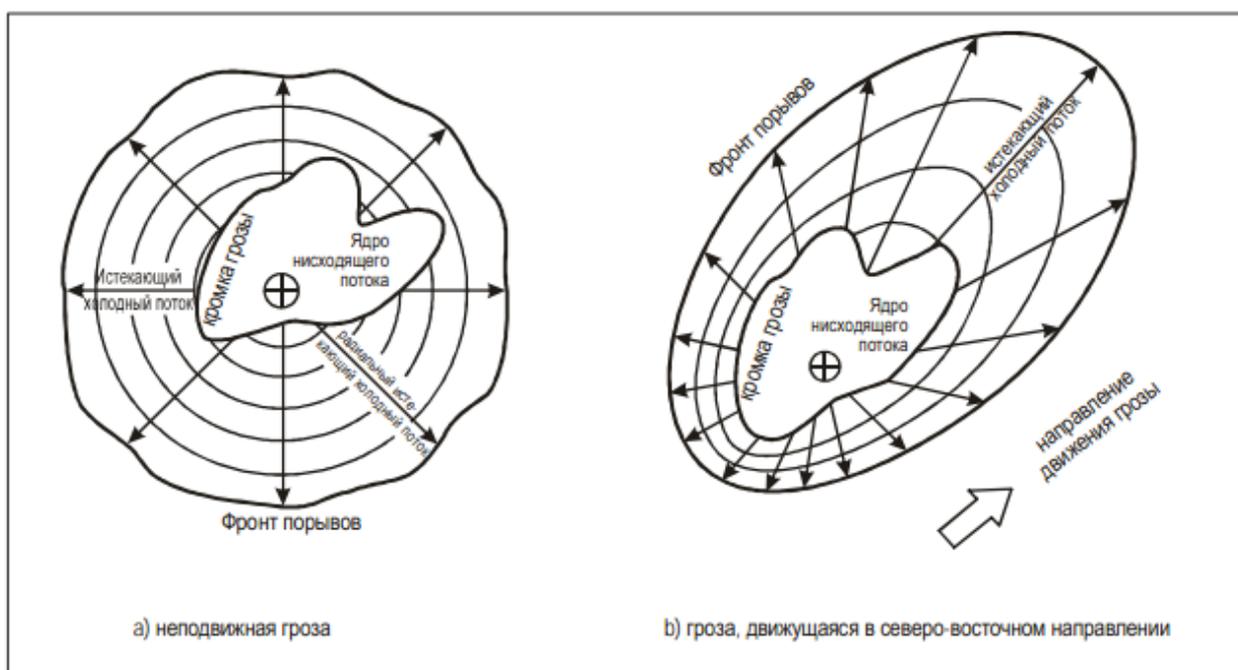


Рисунок 6.5 – Вид сверху на грозовое облако и фронт порывов грозы [7]

По разделяющей поверхности **фронта порывов** между холодным и теплым воздухом наблюдается, как правило, сильный и очень сильный **вертикальный сдвиг ветра**. Вслед за прохождением передней кромки фронта порывов отмечается заметный **горизонтальный сдвиг ветра** у земли. **Фронт порывов** может двигаться впереди грозового облака на расстоянии до 20 км без сопровождения дождя, и такое внезапное изменение ветра при солнечной погоде чаще всего бывает неожиданным. Изменение направления приземного ветра часто достигает 180°, а порывы ветра при прохождении фронта могут превышать 25-27 м/с. [7]

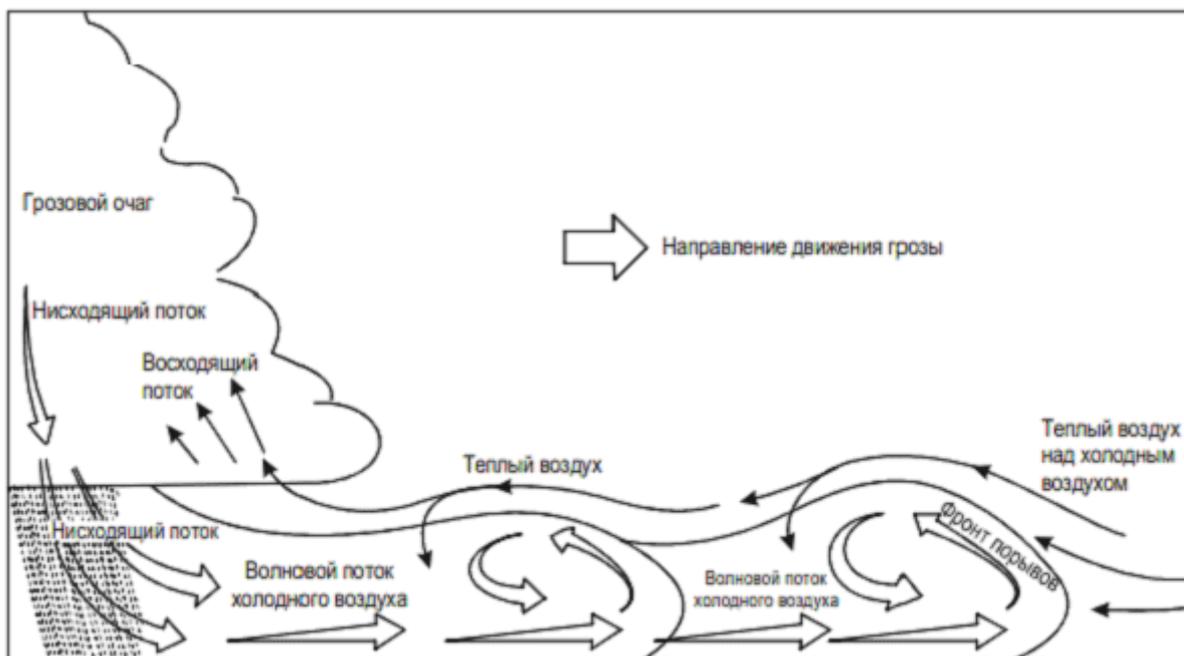


Рисунок 6.6 – Фронт порывов из грозового облака в разрезе [7]

Явление трения замедляет скорость холодного воздуха у поверхности земли, в следствие чего на верхней границе приземного слоя (100-150м над уровнем земли) холодный воздух может вырваться вперед (рис. 6.6). Внутри такого объема воздуха возникают циркуляции и завихрения, в центре и позади которых наблюдаются особенно сильные сдвиги ветра и турбулентность. Этот очаг холодного воздуха на верхней границе приземного слоя порождает множественные нисходящие воздушные потоки, усиливающие сдвиг ветра и турбулентность в этой зоне.

Фронты порывов обычно формируются и перемещаются при ясном небе, и сопровождаются, чаще всего, пылевым облаком. Но окружающий влажный теплый воздух иногда создает линию гладкой шквалистой облачности немного выше верхней границы фронтального раздела, которая, опоясывая основание грозового облака и продвигаясь впереди зоны осадков, всегда выглядит очень внушительно и является ориентиром смещения **фронта порывов** [7].

6.2.3 Микрошквал

В основном поле нисходящих из кучево-дождевого облака порывов часто отмечаются меньшие по размеру, но еще более интенсивные нисходящие порывы – **микрорывы (микрошквалы)**. Это нисходящие из облака потоки, приводящие к внезапному возникновению горизонтального ветра разрушительной силы с горизонтальной протяженностью по поверхности земли от 0,4 до 4 км. Время существования таких потоков составляет не более 10 минут, в связи с чем, сложно зафиксировать их существующими системами наблюдения. Сложность его радиолокационного обнаружения состоит в том, что влияние вертикальной составляющей скоростей частиц на величину радиальной скорости становится существенным только при больших углах возвышения антенны, а, значит, на очень небольшом расстоянии от ДМРЛ-С.

Микрорывы могут быть одиночными или объединяться в «семейства», не всегда сопровождаются дождем и могут зарождаться в любой конвективной облачности.

Микрорывы могут возникать вдоль ВПП при посадке самолетов. Особенно это ощущается при слабых ветрах и штилевой погоде.

Первоначально микровсплеск развивается как нисходящее движение воздуха, берущее начало из основания облака (рис. 6.7). Этот нисходящий поток ускоряется и в пределах нескольких минут достигает поверхности земли (этап взаимодействия). Именно в течение этого этапа наблюдаются самые сильные ветры. Затем следует стадия образования мощных вихревых потоков вблизи поверхности земли, в течение которой вихри ветра поднимают холодный воздух вверх от точки взаимодействия с землей.

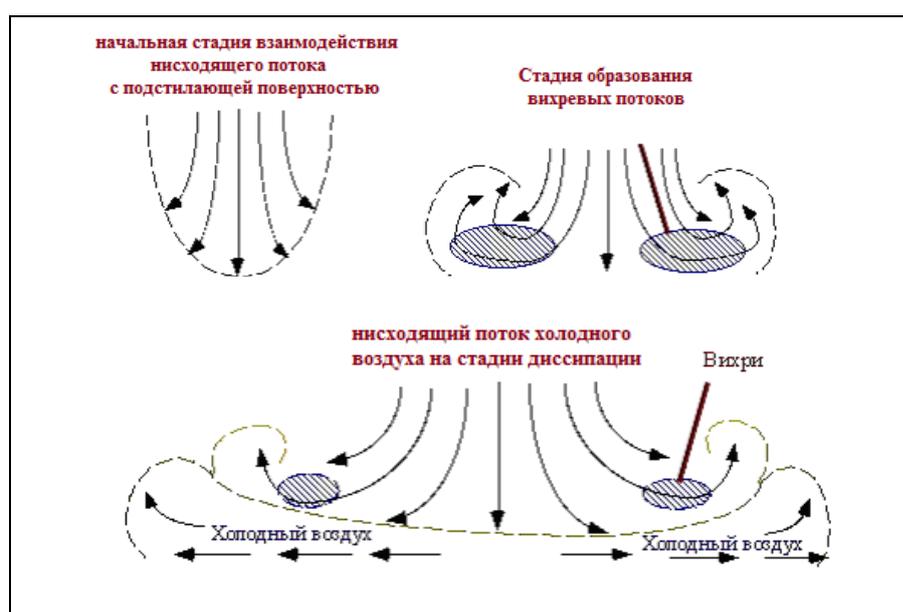


Рисунок 6.7 – Эволюция микрорыва

На этапе диссипации ветры продолжают ускорять воздух, представляя большую угрозу для авиации.

6.2.4 Смерчи (торнадо)

Наиболее экстремальным вариантом сдвига ветра является **смерч** (в США - **торнадо**). Смерч является противоположностью микропорыву. Он образуется от чрезвычайно концентрированной системы низкого давления, являясь вихрем, который всасывает в себя окружающий воздух. Смерч образуется в устойчивых восходящих потоках.

Смерч это сильный маломасштабный вихрь под облаками с почти вертикальной, но часто изогнутой осью. Имеет вид темного облачного столба диаметром в несколько десятков метров. Он опускается в виде воронки из основания Сб, навстречу которой с земной поверхности может подниматься другая воронка из брызг и пыли, соединяющаяся с первой. Наиболее узкая часть столба – в середине. Из одного облака может опускаться одновременно несколько смерчей, в этом случае - небольшого диаметра. Вращательное движение в смерче может быть циклоническим и антициклоническим, но чаще всего наблюдается циклоническое вращение. Воронка (мелкомасштабный вихрь) – основная часть смерча. Она состоит из внутренней полости и стенок. Движение воздуха во внутренней полости направлено сверху вниз и может достигать больших скоростей. Иногда от стенки до стенки проскакивают своеобразные небольшие молнии. В стенках смерча движение воздуха направлено по спирали вверх и может достигать очень больших скоростей (до ≈ 150 м/с). Ширина стенок по сравнению с внутренней полостью очень небольшая - несколько метров. Скорости вращения в стенках у одной и той же воронки могут очень быстро меняться.

Возникновение смерчей связано с очень сильной неустойчивостью стратификации атмосферы в нижних слоях. Близость фронта может стимулировать процесс образования смерчей [6].

Давление в ядре, откуда рождается **смерч**, может быть ниже атмосферного на 10%. Разрушительная мощь смерча является результатом того, что часть огромного количества энергии, заключенного в грозовом облаке, концентрируется на площади, не превышающей в диаметре несколько сотен метров. Наибольшая скорость, измеренная в смерче, составила 75 м/с [19]. Но анализ ущерба, нанесенного смерчами, и исследования доплеровских спектров скорости ветра в торнадо американскими учеными указывают на максимальную скорость до 111 м/с. Смерчи могут формироваться в восходящих потоках вдоль фронта порывов (линии шквалов) впереди грозы или впереди холодного фронта

второго рода. При этом нередко смерч смещается вдоль линии шквалов перпендикулярно линии смещения фронта.

На территории России смерчи – сравнительно редкое явление. Они наблюдаются у Черноморского, Азовского побережья, в центральных областях европейской территории России, в Поволжье, на Урале (рис.6.8):



Рисунок 6.8 - Смерч в Казани летом 2009 года

Для детального изучения структуры смерча, а также его пространственно-временных характеристик на территории России имеющейся информации явно недостаточно. Это связано с редкостью их наблюдения на территории России (по сравнению с северо-американским континентом), а также небольшими ареалами охвата территории. Разрушительная сила смерчей затрудняет определение таких параметров, как продолжительность, скорость и направление ветра и др.

Поэтому скорость ветра определяется по разрушительной силе смерча и достигает в нем сотни километров в час, а скорость перемещения по наблюдениям составляет 40-70 км/ч, что соответствует скорости движения фронтов и циклонов.

7 Описание работы с ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» (использование по назначению)

7.1 Назначение ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010»

ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» предназначено для автоматизированного управления работой ДМРЛ-С, получения и обработки результатов радиолокационного зондирования и отображения по результатам обработки различных информационных продуктов, в том числе, полей облачности и связанных с ней опасных явлений погоды (сильные ливни, грозы, град, шквал). Автоматизация процесса обработки радиолокационных данных позволяет в оперативном режиме с высокой надежностью генерировать информационные продукты и передавать их в синоптические или ситуационные центры, на которые возложены функции составления сверхкраткосрочного прогноза погоды. Весь процесс радиолокационного зондирования в полусфере обзора с комплексной обработкой принимаемого сигнала, в том числе, выделение доплеровских и поляризационных характеристик, занимает время порядка 4-8 минут.

В процессе обзора также выполняется фильтрация принимаемого сигнала, в том числе, удаление мешающих отражений от местных предметов с использованием комплексных алгоритмов. Настройка фильтров осуществляется разработчиками ПО на стадии ввода станции в эксплуатацию.

ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» контролирует режим проведения обзоров, настройки работы радиолокатора и параметры вторичной обработки. Контроль в данном случае подразумевает автоматическое включение радиолокатора по заданному расписанию, передачу в управляющее устройство ДМРЛ-С настроечных параметров излучения сигнала и режима вращения антенны.

По результатам зондирования пространства на удалении до 250 км от радиолокатора выполняется расчет различных метеорологических полей. К ним относятся:

- поля интенсивности и накопленной суммы осадков;
- поля верхней границы облачности;
- поля опасных явлений погоды, в том числе, наличие града, грозы, шквала.

Перечисленные метеорологические поля строятся на основании комплексного анализа характеристик принятого сигнала. Пространственное разрешение представления получаемой информации: 500 м в горизонтальной плоскости, 100 м по вертикали.

Карты опасных явлений погоды строятся на основании критериев, заложенных в алгоритмы распознавания ОЯ. Подстройку критериев выполняет разработчик ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» с учетом географических и климатических особенностей места установки

радиолокатора. Уточнение критериев выполняется в период начальной эксплуатации ДМРЛ-С. Все работы по уточнению критериев и внесению изменений в связанную с ними часть ПО ДМРЛ-С разработчик выполняет самостоятельно.

Вся получаемая информация в соответствии с регламентом работы станции может архивироваться на жесткий диск, передаваться по каналам связи удаленному потребителю и выводиться на печать.

7.2 Графический интерфейс пользователя ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010»

ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» реализует графический интерфейс пользователя, имеющий следующее назначение:

- отображение настроек работы радиолокатора и параметров вторичной обработки радиолокационных данных;
- внесение изменений в настройки работы радиолокатора по командам оператора в соответствии с требованиями потребителей и синоптической ситуацией;
- отображение параметров вторичной обработки, в том числе пороговых значений критериев распознавания ОЯ, внесение изменений в эти параметры при получении прав доступа от разработчика ПО;
- информирование о ходе проведения обзора, этапах получения и обработки радиолокационной информации;
- отображение по командам оператора информационных продуктов в виде проекции на географическую карту, а также в заданных вертикальных сечениях;
- вывод подробной информации в заданной ячейке пространства;
- поиск и загрузка архивной информации;
- настройка параметров печати.

7.3 Рабочее окно ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010»

Рабочее окно ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» появляется на экране монитора после загрузки операционной системы и автоматического запуска программы *UVKI* из меню автозагрузки (или после запуска программы вручную путем двойного щелчка мыши на ярлыке *UVKI*). Работа оператора с программой осуществляется путем активации различных окон отображения и визуальных элементов с помощью клавиатуры и мыши.

Рабочее окно ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» (рис.7.1) имеет следующие атрибуты:

- заголовок с названием отображаемой карты, даты и времени произведенного обзора;
- кнопки системного меню: развернуть, свернуть, закрыть;
- главное меню;

- инструментальная панель;
- главное окно с отображаемыми картами метеорологической обстановки;
- окно списка обзоров;
- окно вертикального распределения отражаемости;
- цветовая палитра отображаемой информации;
- панель функциональных кнопок;
- панель реперов;
- панель углов отображения в конусном сечении.

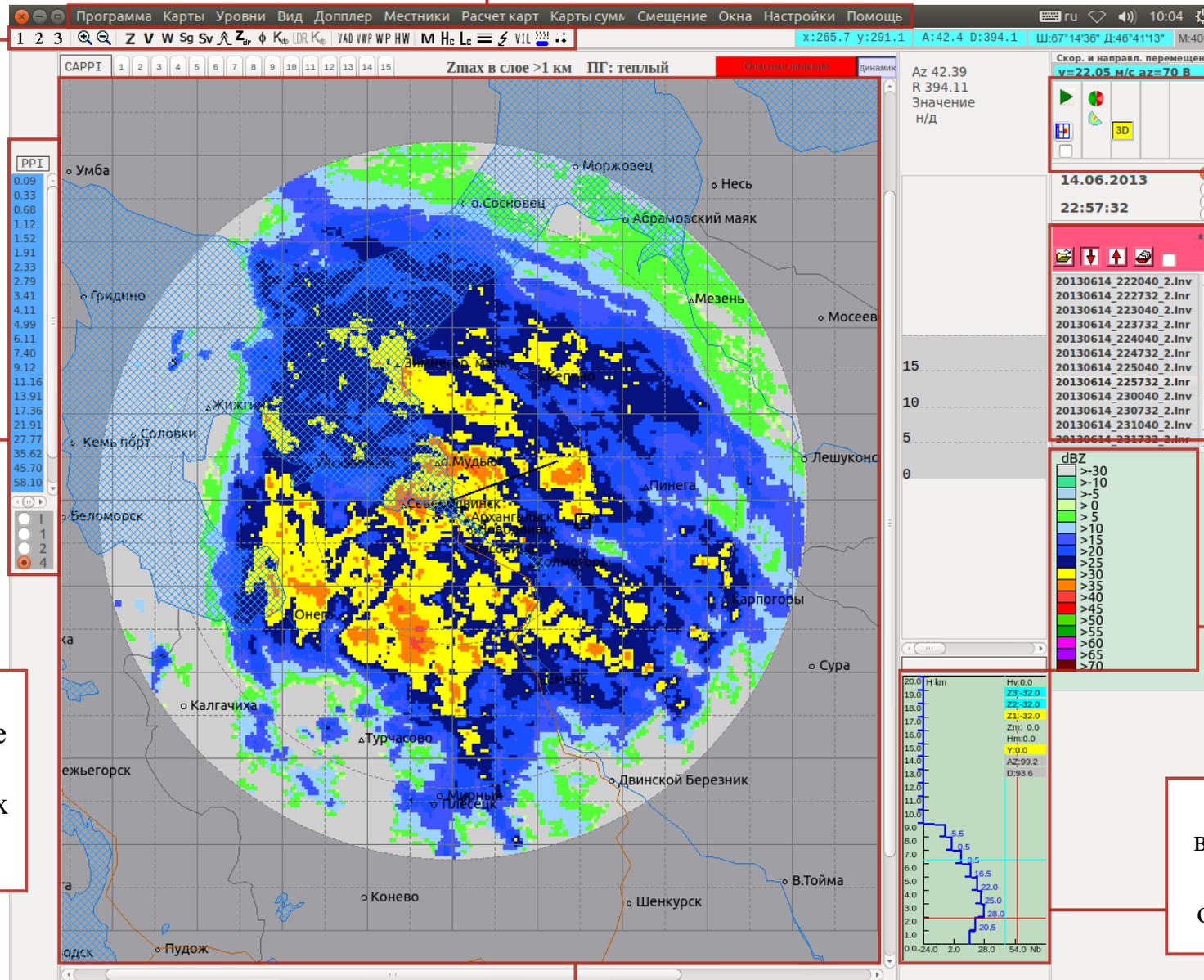
Работа оператора с ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» осуществляется путем активации различных окон и визуальных элементов с помощью клавиатуры и мыши.

Основную часть Рабочего окна занимает *Главное окно* с географической основой, в котором по выбору оператора отображаются карты метеорологической информации.

В верхней строке Рабочего окна размещается *Главное Меню*, с помощью которого осуществляется настройка параметров радиолокационных наблюдений, отображение различных карт метеорологической информации, задание масштаба изображения и т.д. По выбору оператора Главное меню может отображаться в кратком («оперативный режим работы») или в расширенном («режим анализа») варианте. Ряд функций главного меню, наиболее часто используемых в оперативной работе, вынесены на *Инструментальную панель* в виде кнопок быстрого доступа, которые, по своему функциональному назначению, дублируют подпункты меню, облегчая доступ оператора к основным функциям программы. При наведении курсора на кнопки, расположенные на инструментальной панели, в помощь оператору, предусмотрены всплывающие подсказки.

Инструментальная панель

Главное меню



Функциональные кнопки

Панель навигации

Окно условных цветов и градаций

Окно вертикального профиля отражаемости

Углы отображения конусных сечений

Главное окно

Рисунок 7.1 – Рабочее окно взаимодействия с пользователем УВК ДМРЛ-С

Пункты меню, их функциональное назначение, а также описание всех элементов Главного окна приведены в **Руководстве пользователя**. В данном документе описание интерфейса и функций программы будет дано в объеме, необходимом для правильной интерпретации отображаемых данных.

7.4 Формы представления данных

Полученная в ходе зондирования информация структурирована в соответствии с режимом работы радиолокатора («Отражаемость», «Скорость») в виде полярных конических сечений. В зарубежной литературе для обозначения первичной информации в полусфере обзора используется термин *Volume Scan* (рис. 7.2). Каждое сечение соответствует фиксированной величине наклона антенны (углу места).

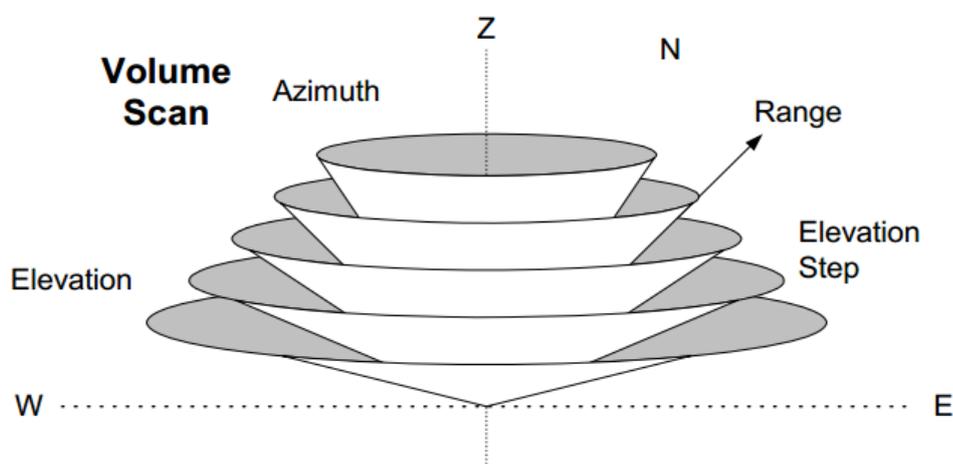


Рисунок 7.2 – Графическое изображение конических сечений объемного информационного поля (**Volume Scan**) радиолокационного зондирования.

Результаты обзоров, структурированные в виде набора конических сечений, представляют собой первичную информацию, используемую в ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» для дальнейшего анализа и построения различных информационных продуктов вторичной обработки. Данные, полученные в каждом режиме, сохраняются в отдельный файл.

При построении карт различных метеорологических параметров для целей оперативного автоматического анализа радиолокационной информации, штормооповещения и формирования сообщений в коде BUFR, в ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» осуществляется обращение к файлам первичной информации (через навигационную панель), которые привязаны ко времени обзора. Оператор, при просмотре данных обзора результатов вторичной обработки в Главном окне, может указать файл, из которого следует загружать данные, т.е. использовать файл с данными режима «Отражаемость», либо файл с данными режима «Скорость».

Доступные файлы первичных радиолокационных данных перечислены в панели навигации (рис.7.3) в правой части главного окна ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010». Имя файла содержит информацию о дате и времени проведения обзора и имеет следующий формат:

YYYYMMDD_hhmmss.Inr(v), где **YYYYMMDD** – год, месяц и день, а **hhmmss** – часы, минуты и секунды проведения обзора.

В зависимости от режима работы радиолокатора, в котором получены первичные данные, название файлов, отображаемых в навигационной панели (рис.7.3), заканчивается либо на **Inr** (режим «Отражаемость»), либо **Inv** (режим «Скорость»).

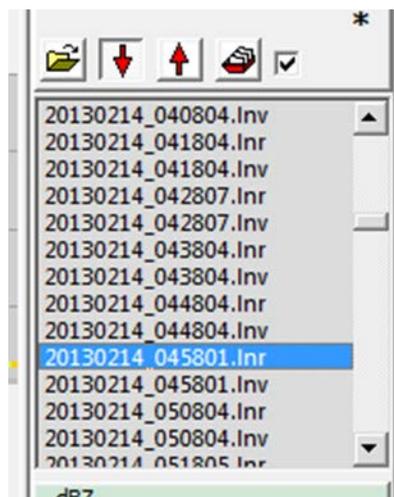
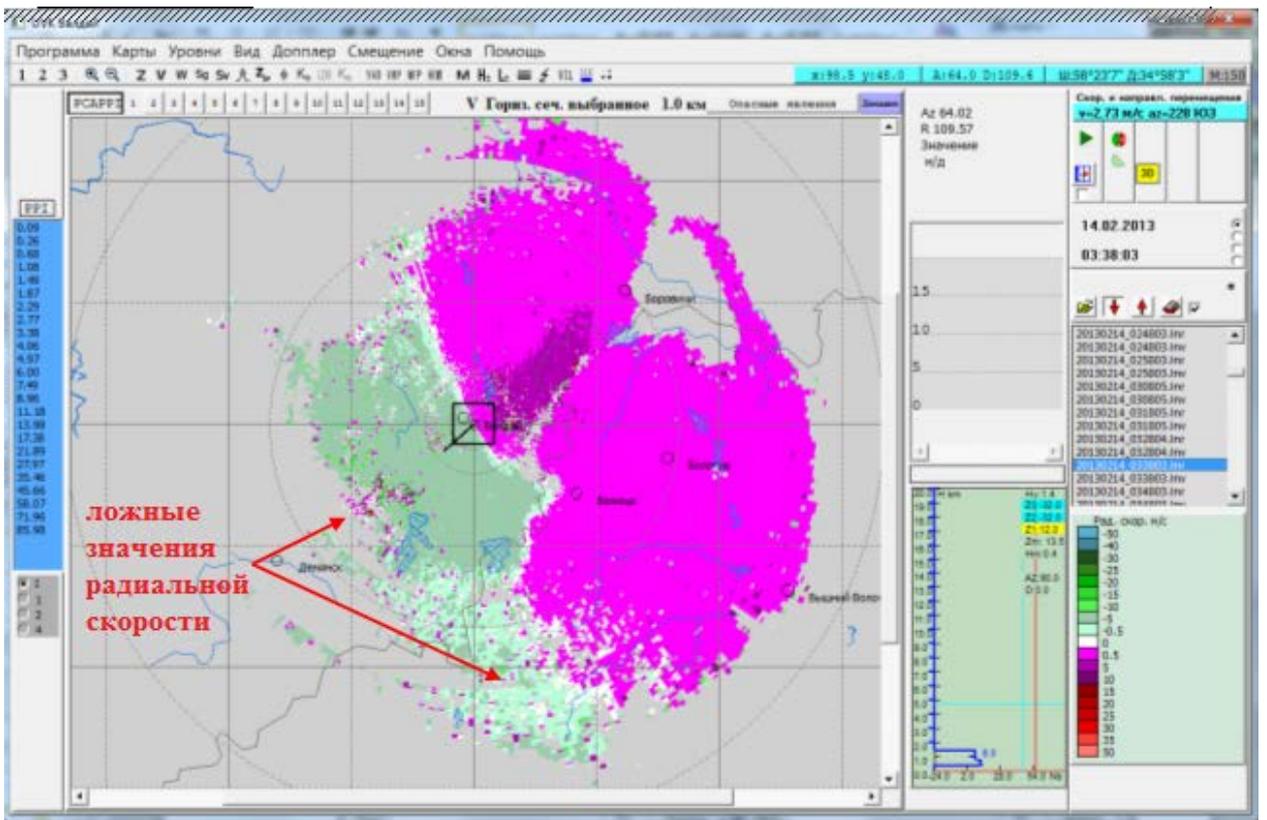
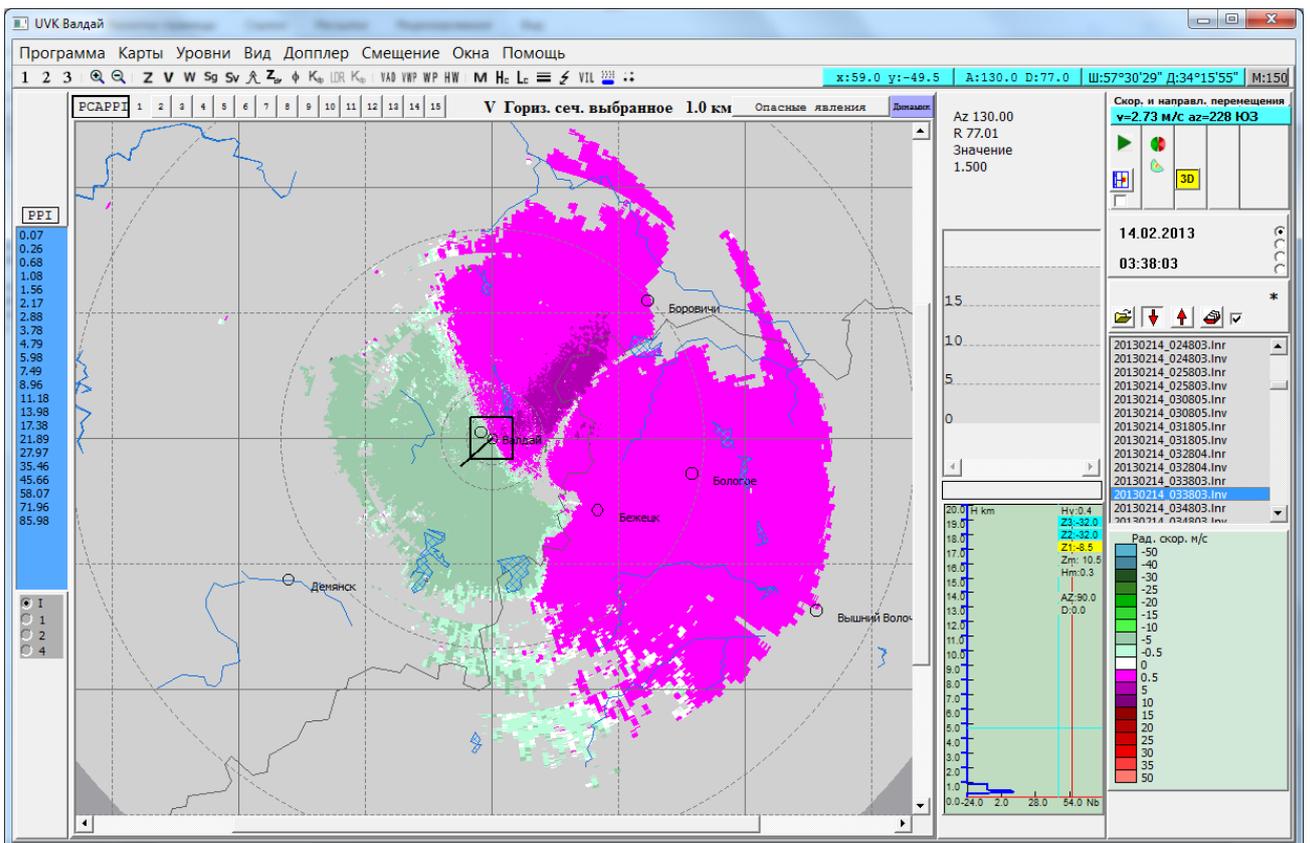


Рисунок 7.3 – Навигационная панель с перечнем доступных файлов первичных данных.

Внимание! При просмотре в Главном окне файлов формата **YYYYMMDD_hhmmss.Inr**, используемых для отображения карт явлений (связанных с радиолокационной метеорологической отражаемостью) в радиусе 250 км, также возможен вывод на экран доплеровских характеристик гидрометеоров (например, «Доплер» → «Скорость»). Разный период повторения и разная возбуждения частоты передачи импульсов в режимах наблюдений «Отражаемость» и «Скорость» приводит к тому, что доплеровские характеристики гидрометеоров на карте отражаемости .Inr сильно «зашумлены» (рис.7.4а). Ввиду этого, для отображения доплеровских характеристик гидрометеоров рекомендуется использовать файлы формата **.Inv** (рис.7.4б).



а)



б)

Рисунок 7.4 – Просмотр карт доплеровской радиальной скорости с использованием первичных .Inr (а) и .Inv (б) файлов

7.4.1 Индикатор кругового обзора PPI (Plan Position Indicator)

ПО «УВК ДМРЛ-С» позволяет выводить на экран проекцию отдельных конических сечений выбранного типа информации в виде цветовой карты, наложенной на географическую основу (карту). Данный тип отображения поверхности постоянного угла возвышения антенны принято называть **PPI (Plan Position Indicator)**, а в отечественной практике наиболее близким аналогом является индикатор кругового обзора (ИКО), предназначенный в системах МРЛ-2 и МРЛ-5 для отображения информации в координатах «дальность – азимут» при заданном угле места.

Это классический и наиболее простой вариант представления радиолокационных данных с сохранением информации в сферической системе координат (без их преобразования в прямоугольную систему координат). На карте PPI радиолокационные данные каждого объема пространства отображаются в виде трапеций, образованных лучами соседних азимутов, на которые делится сектор обзора, и радиальными кольцами, проведенными через каждое ΔR (R – удаление импульсного объема от радиолокатора), равное дискретности по дальности.

В ДМРЛ-С сканирование проводится по 24 углам возвышения антенны (от 0,11 до 85,69 градусов), соответственно пользователю доступна любая из 24 возможных карт PPI. Выбор карты осуществляется в Главном окне ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» (см.рис.7.1).

Примечание. Оптимальная сетка углов возвышения антенны устанавливается разработчиком ПО при участии персонала, задействованного в эксплуатации ДМРЛ-С, на этапе сдачи объекта в опытную эксплуатацию.

7.4.2 Индикатор кругового обзора постоянной высоты Constant Altitude PPI (CAPPI)

Продукт CAPPI дает возможность просмотра картины пространственного распределения отраженных сигналов на одной или нескольких постоянных высотах относительно поверхности Земли. Исторически продукт CAPPI создан с целью устранения некоторых проблем, связанных с интерпретацией карт PPI. К одной из таких проблем относится влияние на радиолокационные продукты PPI метеорологических целей (местников), расположенных в ближней зоне МРЛ.

Карта CAPPI строится на основании данных от каждого угла места, который «попадает» в высоту, установленную для поперечного сечения (рис.7.5).

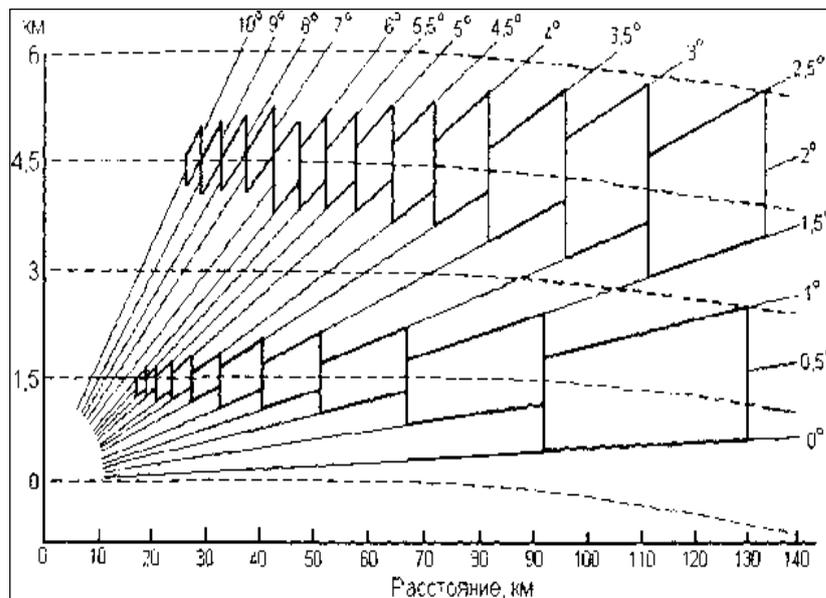


Рисунок 7.5 – Геометрия картины CAPPI (ИКО на уровнях 1500 и 4500 м) [3]

Количество углов, а также геометрия ячеек, участвующих в построении CAPPI, зависит от выбранной высоты сечения, а также диапазона и частоты угломестного сканирования.

Следует отметить, что при использовании способа отображения информации в виде CAPPI, данные будут отображаться “кольцами”, исходя из идеи метода (рис.7.6).

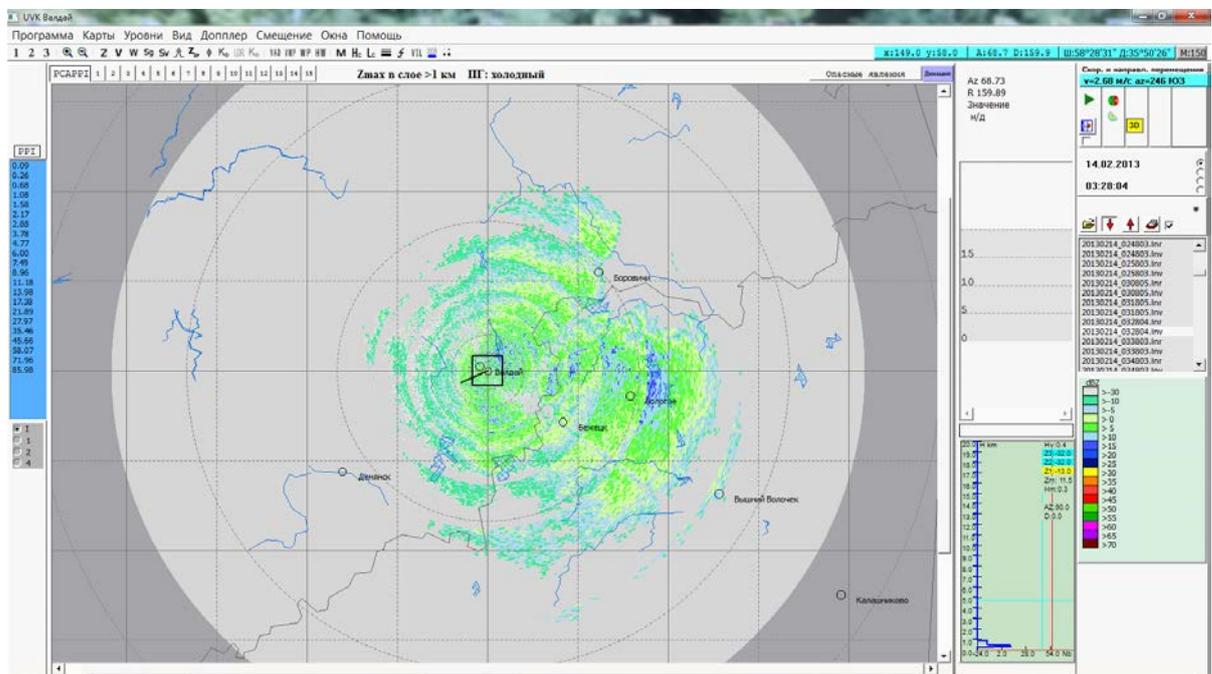


Рисунок 7.6 – Присутствие колец на карте CAPPI.

7.4.3 Распределение радиолокационной отражаемости на различных высотных уровнях по типу псевдо-SARPI

Наряду с продуктами SARPI, дискрет отображения которых составляет 0,1 км в ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» возможно представление радиолокационной отражаемости на различных высотных уровнях по типу псевдо-SARPI. Алгоритм псевдо-SARPI генерирует изображение выбранного типа данных (в случае ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» только отражаемости) на высоте, выбранной пользователем. Метод генерации очень похож на стандартный метод SARPI (описанный выше). Данные с минимального угла места транслируются на низлежащие уровни высоты по вертикали вниз до земли без интерполяции. Дополнительно к этому, зоны с отсутствующими данными, расположенными вблизи радара (при больших углах места), а также на большом расстоянии от него (при малых углах места), заполняются данными с соответствующего уровня: на близких расстояниях данные берутся с наивысшего уровня до пересечения его луча с требуемой высотой, а для больших расстояний, с наименьшего уровня над пересечением его луча с требуемой высотой (на рис.7.7 схематичное изображение данных, используемых для дальнейшего усреднения и приведения к высоте 1500 м изображено красной кривой).

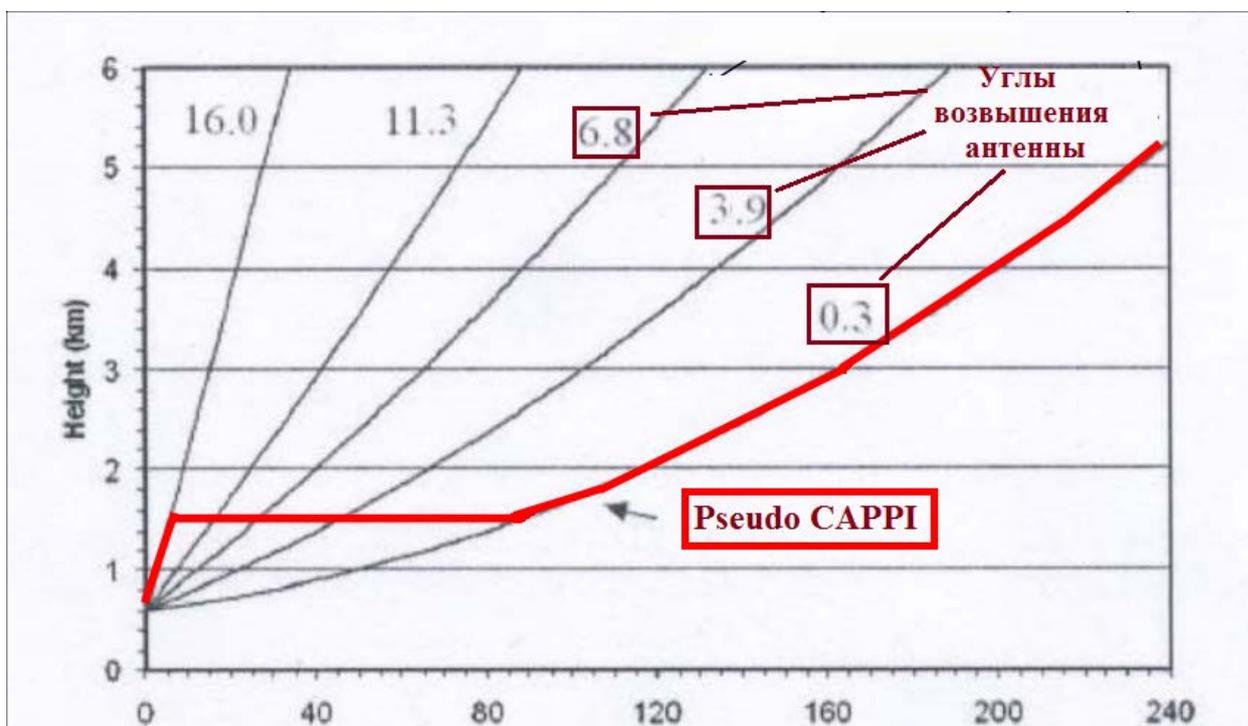


Рисунок 7.7 – Суть метода псевдо-SARPI

Данные «крайних» лучей усредняются по всей толщине слоя и приводятся к высоте SARPI, заданной пользователем.

7.5 Просмотр и анализ карт радиолокационной метеорологической информации в ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010»

7.5.1 Карта радиальных доплеровских скоростей

Несмотря на то, что радиолокационные наблюдения с помощью одиночного ДМРЛ-С имеют ограничения, связанные с невозможностью определения тангенциальной компоненты скорости гидрометеоров, карты распределения радиальной доплеровской скорости помогают обнаружить ряд опасных природных явлений, порождаемых интенсивными воздушными потоками. Такие явления, как фронты порывов, шквалы, нисходящие (восходящие) потоки, сопровождающие кучево-дождевую облачность, проявляются на карте в виде областей с большим значением радиальной скорости. Мезовихри могут быть идентифицированы по резкому скачку средней радиальной скорости, имеющему место в случае, когда поперечные размеры вихря превосходят размер элемента разрешения радиолокатора.

Внимание! На экране УВК ДМРЛ-С радиолокационную картину смерча можно увидеть только на рабочем месте оператора в режиме отображения PPI и в режиме сглаживания с горизонтальными размерами ячеек 1x1 км. При обнаружении вихревых движений с большими скоростями подобных смерчу, оператор незамедлительно должен поставить в известность синоптика, т.к. в режиме сглаживания с разрешением 4x4 км подобные максимальные скорости синоптик может принять за шумовые помехи, расположенные только в одной ячейке.

Просмотр карт радиальных доплеровских скоростей

на рабочем месте оператора и абонентского пункта УВК ДМРЛ-С

Карта пространственного распределения радиальных скоростей в радиусе обзора 125 км в ячейках с горизонтальными размерами 1x1, 2x2 и 4x4 км, а также в оригинальном виде (I) на карте PPI или CAPPI доступна в режиме просмотра «Доплер → Скорость».

В ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» карта радиальной доплеровской скорости строится таким образом, что положительным значениям направления ветра (на радар) соответствуют теплые тона используемой цветовой шкалы, а отрицательным значениям направления ветра (от радара) – холодные тона.

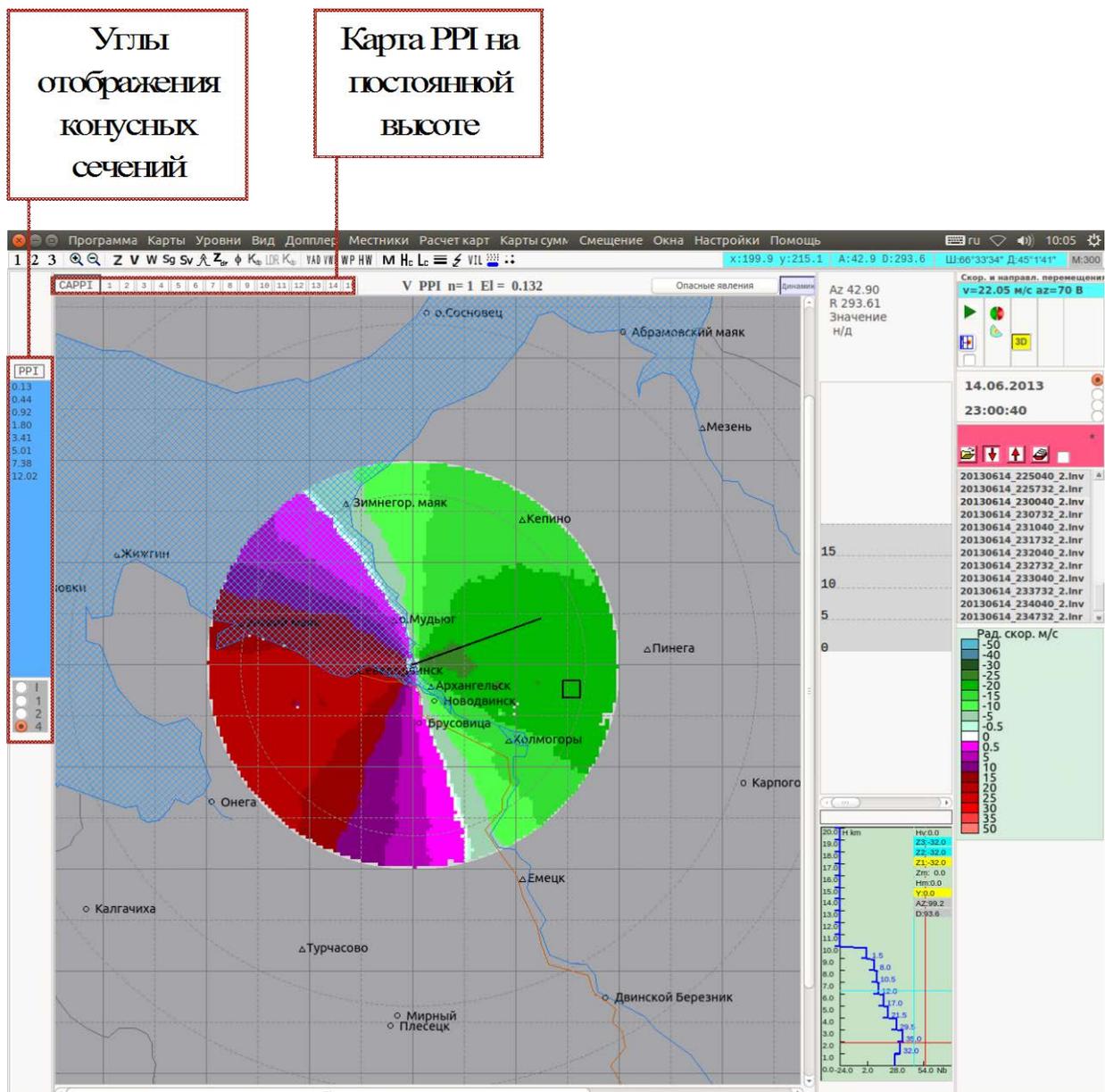


Рисунок 7.8 - Карта радиальных доплеровских скоростей на рабочем месте оператора

Интерпретация карт доплеровской скорости

Ниже представлены возможные интерпретации карт доплеровской скорости для моделируемых профилей ветра (скорости и направления). Такое пространственное распределение радиальной компоненты доплеровской скорости можно увидеть только в режиме просмотра полярных конических сечений (PPI) при малых углах возвышения антенны в исходном формате представления данных I.

- В первом примере (рис.7.9) направление ветра не меняется с высотой, но наблюдается увеличение скорости ветра от 0 м/с вдоль поверхности земли до 15 м/с на высоте 14000 метров. Что касается радиальной скорости, то можно заметить, что

максимум скорости, соответствующей движению по направлению к радару - западная точка диаграммы, а максимум скорости, соответствующей движению от радара, - восточная точка диаграммы, в то время как на севере и юге радар регистрирует нулевую радиальную скорость. Дело в том, что ветры оказываются перпендикулярными радиолокационному лучу, когда мы смотрим на север или юг.

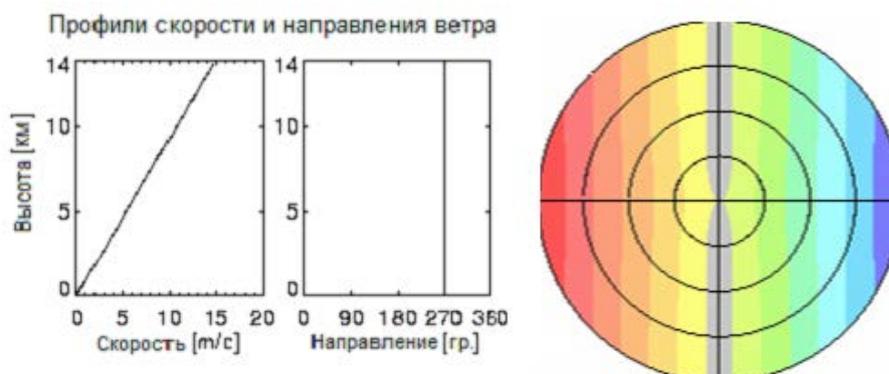


Рисунок 7.9 – Монотонное изменение скорости ветра с высотой при неизменном направлении по всей толщине слоя

Такое распределение скорости и направления в облаке свидетельствует о том, что во всем облачном слое наблюдается воздушный поток одного направления, а скорость потока равномерно увеличивается с высотой. Максимальные скорости наблюдаются в верхней части облака. Выше может располагаться ось струйного течения, которая срезает верхнюю границу облака. Характерно для южных периферий циклонов или северных периферий антициклонов.

- На втором примере (рис. 7.10) мы видим область ветра, направление которого изменяется с высотой, а скорость остается неизменной. Теперь линия, характеризующая нулевую радиальную скорость, изгибается так, чтобы она везде была перпендикулярна области ветра.

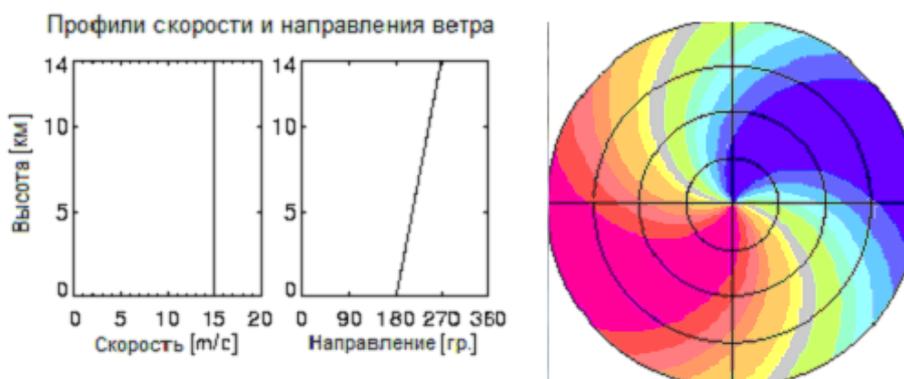


Рисунок 7.10 – Монотонное изменение направления ветра с высотой при неизменном значении радиальной скорости

Такое изменение направления с высотой, когда ветер постепенно (по всей толщине облака) поворачивает по часовой стрелке от южного у земли к западному в верхней части облака, при одинаковой скорости ветра, характерно для южных частей циклонов. Наблюдается при адвекции тепла во всем слое тропосферы и при прохождении барических ложбин и фронтальных разделов в пограничном слое (особенно теплых фронтов и фронтов окклюзии по типу теплого).

- На третьем примере (рис. 7.11), ветры усиливаются от 0 до 15 м/с между 0 и 7000 метрами, а затем скорость ветра снова уменьшается до 0 м/с на 14000 метрах. Направление ветра снова является постоянным. Максимум скорости приходится на уровень 7000 метров, что мы и наблюдаем на радиолокационном дисплее.

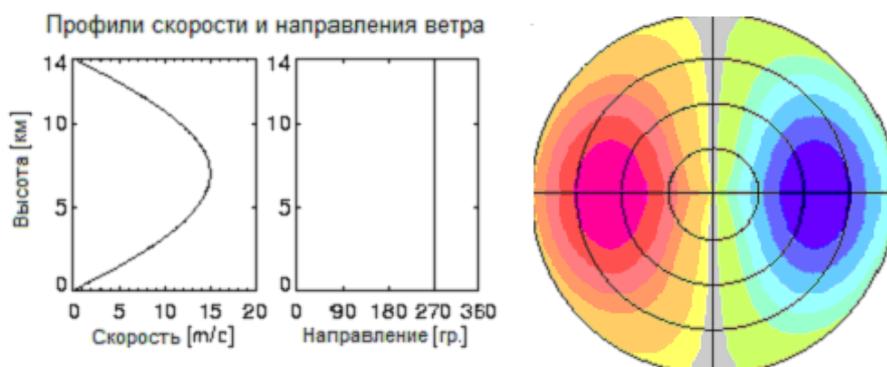


Рисунок 7.11 – Немонотонное изменение радиальной скорости ветра с высотой при неизменном направлении

Подобное распределение радиальных скоростей при одинаковом направлении по всему облачному слою указывает на наличие сильного сдвига ветра в слое 5-6 км и 8-9 км и о максимальной скорости воздушного потока в слое 6-8 км. В этом случае на высоте 6-8 км может наблюдаться ось струйного течения, скорость которого не так сильна, чтобы «срезать» верхушку облака и не дать ему развиваться выше. У земли и у вершины облака скорость воздушного потока ослабевает.

- В данном примере (рис. 7.12) при неизменной скорости направление ветра с высотой плавно изменяется на 90 градусов, а затем возвращается к исходному значению.

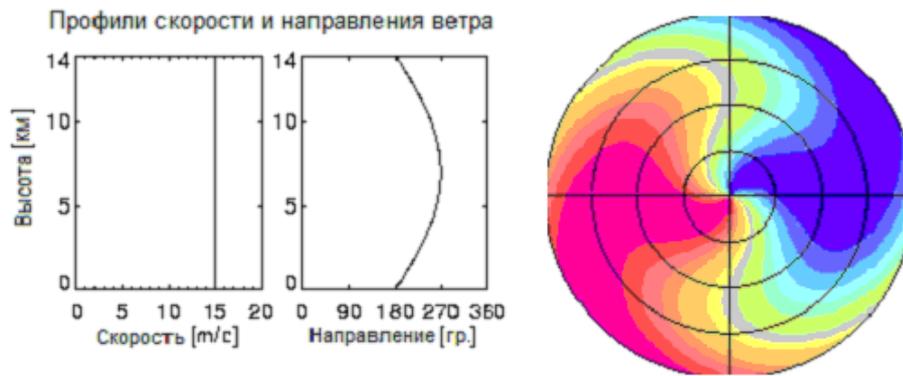


Рисунок 7.12 – Немонотонное изменение направления ветра с высотой при неизменном значении радиальной скорости

Такое распределение направления воздушного потока с высотой может свидетельствовать о том, что при общем устойчивом потоке южного направления в верхних слоях тропосферы в средней части (на высоте 5-7 км) наблюдается адвекция тепла и поворот ветра к западному. В приземном слое в это время в передней части ложбины перед приближением линии теплого фронта наблюдается еще сильный ветер южного направления.

- Пример (рис. 7.13) показывает резкое изменение направления ветра при плавном возрастании радиальной скорости с высотой от 0 м/с до 15 м/с.

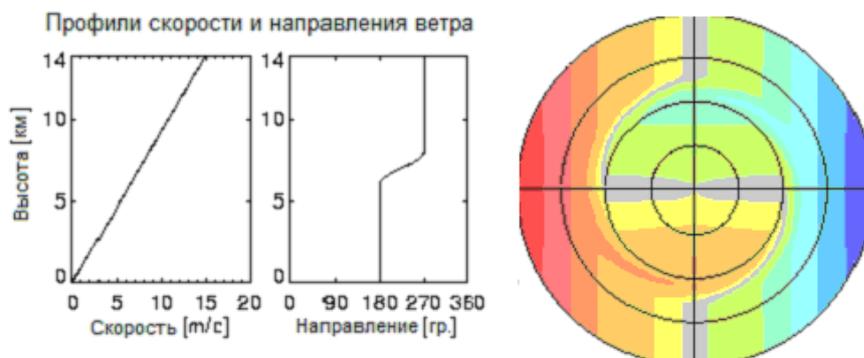


Рисунок 7.13 – Пример резкого изменения направления ветра с высотой при плавном возрастании радиальной скорости гидрометеоров

Данное распределение скорости и направления ветра с высотой, когда в средней части тропосферы ветер меняет свое направление по часовой стрелке и усиливается с высотой свидетельствует об адвекции тепла в средней и верхней тропосфере. В пограничном слое при слабых ветрах южных направлений погода определяется либо западной периферией антициклона, либо удаленной передней частью ложбины, т.к. скорость ветра у земли еще очень мала.

- В этом примере (рис. 7.14) направление и скорость ветра не меняется с высотой.

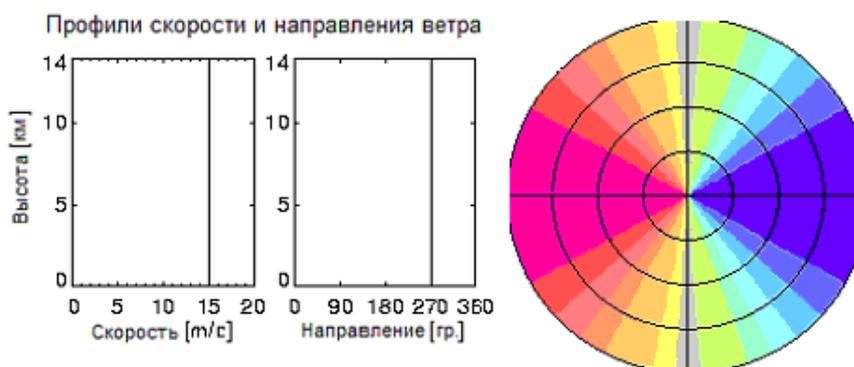


Рисунок 7.14 – Пример распределения радиальных скоростей гидрометеоров при неизменных профилях скорости и направления ветра

Устойчивый сильный поток западного направления во всей толще облака наблюдается, как правило, в южной части (в теплом секторе) циклона за теплым фронтом.

Более детальное изучение явлений, наблюдаемых при больших значениях радиальной скорости, а также резком ее изменении, возможно с привлечением данных о ширине спектра ансамбля гидрометеоров, сдвиге ветра, турбулентности.

7.5.2 Карты распределения радиальной составляющей ветра в атмосфере

Наиболее полное использование доплеровской информации возможно только в том случае, когда с ее помощью однозначным образом удастся определить скорость и направление перемещения облачных образований, т.е. средний вектор скорости ветра U в зоне ответственности радиолокатора. Известно, что в системах некогерентных МРЛ в основу метода оценки U заложено сопоставление карт отражаемостей двух последовательно выполненных обзоров. Погрешность метода зависит от тенденции и скорости развития облаков; метод чаще всего не применяется, если временной интервал между обзорами превышает 10 минут. Как следствие, при переходе в штормовой режим работы (учащенного проведения обзоров) получить информацию об U можно только по окончанию второго обзора, при этом теряется оперативность построения штормового прогноза, для которого в первую очередь необходима информация о перемещении облачных образований.

ДМРЛ-С лишен этого недостатка, т.к. скорость и направление перемещения на основании доплеровской информации могут быть в большинстве случаев вычислены сразу же по окончанию обзора, проведенного в режиме «Скорость», т.е. с вобуляцией

зондирующего импульса (см. п.2.2). Однако метод, основанный на доплеровской информации, нельзя назвать универсальным, дающим правильные результаты расчета U в любой синоптической ситуации. Главным ограничением метода является отсутствие информации о тангенциальной компоненте скорости ветра (компоненте, перпендикулярной радиус-вектору r , проведенному к данной точке пространства из точки расположения радиолокатора). Кроме того, расчет U должен выполняться в автоматическом режиме без участия оператора, который мог бы при наличии квалификации «помочь программе», например, выделить зоны облачности, наиболее подходящие для расчета U , приводящие к более устойчивым результатам расчета. Указанные требования приводят к необходимости разработки нетривиальных методов анализа, которые на основании информации о распределении в пространстве радиальной составляющей скорости движения облачных образований давали бы устойчивые результаты в разных синоптических ситуациях, при различных формах облаков и их количества в радиусе обзора.

Методы анализа пространственного распределения радиальной составляющей доплеровской скорости позволяют строить карты различного профиля (в координатах скорость – азимут, скорость/направление – высота и т.д.).

Доплеровские параметры обзора

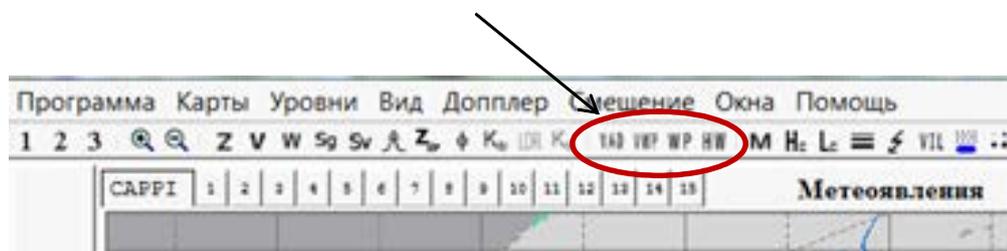


Рисунок 7.15 – Расположение кнопок доплеровских параметров обзора на инструментальной панели

- - дисплей азимутальной скорости;
- - вертикальный профиль ветра;
- - профиль ветра;
- - горизонтальный ветер.

VAD, VWP и WP выводятся на рабочий стол в отдельных окнах.

7.5.2.1 VAD (velocity-azimuth-display) - индикатор «скорость – азимут»

Одним из наиболее известных и хорошо проработанных методов расчета U по данным одного доплеровского радиолокатора является метод конического сечения, с помощью которого можно получить вертикальный профиль U . В зарубежной литературе метод получил название VAD (*velocity-azimuth-display*) - индикатор скорость - азимут. Идея метода состоит в том, что в предположении неизменности скорости и направления ветра (или линейного изменения составляющих ветра) в любом горизонтальном сечении, охваченном образующими наклонного конического сечения, зависимость радиальной скорости от азимута будет описываться синусоидой, параметры которой связаны с модулем и направлением ветра.

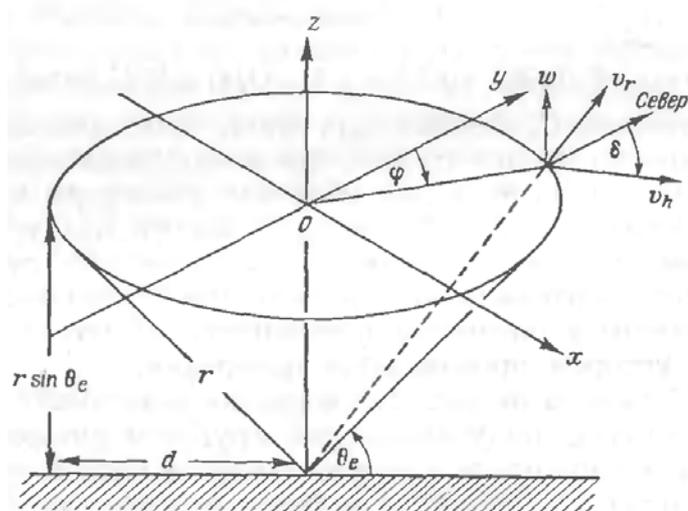


Рисунок 7.16 – Геометрия измерения скорости при круговом сканировании.

Радиальная компонента скорости ветра v_r , измеряемая при круговом вращении антенны, зависит от φ следующим образом:

$$v_r = w \cdot \sin\theta_e + v_h \sin\theta_e \cos(\delta - \varphi) \quad (7.1)$$

где $D = \delta + \pi$ — направление откуда дует ветер, а w и v_h соответственно вертикальная и горизонтальная компоненты скорости ветра. Преобразуя второй член выражения и используя соотношения, связывающие компоненты скорости в декартовой и полярной системах координат, приведем (7.2) к следующему виду:

$$v_r = w \cdot \sin\theta_e + u_0 \sin\varphi \cdot \cos\theta_e + v_0 \cos\varphi \cdot \cos\theta_e \quad (7.2)$$

При ряде очень строгих допущений вычисляются горизонтальные составляющие скорости ветра u_0 и v_0 , а также его абсолютная величина v_h и направление D :

$$u_0 = b_1 / \cos\theta_B, \quad v_0 = a_1 / \cos\theta_B$$

$$v_h = (u_0^2 + v_0^2)^{1/2} = (a_1^2 + b_1^2)^{1/2} \cos\theta_e$$

$$D = \arctg\left(\frac{b_1}{a_1}\right) - \pi$$

Для определения коэффициентов a_1 и b_1 выполняются операции с исходным массивом данных для каждого круга, т.е. для каждой фиксированной высоты H , определяют первые три коэффициента ряда Фурье:

$$v_r = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\theta_e) + b_n \sin(n\theta_e))$$

$$a_0 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{v}_{ri}; \quad a_1 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{v}_{ri} \cos\varphi; \quad b_1 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{v}_{ri} \sin\varphi$$

где $N = 360$ - число отсчетов по азимуту.

Если это вычисление будет выполнено для неподвижного угла места и нескольких расстояний от радара, то мы получим вертикальный профиль скорости ветра и профиль направления ветра.

При обработке реальных данных точность расчета U указанным методом будет зависеть от нескольких факторов. К ним относятся погрешность измерения доплеровской скорости, отсутствие отраженного сигнала на некоторых углах азимута и другие. Также неправильные оценки U могут быть сделаны из-за нарушения допущений, принятых при выводе формул, например, случаи с ненулевой дивергенцией ветра. Поэтому для получения более устойчивых оценок U в ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» выполняется расчет средних значений $\langle v_h \rangle$ и $\langle D \rangle$ по нескольким массивам данных, попадающим в заданный диапазон высот $H \pm \Delta H$. Таким образом, получается средняя оценка $\langle U \rangle$ для слоя H .

Для того чтобы оценить, насколько исходные данные – распределение радиальной компоненты скорости – удовлетворяют требованиям метода конического сечения, в ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» при нажатии на кнопку  может быть вызвано модальное окно, отображающее зависимость распределения $v_r(\varphi)$ (окно VAD) (рис.7.17). В этом окне оператор может вывести на график распределение $v_r(\varphi)$ для разных значений угла места (конических сечений) и значений дальности. Для каждого распределения под графиком выводится формула, описывающая рассчитанную методом VAD зависимость $v_r(\varphi)$, наилучшим образом аппроксимирующую данные измерений синусоидальной кривой.

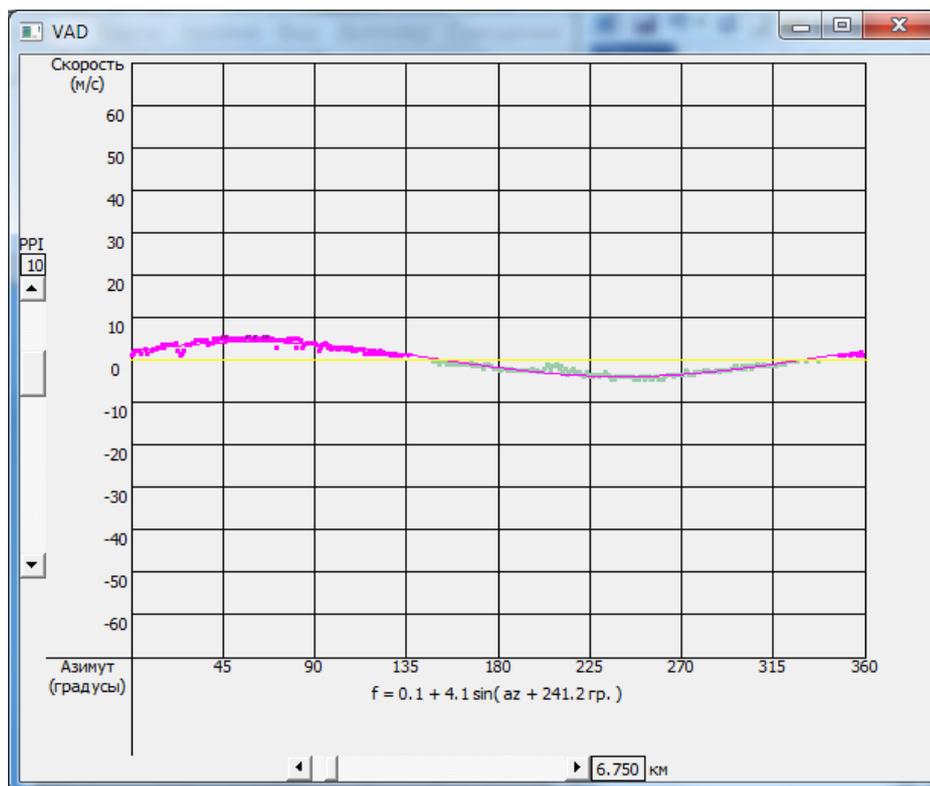


Рисунок 7.17 - Зависимость распределения $v_r(\varphi)$ (окно VAD)

Использовать окно VAD целесообразно в тех случаях, когда есть сомнения в правильности определения программой значений скорости и направления ветра по данным доплеровских измерений, и требуется оценить, насколько на полученный результат могло оказать влияние расхождение между требованиями метода и реальным распределением U .

Для этого оператор, задавая несколько комбинаций угла места и дальности (с помощью, соответственно, левого и нижнего бегунка в окне VAD), строит на графике линии распределения $v_r(\varphi)$. Если большинство линий, соответствующих некоторому диапазону высот $H \pm \Delta H$, по форме близки к синусоидальной, а коэффициенты в формуле аппроксимации существенно не меняются при переходе от одной линии к другой, можно считать исходный массив данных v_r удовлетворяющим требованиям метода VAD, а полученные оценки U устойчивыми.

7.5.2.2 Вертикальный профиль ветра VWP

Вертикальный профиль ветра VWP в точке местонахождения ДМРЛ-С показывает распределение скорости и направления ветра с высотой в следующем виде:

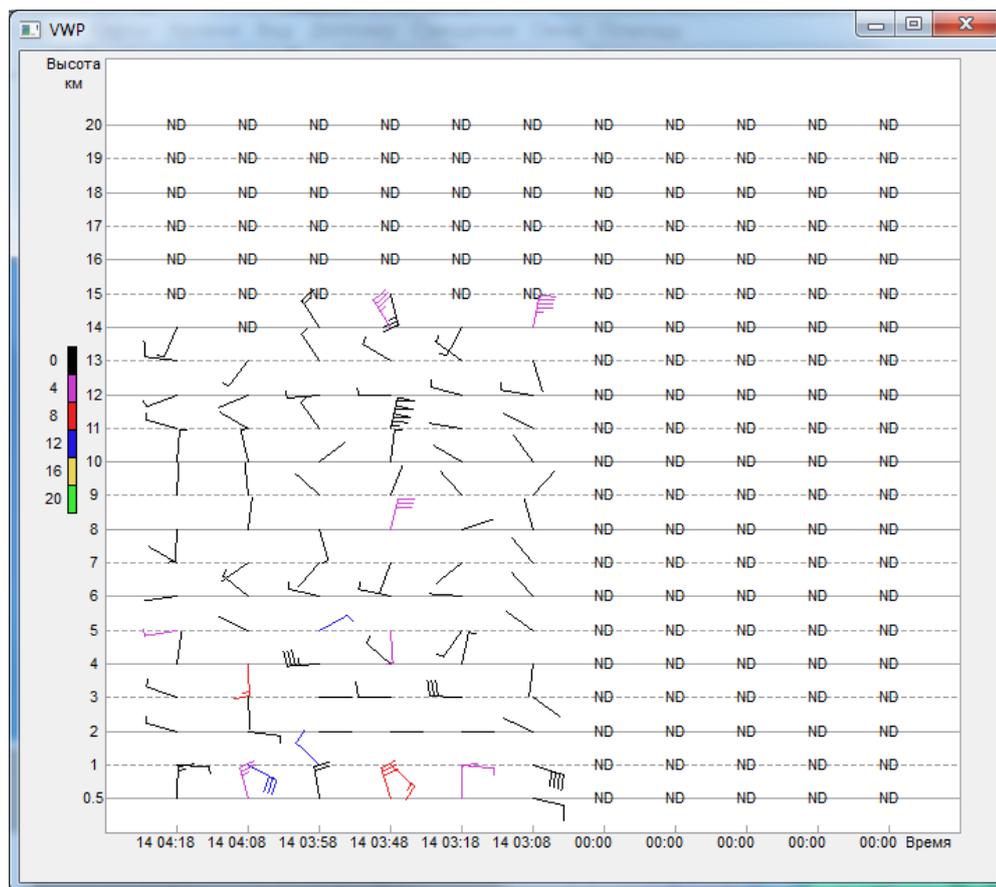


Рисунок 7.18 – Вертикальный профиль ветра

При переходе от срока к сроку можно посмотреть изменение скорости и направления ветра над ДМРЛ-С по вертикали. Для этого нужно закрыть окно просмотра VWP, выбрать следующий срок с расширением «.Inv», затем вновь открыть окно просмотра VWP. На экране появится распределение ветра с высотой за оба срока и т.д.

7.5.2.3 Профиль ветра радиальной скорости WP

Профиль ветра радиальной скорости WP по вертикали над местом расположения ДМРЛ-С представлен в виде двух графиков:

- Скорость - синим цветом
- Направление – желтым.

нижняя горизонтальная шкала – шкала скорости в м/с;

верхняя горизонтальная шкала – направление в градусах;

вертикальная шкала – высота в км;

Информация меняется только от срока к сроку.

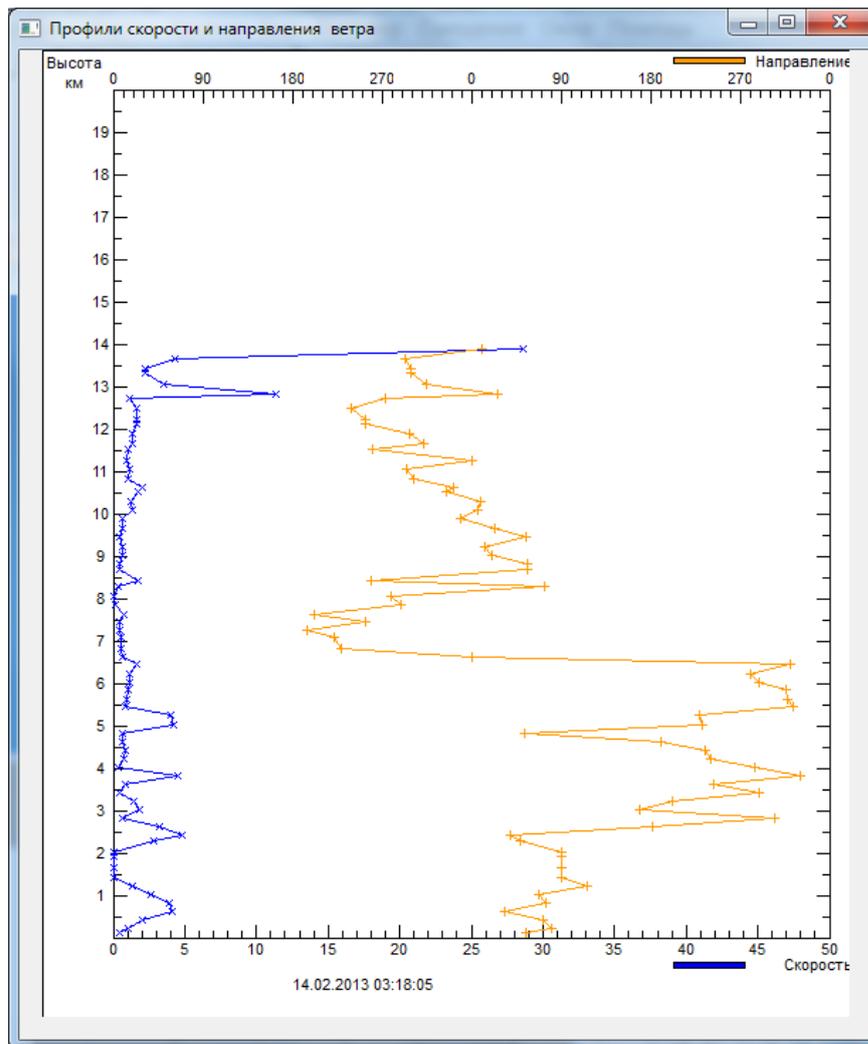


Рисунок 7.19 – Профиль ветра радиальной скорости

Горизонтальный ветер NW может быть выведен на любой карте отражаемости, высоты верхней и нижней границы облачности, картах интенсивности осадков и видимости в осадках и на всех картах доплеровских скоростей, кроме карты метеоявлений и опасных явлений. При этом распределение ветра соответствует высоте представления данной информации.

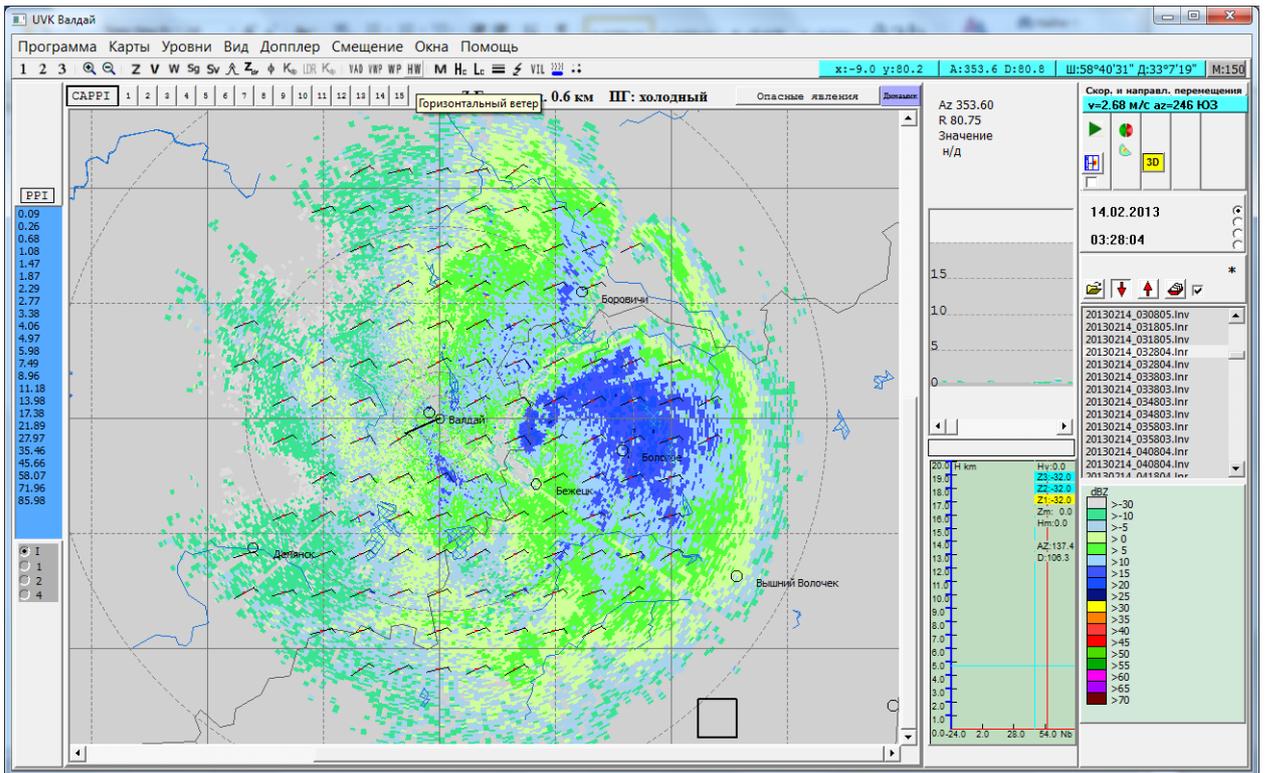


Рисунок 7.20 – Горизонтальный ветер на карте отражаемости на высоте 0,6 км

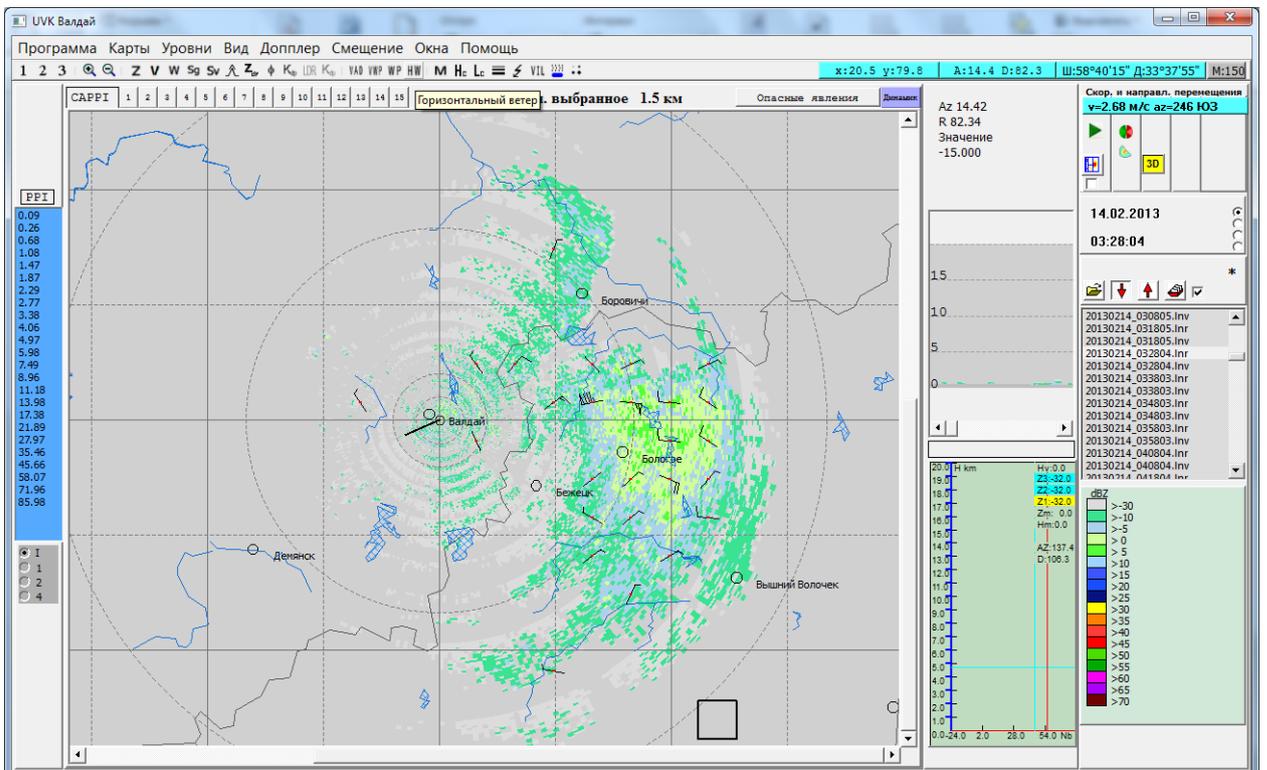


Рисунок 7.21 – Горизонтальный ветер на карте отражаемости на высоте 1,5 км

На картах видимости (Рис. 7.22) в осадках и интенсивности осадков (Рис. 7.23) представлен горизонтальный ветер, соответствующий высоте 0,6 км.

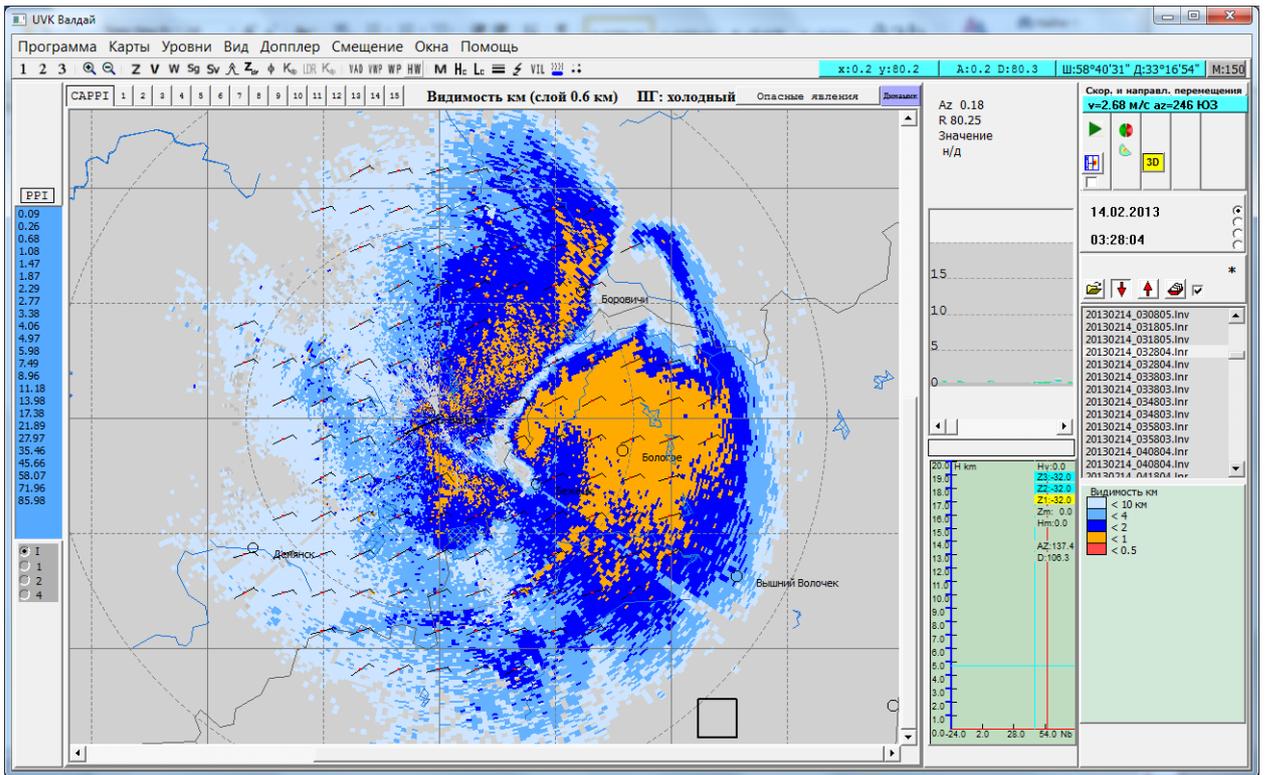


Рисунок 7.22 – Горизонтальный ветер на карте видимости в осадках (высота 0,6 км)

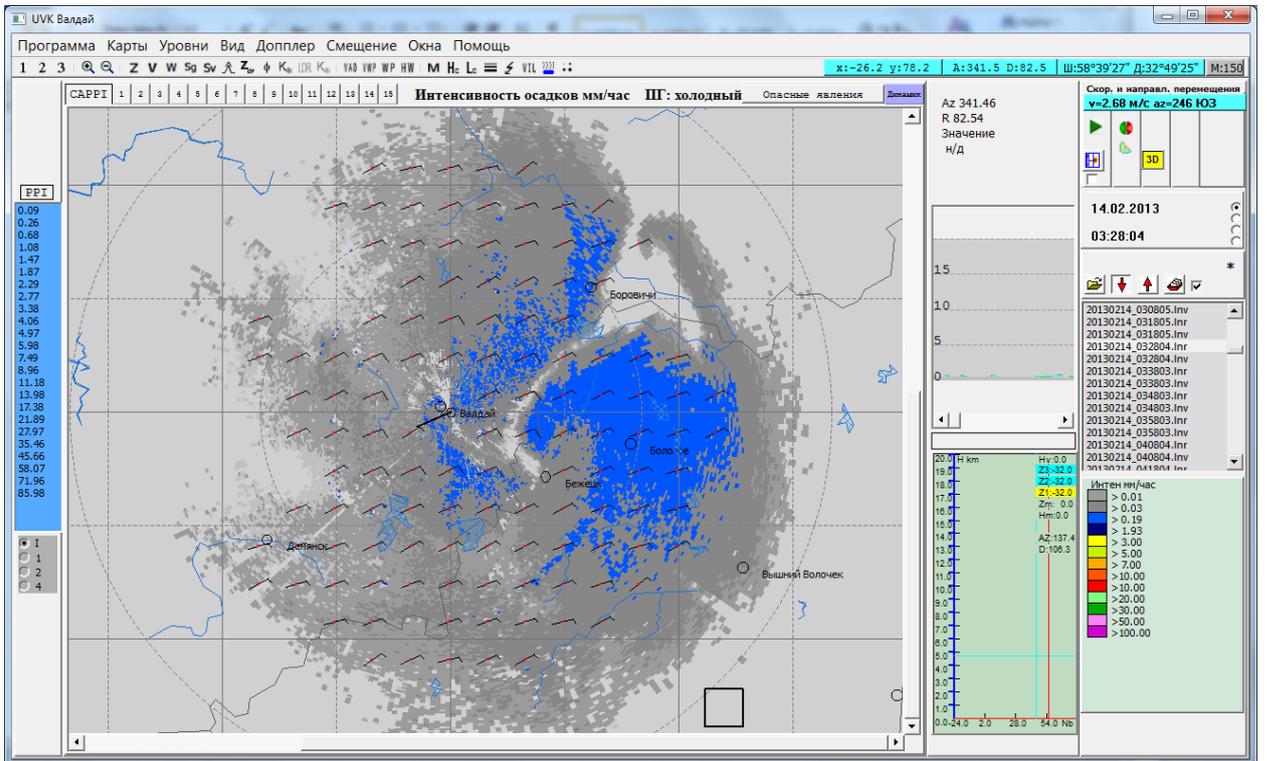


Рисунок 7.23 – Горизонтальный ветер на карте интенсивности осадков (высота 0,6 км)

На карте нижней границы облачности (Рис.7.24) представлен ветер, соответствующий высоте нижней границы (в данном случае это 300 м).

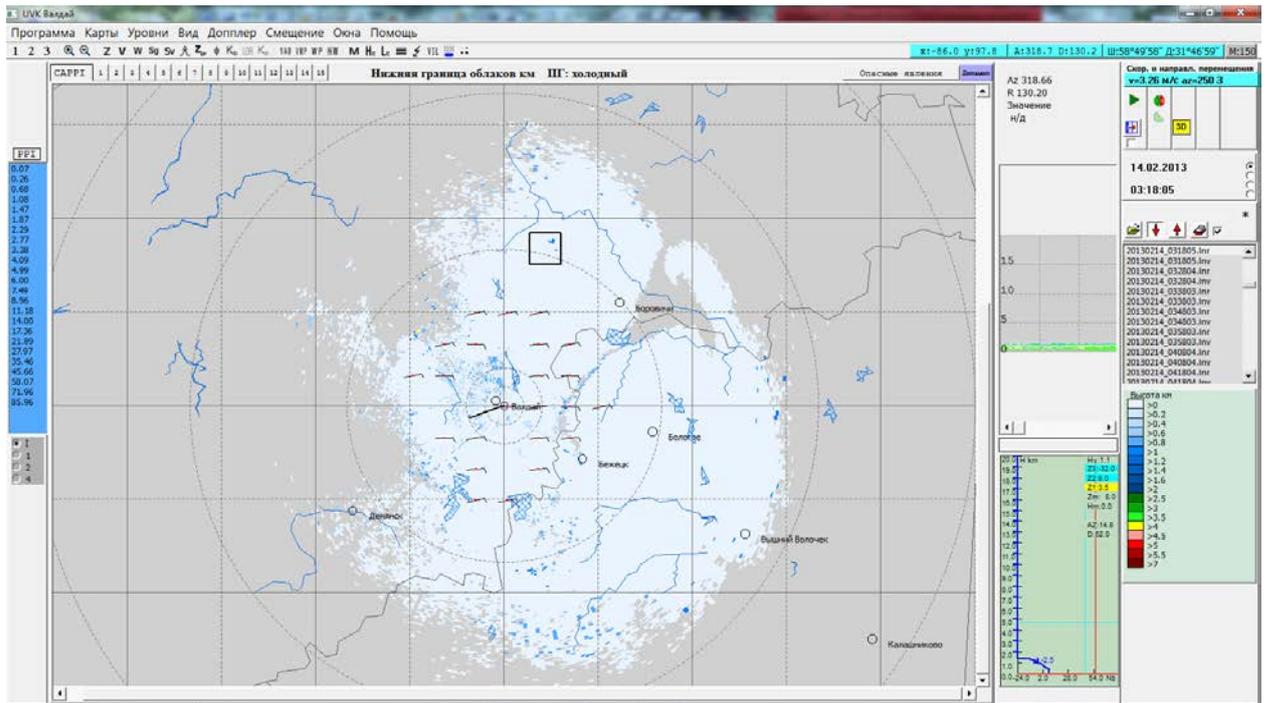


Рисунок 7.24 – Горизонтальный ветер на карте нижней границы облачности

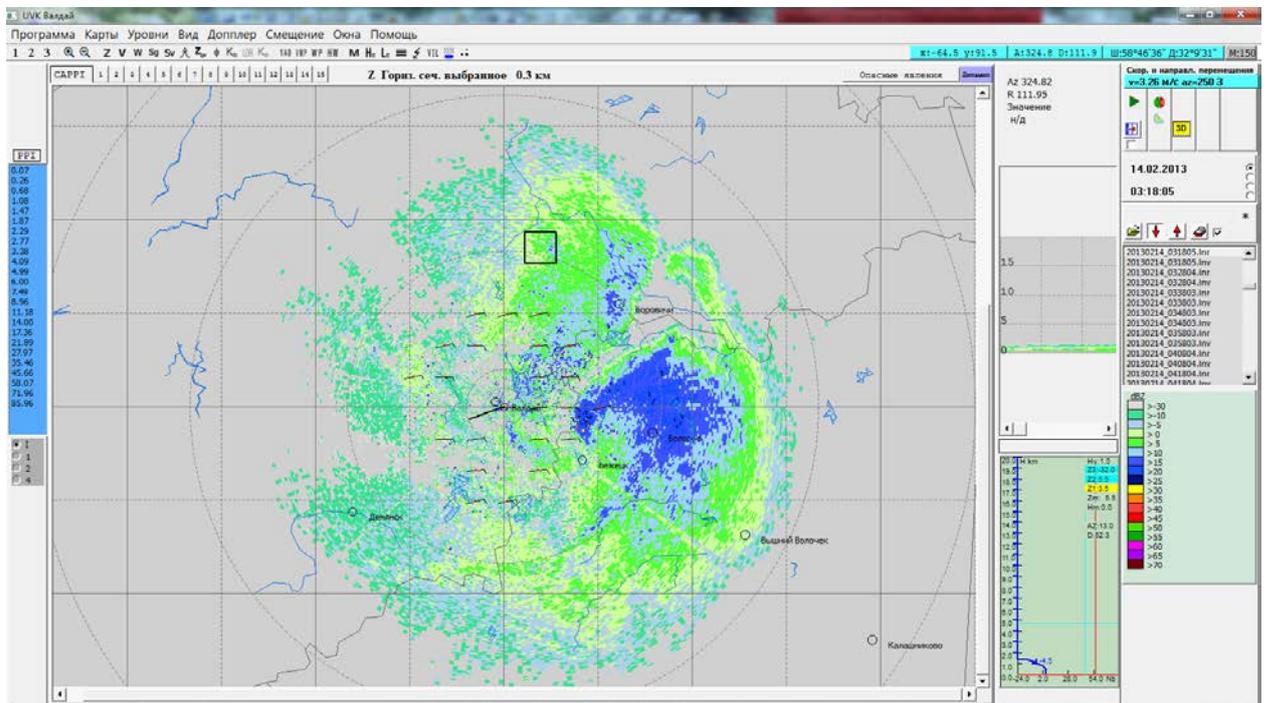


Рисунок 7.25 – Горизонтальный ветер на карте отражаемости на высоте 300 м:

На карте верхней границы облачности (Рис.7.26) ветер представлен на высотах, соответствующих высотам верхней границы радиоэха.

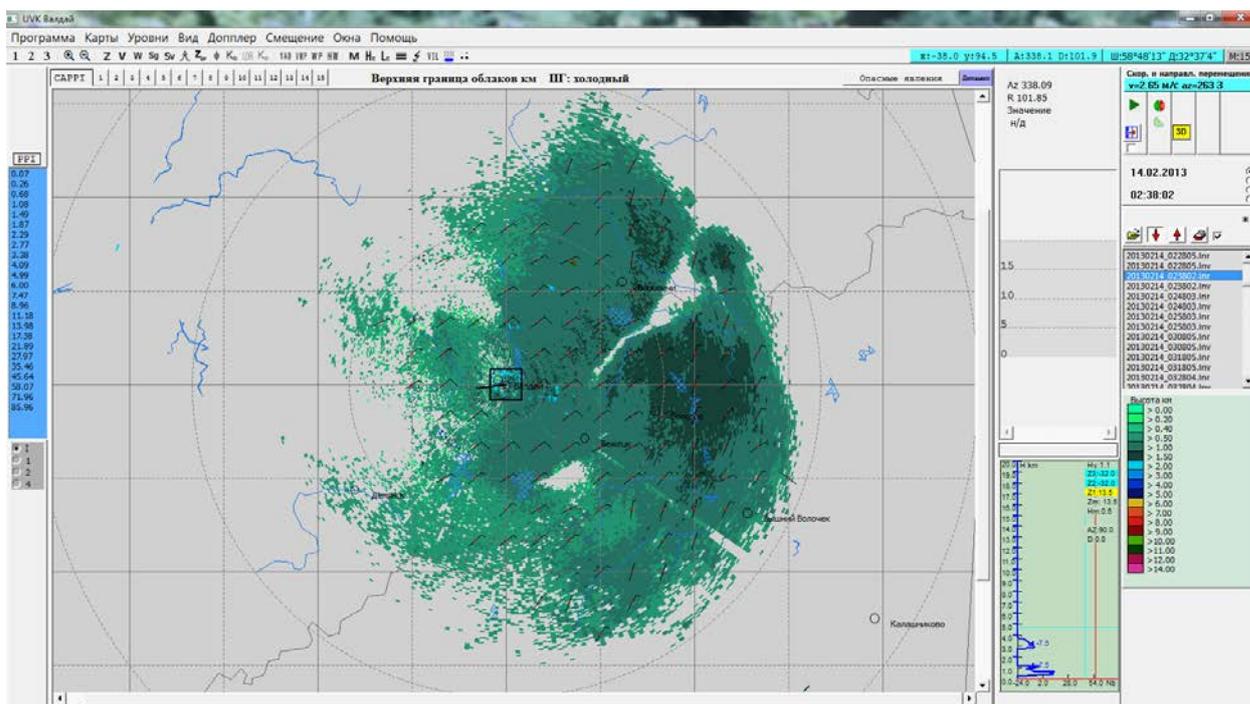


Рисунок 7.26 – Горизонтальный ветер на карте верхней границы облачности

Но для большей достоверности лучше сначала вывести на главное окно рабочего стола отражаемость необходимого уровня и нажать кнопку HW. Затем карту отражаемости можно заменить любой другой расчетной картой, данные которой соответствуют высоте карты отражаемости и нанести на нее горизонтальный ветер (нажав HW), соответствующей данной высоте.

7.5.3 Карта вертикального и горизонтального сдвига ветра

На рабочем месте оператора ДМРЛ-С можно увидеть вертикальный и горизонтальный сдвиг ветра в режиме просмотра «Доплер→ Вертикальный (Горизонтальный) сдвиг ветра» в оригинальном виде (I) так и в осредненном по ячейкам с горизонтальными размерами 1x1, 2x2 и 4x4 км на карте PPI или SARPI (Рис.7.27). При проведении левой кнопкой мыши линии разреза сквозь радиоэхо в Главном окне появляется дополнительное модальное окно вертикального сечения по всей высоте облака.

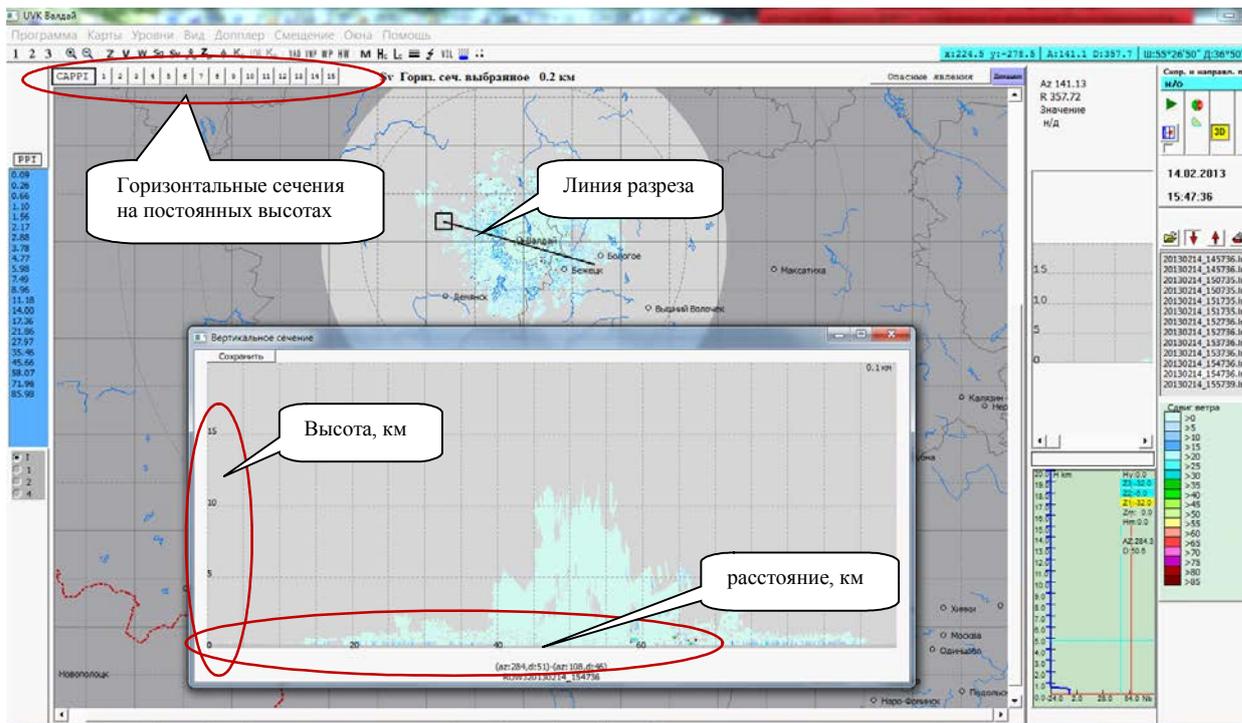


Рисунок 7.27 –Просмотр карты вертикального сдвига ветра на рабочем месте оператора УВК ДМРЛ-С

По вертикальной оси указана высота в км, по горизонтальной оси – расстояние (в км) от начальной до конечной точки линии разреза по горизонтали. При увеличении масштаба окна вертикального сечения (потянуть мышкой нижний правый угол окна) можно увидеть каждый сегмент карты сдвига ветра в цвете, соответствующем величине сдвига с разрешением по высоте -100 м, а по горизонтали – 250 м.

На рабочем месте абонентского пункта вся информация представлена только в квадратах с разрешением 4x4 км (Рис.7.28). При просмотре вертикального сечения по линии разреза сегмент рассчитанной скорости сдвига ветра на карте будет иметь размеры 4 км x 100 м.

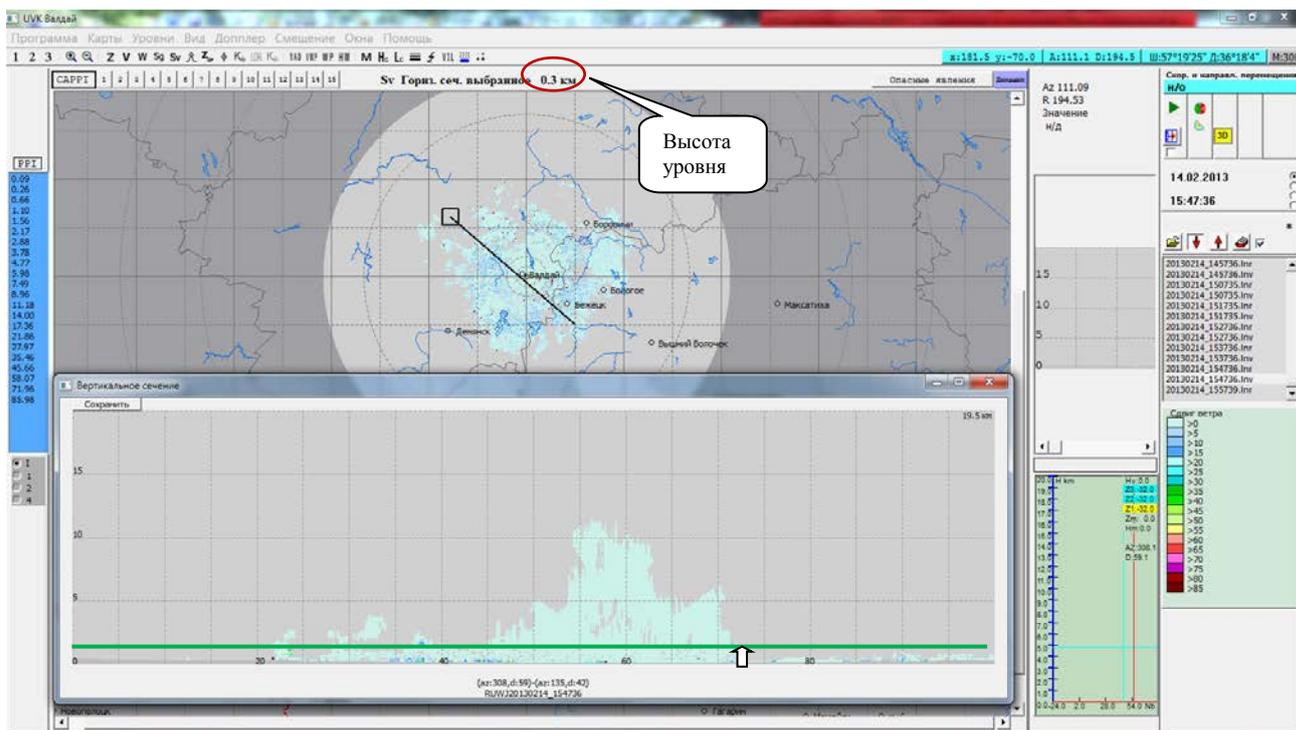


Рисунок 7.28 – Просмотр карты вертикального сдвига ветра на абонентском пункте УВК ДМРЛ-С

Минимальная высота просмотра рассчитанного сдвига ветра на экранах кругового обзора обоих рабочих мест соответствует высоте установки ДМРЛ-С над уровнем моря. Следующий возможный уровень просмотра и дальнейший дискрет представления данных о сдвиге ветра - 100 м.

Для просмотра в Главном окне программы карты сдвига ветра *на заданной высоте* необходимо внутри активного модального окна «Вертикальное сечение» левой кнопкой установить зеленую линию на необходимой высоте. Установленная высота фиксируется на карте кругового обзора и на экране появляется информация о сдвиге ветра, соответствующая выбранному уровню. Возможность таких действий предусмотрена на всех рабочих местах.

При анализе данных необходимо учесть, что расчет величины сдвига ветра по цветовой шкале произведен в пересчете на 30 м высоты (для вертикального) и 600 м ширины (для горизонтального), но тонируется этим цветом сегмент высотой 100 м и шириной от 250 м до 4 км.

Ограничения метода определения сдвига ветра по данным ДМРЛ -С

Погрешность измерения доплеровской скорости с помощью ДМРЛ-С равна 1 м/с, соответственно, погрешность расчета сдвига ветра будет составлять 2 м/с, т.е. будет превышать допустимый уровень погрешности, установленный требованиями ИКАО. Для

увеличения точности определения сдвига ветра в ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» реализован алгоритм пространственного усреднения значений сдвига ветра по нескольким соседним точкам. Приведем краткое описание алгоритма расчета.

На рисунке 7.29 представлена схема расчета сдвига ветра для точки m .

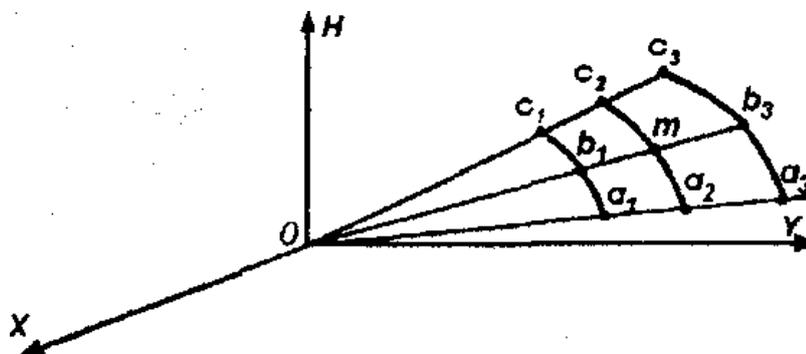


Рисунок 7.29 – Схема расчета сдвига ветра для точки m находящейся внутри импульсного объема ДМРЛ-С

Рассчитывается вертикальный и горизонтальный сдвиг ветра на трех соседних лучах с центральным, проходящим через точку m . Вычисляются горизонтальные сдвиги ветра для дуг a_1b_1 , b_1c_1 , a_2m , mc_2 , a_3b_3 , b_3c_3 (шесть величин) и вертикальные сдвиги ветра на интервалах a_1a_2 , a_2a_3 , b_1m , mb_3 , c_1c_2 , c_2c_3 , (шесть величин). Таких значений будет девять по числу точек в узлах сетки вокруг точки m . Величина сдвига ветра S_m для точки m определяется средним арифметическим по узлам сетки. Среднеквадратическое отклонение оценки составит $2/\sqrt{9} = 0,7$ м/с.

Таким образом, точность оценки сдвига ветра достигается за счет уменьшения пространственного разрешения этой величины.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что расчет сдвига ветра в ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» осуществляется на этапе вторичной обработки информации о доплеровской скорости, точнее, доплеровского сдвига частоты сигнала, рассеянного гидрометеорами. Таким образом, сдвиг ветра в заданной точке пространства, в том числе, в зоне ВПП у поверхности земли, может быть обнаружен ДМРЛ-С только при наличии гидрометеоров (выпадающих твердых и жидких осадков, метели), или же частичек пыли, поднимаемых в воздух ветровыми порывами и шквалами.

Наряду с ограниченностью метеорологических ситуаций, в которых сдвиг ветра может быть обнаружен, имеется несколько источников ошибок определения сдвига ветра доплеровским методом на основании радиолокационных измерений, а именно:

- флуктуация средней доплеровской скорости, вызванная статистической природой эхосигналов от облаков и осадков;

- неоднородность величины доплеровской скорости внутри разрешающего объема;
- неточность в определении положения объема разрешения;
- нестационарность процессов в облаке в течение времени получения данных.

Указанные источники могут быть причиной возникновения дополнительной погрешности измерений сдвига ветра, причем оценить пределы этой погрешности в общем случае нельзя.

В результате всех названных ограничений, сдвиг ветра по данным ДМРЛ-С следует рассматривать как индикаторную величину, дающую качественную оценку степени опасности полета.

Задачей на начальный период эксплуатации радиолокатора является проведение количественных оценок погрешности определения сдвига ветра. В тех случаях, когда это возможно, оценка погрешности радиолокационных измерений горизонтального сдвига ветра производится путем сопоставления данных ДМРЛ-С с результатами одновременного измерения ветра в различных точках аэродрома (у разных торцов ВПП, на метеоплощадке и в других точках, где установлены датчики ветра). Кроме того, для определения точности измерения сдвига ветра на больших высотах следует привлекать данные различных источников, таких как шаропилотные измерения, аэрологическая информация и сообщения бортовых метеостанций воздушных судов, выполняющих регулярные рейсы.

При обнаружении на карте сдвига ветра в приближающемся к аэродрому облаке, опасные величины по цветовой шкале, синоптик должен тщательно проанализировать синоптическую ситуацию, данные аэрологического зондирования атмосферы и данные приборов определения скорости и направления ветра в районе ВПП для определения истинного значения сдвига ветра над территорией данного аэродрома.

7.5.4 Карта ширины доплеровского спектра

Упорядоченное движение атмосферных образований как системы отражателей определяет средний доплеровский сдвиг частоты, а движение отдельных отражателей друг относительно друга влияет на ширину спектра доплеровских частот.

Как было сказано в п.2.3.3 наличие относительного движения рассеивателей в радиальном направлении приводит к уширению спектра. Так, например, турбулентность является причиной хаотического относительного движения капель. Сдвиг ветра также может обуславливать изменения относительного положения целей по дальности, так как приводит к дифференциации совокупности частиц различных размеров в зависимости от

их скорости падения. Таким образом, имеются два основных механизма уширения спектра, связанных с метеорологическими явлениями – это сдвиг ветра и турбулентность. Поскольку эти механизмы уширения спектра не зависят друг от друга, квадрат ширины суммарного спектра равен сумме величин σ^2 , обусловленных каждым из них [4].

На рисунке 7.30 обозначены области больших значений ширины спектра, обусловленные турбулентностью:

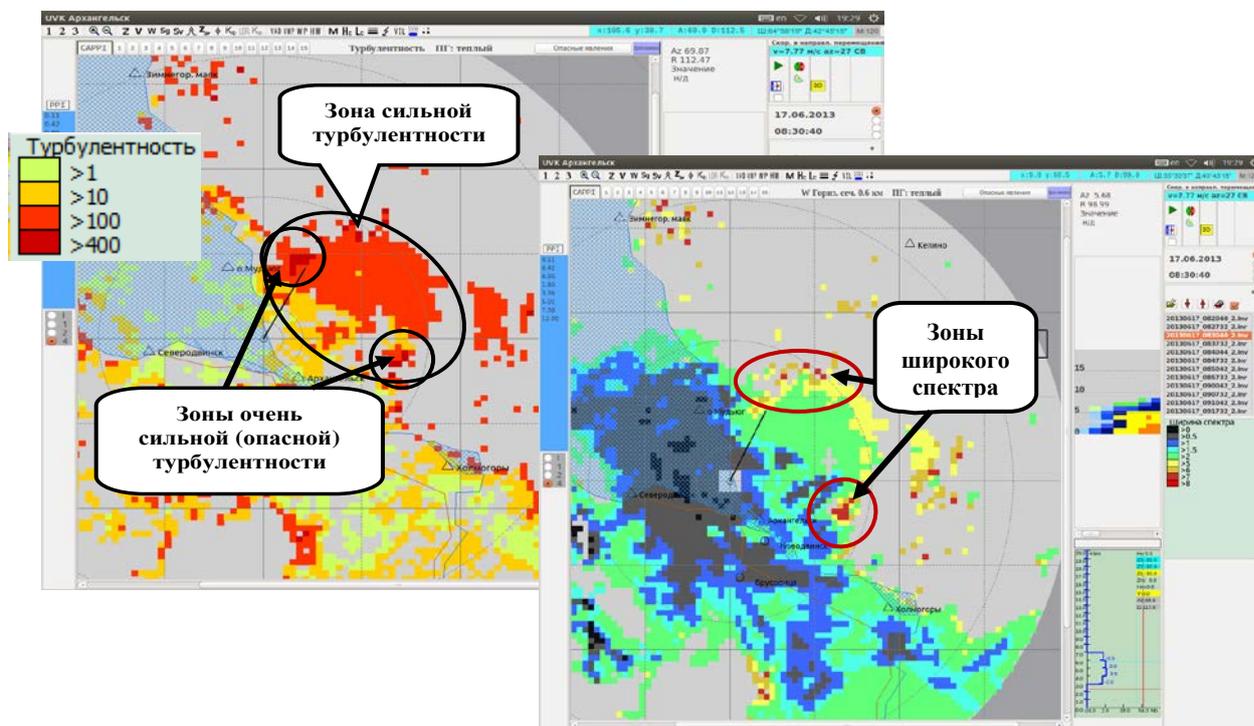


Рисунок 7.30 – Карта зон сильной турбулентности и соответствующей ширины доплеровского спектра

*Просмотр карт ширины доплеровского спектра
на рабочем месте оператора УВК ДМРЛ-С и абонентского пункта*

Карта ширины доплеровского спектра в радиусе обзора 125 км доступна в режиме просмотра «Доплер → Ширина спектра». На рабочем месте оператора информация представлена в ячейках с горизонтальными размерами 1x1, 2x2 и 4x4 км, а также в оригинальном виде (I) на карте PPI или CAPPI. Схема построения вертикального разреза, а также операции по выбору высоты горизонтального сечения (с дискретом представления 100 м) аналогичны описанным в п.7.5.3 для сдвига ветра.

7.5.5 Карты дифференциальной отражаемости, дифференциальной фазы и модуля коэффициента кросскорреляции

На рисунке 7.31 представлена карта дифференциальной отражаемости (Z_{DR}). Значения порядка 0,5-1,5 дБ (области желтого цвета) свидетельствуют о наличии в зоне обзора слабого или умеренного дождя. Высокие значения дифференциальной отражаемости более 1,5 и до 3 дБ (области красного цвета) позволяют идентифицировать зоны сильного дождя и ливня. Зона, обозначенная фиолетовым цветом, является зоной неустойчивого измерения радиолокационной отражаемости, об этом свидетельствуют очень большие значения Z_{DR} .

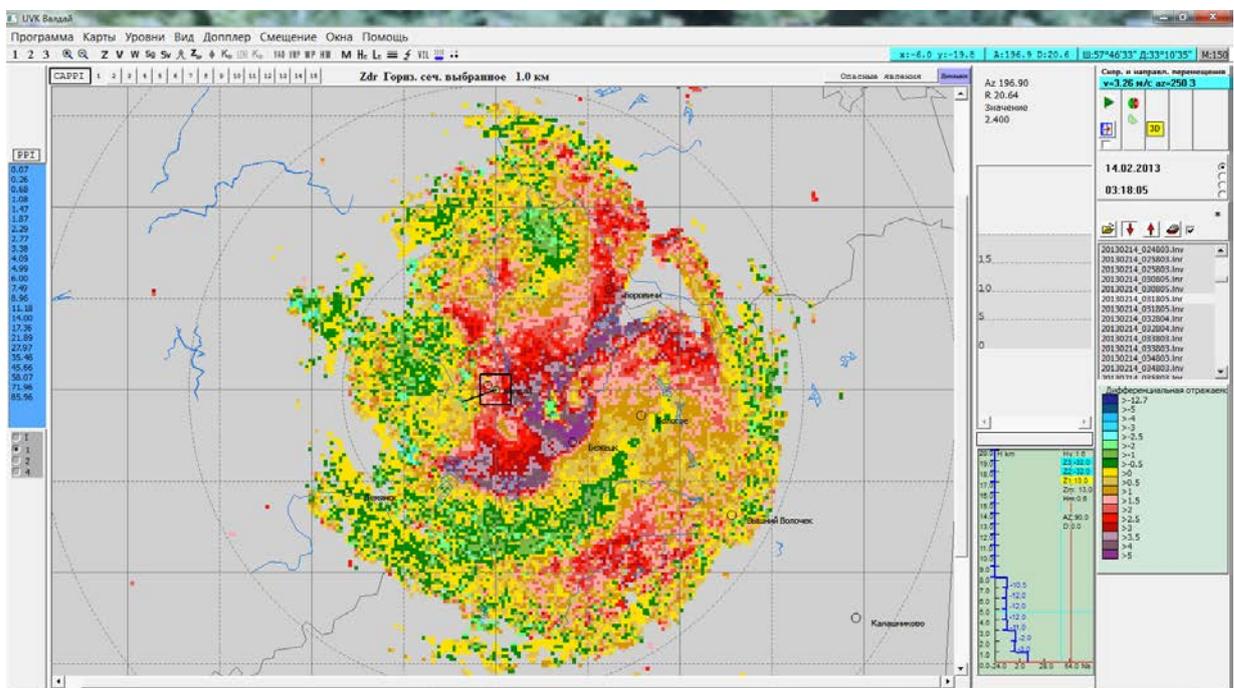


Рисунок 7.31 – Карта дифференциальной отражаемости

Большие значения дифференциальной фазы (зеленая заливка) на карте, изображенной на рисунке 7.32, соответствует зоне выпадения осадков в виде дождя.

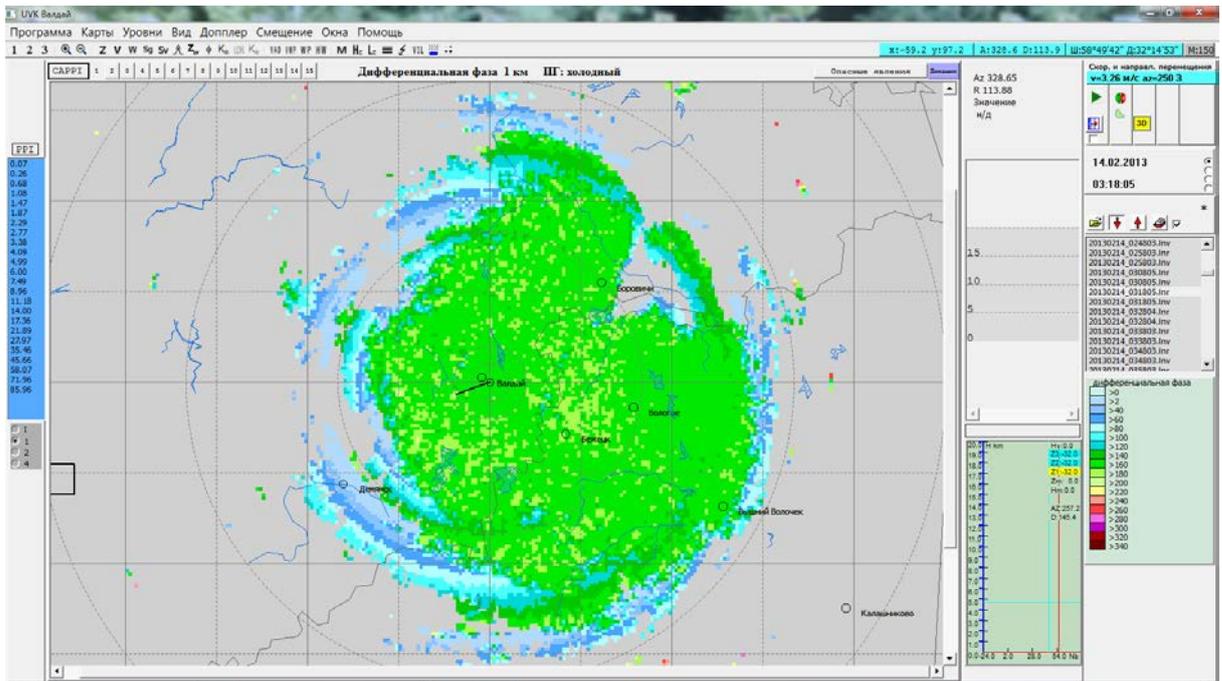


Рисунок 7.32 – Карта дифференциальной отражаемости

На рисунке 7.33 изображена карта значений модуля коэффициента кросскорреляции. Области, закрашенные зеленым и голубым (значения 0,9-1), являются зонами выпадения жидких осадков. Значения модуля коэффициента кросскорреляции близкие к нулю (оранжевая и коричневая заливка) идентифицируют зоны, в которых радиолокационная отражаемость измеряется неустойчиво или недостоверно.

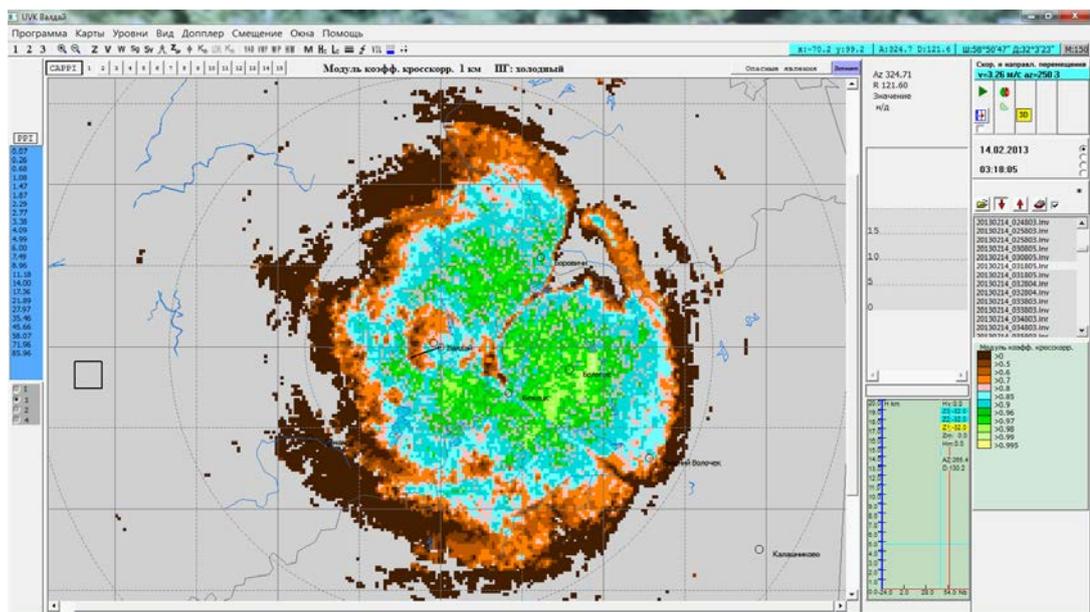
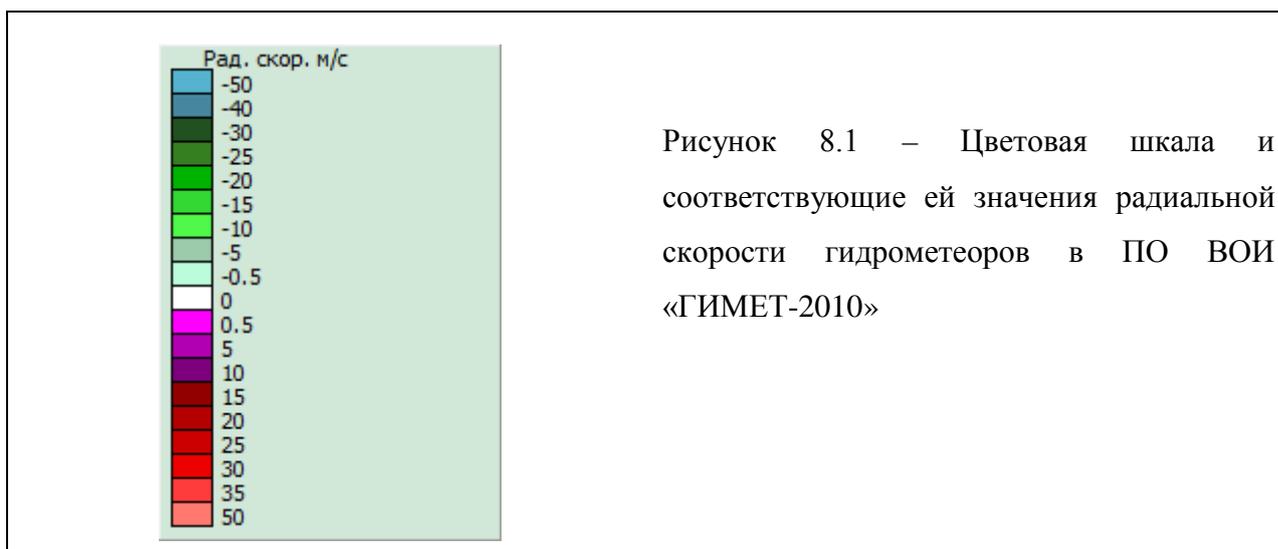


Рисунок 7.33 – Карта модуля коэффициента кросскорреляции

8 Использование радиолокационной информации ДМРЛ-С в синоптической практике

8.1 Получение информации о скорости и направлении воздушного потока в атмосферных слоях на основании оперативного анализа карт радиальной составляющей доплеровской скорости

ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» в условиях облачной погоды позволяет отображать информацию о скорости и направлении высотного потока в атмосферных слоях с дискретностью высоты 1000 м через каждые 10 минут. В каждом 1000-метровом слое отображается максимальная скорость гидрометеоров, с которой они приближаются к ДМРЛ-С и удаляются от нее. Значения радиальной скорости движения совокупности гидрометеоров в ячейках пространства представлены в виде цветовой шкалы (Рисунок 8.1). В этой шкале напротив каждого цвета стоит **минимальное** значение скорости из диапазона, соответствующего каждой цветовой градации. Так, например, цветом, соответствующим числовому значению «0,5» обозначается область, в которой гидрометеоры движутся со скоростями от 0,5 до 4,9 м/с по направлению к ДМРЛ-С. Цветом, соответствующим « 5 » обозначается область, в которой гидрометеоры приближаются к ДМРЛ-С со скоростями от 5,0 до 9,9 м/с и т.д. Аналогичным образом соответствующие цвета привязаны к отрицательным скоростям, с которыми гидрометеоры удаляются от ДМРЛ-С.



Направление движения совокупности гидрометеоров определяется по ориентации области максимальных скоростей в зоне обзора ДМРЛ-С. При определении направления перемещения воздушных масс наиболее достоверной будет являться информация,

полученная в условиях устойчивого воздушного потока, движущегося со скоростью более 10 м/с (36 км/ч). Как правило, при устойчивом воздушном потоке линия максимальных скоростей, с которыми гидрометеоры приближаются к ДМРЛ-С, перпендикулярна линии нулевых радиальных скоростей (обозначенных белым цветом на цветовой шкале). Для того чтобы уточнить направление потока совокупности гидрометеоров в градусах, необходимо переместить курсор в область максимальных скоростей. При этом, справа сверху на сером фоне появится надпись «Az 227.50» (Рис. 8.2), означающая, что направление, откуда движутся гидрометеоры к ДМРЛ-С, составляет 227°. Значение R на сером фоне и D на узком поле голубого цвета (сноска Рис. 8.2) означает расстояние от точки расположения курсора до ДМРЛ-С (в км). «Значение 11.500» означает значение радиальной составляющей скорости гидрометеоров (м/с) в месте расположения курсора (сноска Рис. 8.2).

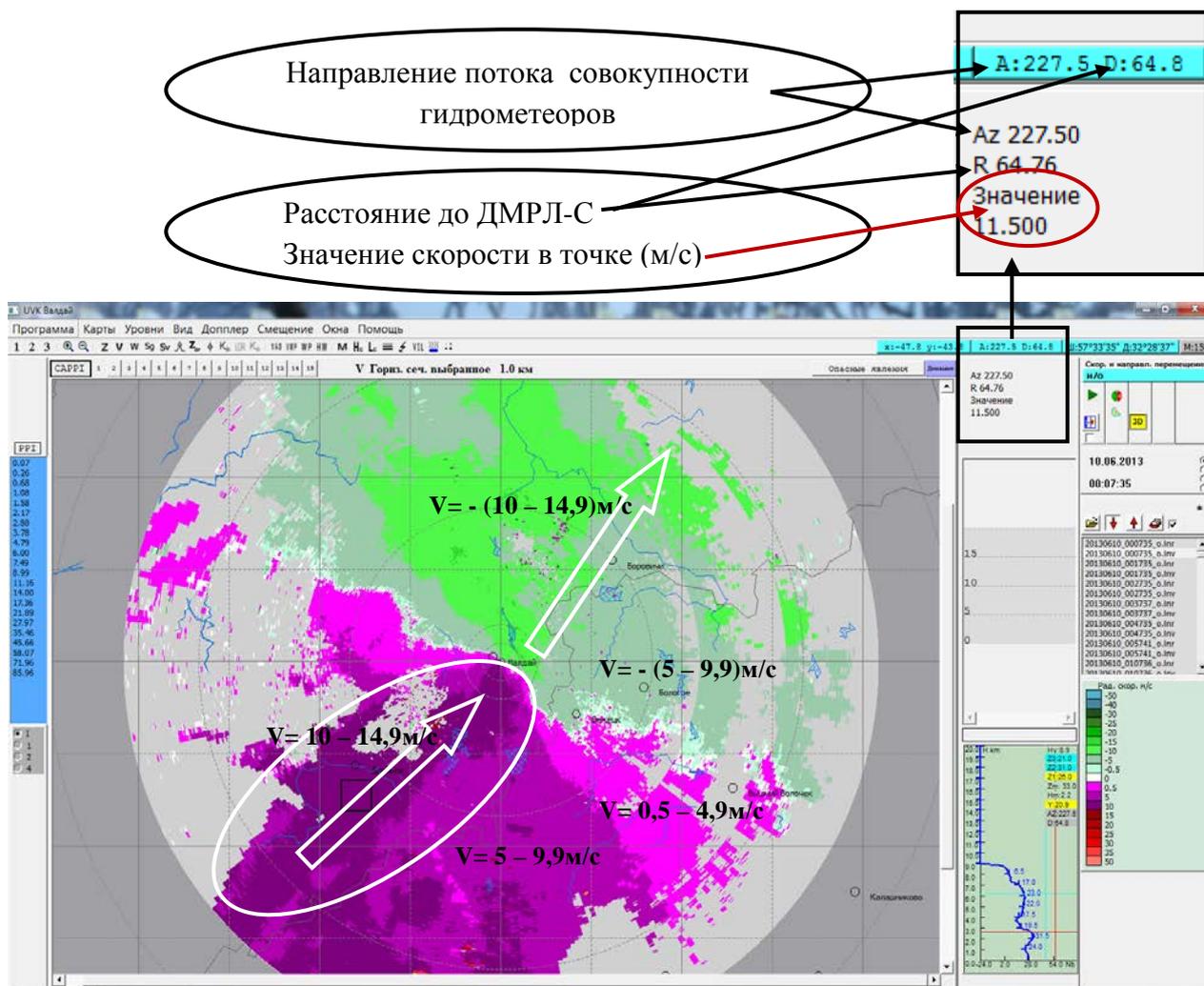


Рисунок 8.2 – Карта радиальных скоростей гидрометеоров в слое 0 - 1,0 км за 00:07 UTC 10.06.2013

Благодаря данным, получаемым ДМРЛ-С в режиме «Скорость», при наличии в зоне обзора локатора облачности, можно определить максимальную радиальную скорость смещения совокупности гидрометеоров по слоям толщиной 1000 метров во всей толще облачного слоя.

Для примера рассмотрим синоптическую ситуацию от 10.06.2013 за 00 UTC. На картах радиальных скоростей, представленных на рисунках 8.2, 8.5, 8.7, 8.9 - 10, 8.12 – 14, четко видны скорость и направление движения совокупности гидрометеоров по слоям облачности до 8 км высоты включительно:

- в слое 0 - 1,0 км (Рис. 8.2) равномерный воздушный поток юго-западного направления ($\approx 227^\circ$) смещается со скоростью 10 - 14,9 м/с;
- в слое 1,0 – 2,0 км (Рис. 8.5) наблюдается конвергенция воздушного потока. Максимальная скорость воздушного потока определяется ДМРЛ-С в секторе юго-западного направления (от 180° до 270°), обозначенном на рисунке черным квадратом с закругленными углами, и значение ее, согласно цветовой шкале скоростей, находится в диапазоне 10 – 14,9 м/с. Фактически, согласно данным аэрологического зондирования, в этом слое воздушный поток движется к ДМРЛ-С с одинаковыми скоростями с двух направлений: с южного и с юго-западного (Рис. 8.6), а удаляются гидрометеоры от ДМРЛ-С в одном направлении – на север (Рис. 8.5 – 8.6);
- в слое 2,0 – 3,0 км (Рис. 8.7) также сохраняется конвергенция воздушного потока, что подтверждается данными аэрологического зондирования на карте абсолютной топографии АТ 700 мб (Рис. 8.8). При этом скорость потока гидрометеоров остается постоянной и находится в диапазоне 10 – 14,9 м/с, что подтверждают данные аэрологического зондирования (Рис. 8.4);
- в слое 3,0 – 4,0 км (Рис. 8.9) уже можно четко выделить генеральное направление воздушного потока ($\approx 245^\circ$), смещающегося, согласно цветовой шкале скоростей, со скоростью 10-14,9 м/с. По данным аэрологического зондирования (рис. 8.4) максимальная скорость потока в слое 3,0 – 4,0 км была отмечена на высоте 4,037 км и составила 11 м/с, что соответствует диапазону скоростей, определенных ДМРЛ-С;
- в слое 4,0 – 5,0 км (рис. 8.10) четко просматривается генеральное направление потока совокупности гидрометеоров ($\approx 240 - 245^\circ$), выделенное черным овалом, но скорость, с которой гидрометеоры приближаются к ДМРЛ-С, находится в

диапазоне 15 – 19,9 м/с и отличается от скорости удаления гидрометеоров от ДМРЛ-С на одну цветовую градацию;

- в слое 5,0 – 6,0 км (Рис. 8.12) ситуация с направлением и скоростью аналогична предыдущему слою. Согласно данным аэрологического зондирования (рис. 8.11) на карте АТ 500 мб зона обзора ДМРЛ-С находится в западной части высотного гребня, и скорость потока, приближаясь к оси гребня, действительно ослабевает. Поэтому ДМРЛ-С и определяет радиальную составляющую скорости удаления гидрометеоров на градацию меньше, чем скорости приближения. Направление потока ($\approx 240 - 245^\circ$) при этом сохраняется;
- в слое 6,0 – 7,0 км (рис. 8.13) на цветовой палитре в зоне максимальных скоростей гидрометеоров, приближающихся к ДМРЛ-С, соответствующей диапазону 15 - 19,9 м/с на расстоянии ≈ 50 км от локатора четко видны цветовые вкрапления скорости соседнего диапазона (20 – 24,5 м/с). Данные аэрологического зондирования (рис. 8.4) не подтверждают таких больших значений скоростей в этом слое атмосферы. Такая картина характерна для ситуаций, когда в соседнем, как правило, более высоком слое, скорость потока резко возрастает. Вероятно, это связано с погрешностями определения высоты гидрометеоров на расстоянии 50 - 60 км и более;
- в слое 7,0 – 8,0 км (Рис. 8.14) на линии генерального направления потока четко видна зона максимальных скоростей, соответствующих диапазону 20 – 24,9 м/с, очерченная черным овалом. И, хотя карта АТ 400 мб, соответствующая высоте 7,27 км, не подтверждает таких скоростей потока в зоне ДМРЛ-С, из анализа данных аэрологического зондирования (рис. 8.4) видно, что сведения о скорости потока в слое 7,0 – 8,0 км ограничиваются высотой 7,27 км, а в слое 8,0 – 9,0 км скорость потока составляет уже 23 м/с. Это означает, что ДМРЛ-С для слоя 7,0 – 8,0 км определил максимальную скорость гидрометеоров на высоте, близкой к 8,0 км.

Последний слой (рис. 8.14), в данном случае это слой 7.0 – 8.0 км, в котором наглядно определяется скорость и направление смещения гидрометеоров в облаке, соответствует верхней границе облачности - 8 - 9 км.

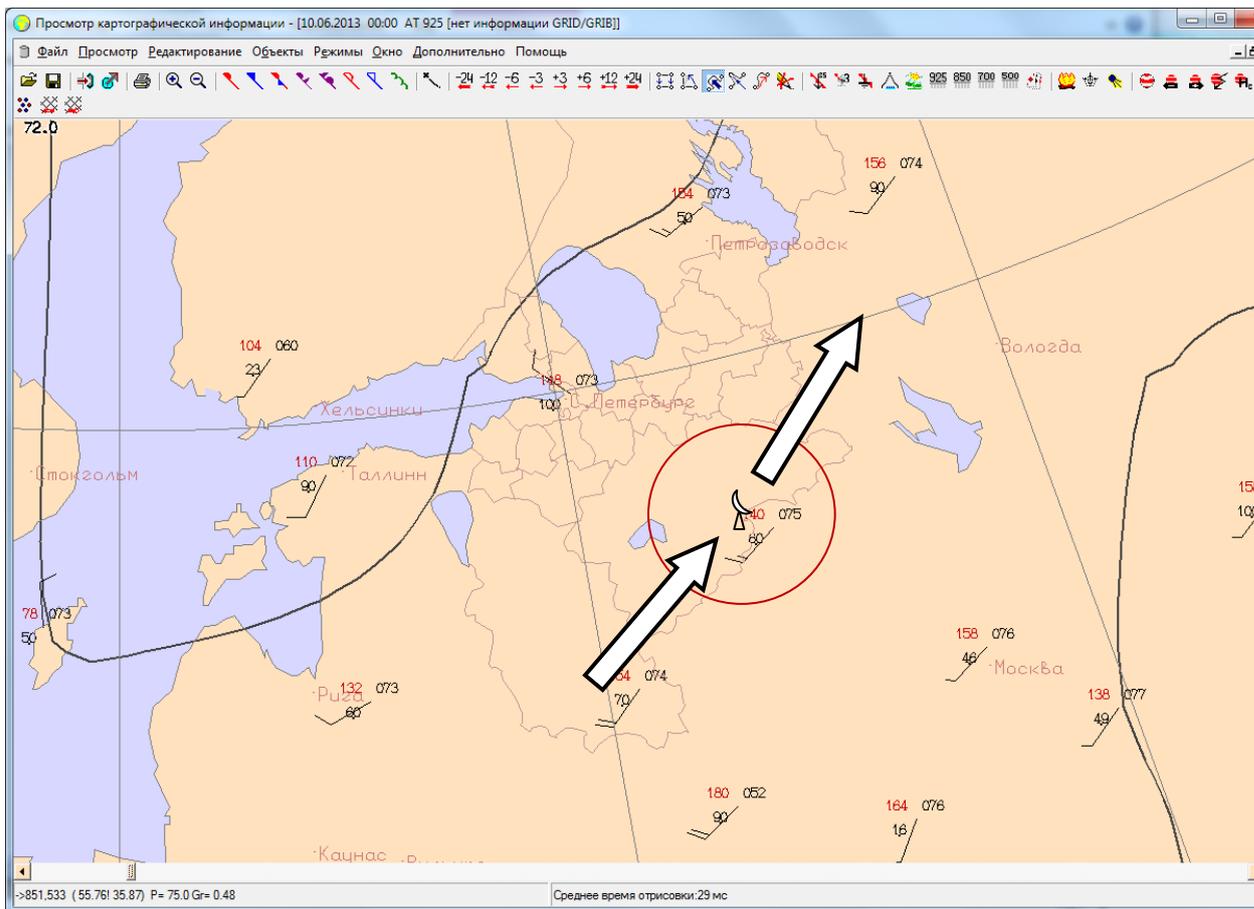


Рисунок 8.3 – Карта абсолютной топографии изобарической поверхности 925 мб за 00:00 UTC 10.06.2013 в районе Валдая

При наличии данных ДМРЛ-С особую ценность для синоптика представляет 10-минутный темп обновления информации о скорости и направлении потока в облачной массе. При отсутствии данных ДМРЛ-С специалист может получить информацию о скоростях воздушного потока только с интервалом 12 часов, используя данные аэрологического зондирования атмосферы.

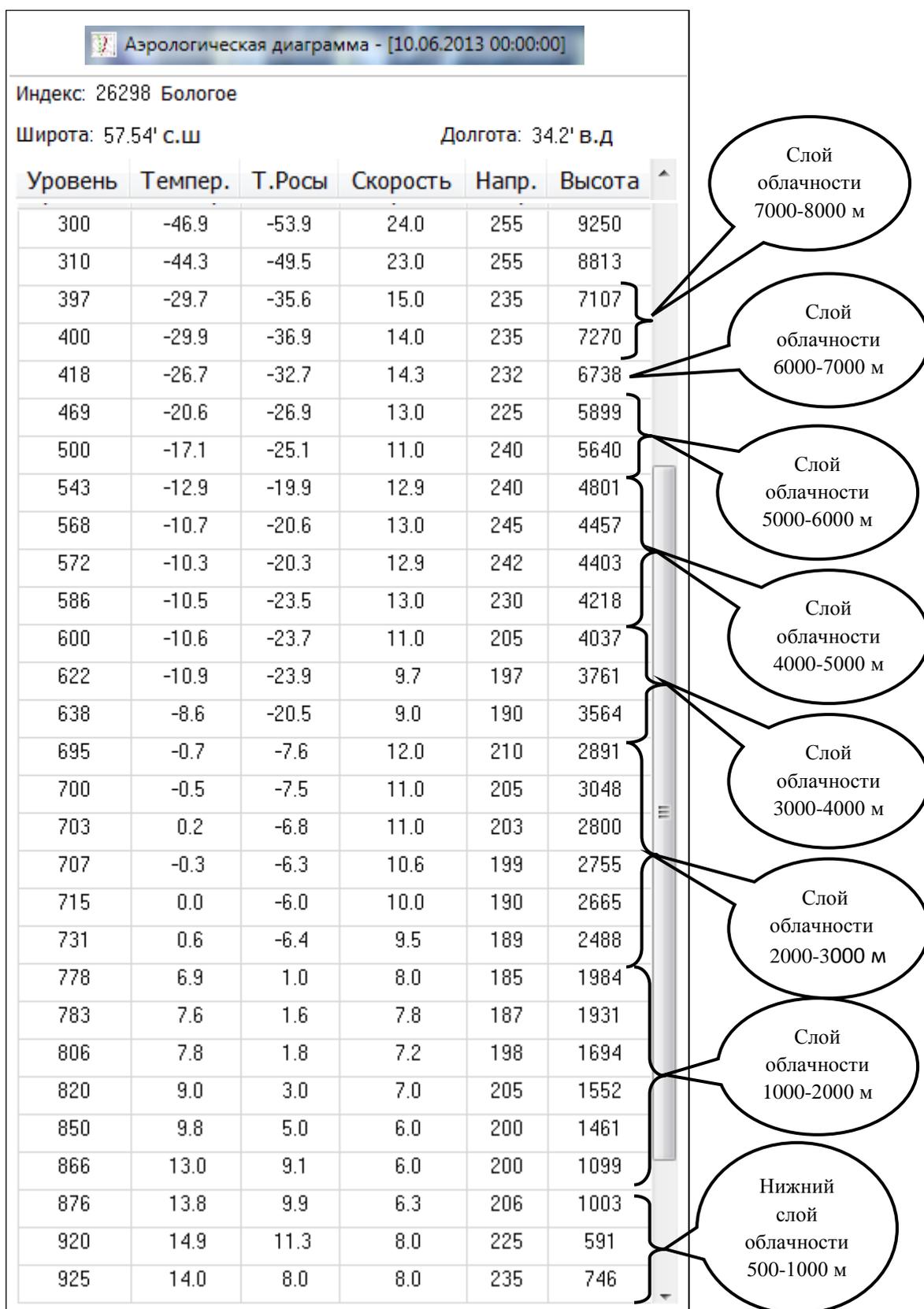


Рисунок 8.4 – Данные температурно-ветрового зондирования, полученные из кода КН-04 за срок 00:00 UTC 10.06.2013 на аэрологической станции «Бологое»

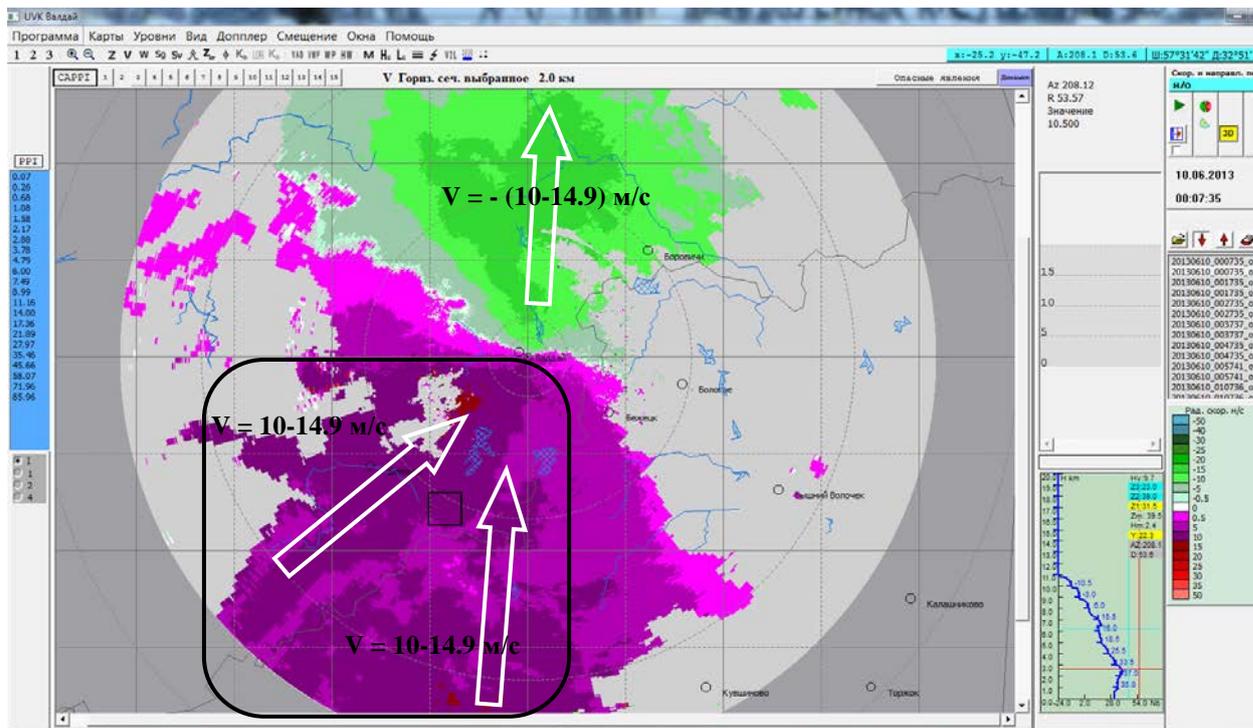


Рисунок 8.5 – Карта радиальных скоростей гидрометеоров в слое 1,0 - 2,0 км за 00:07 UTC 10.06.2013

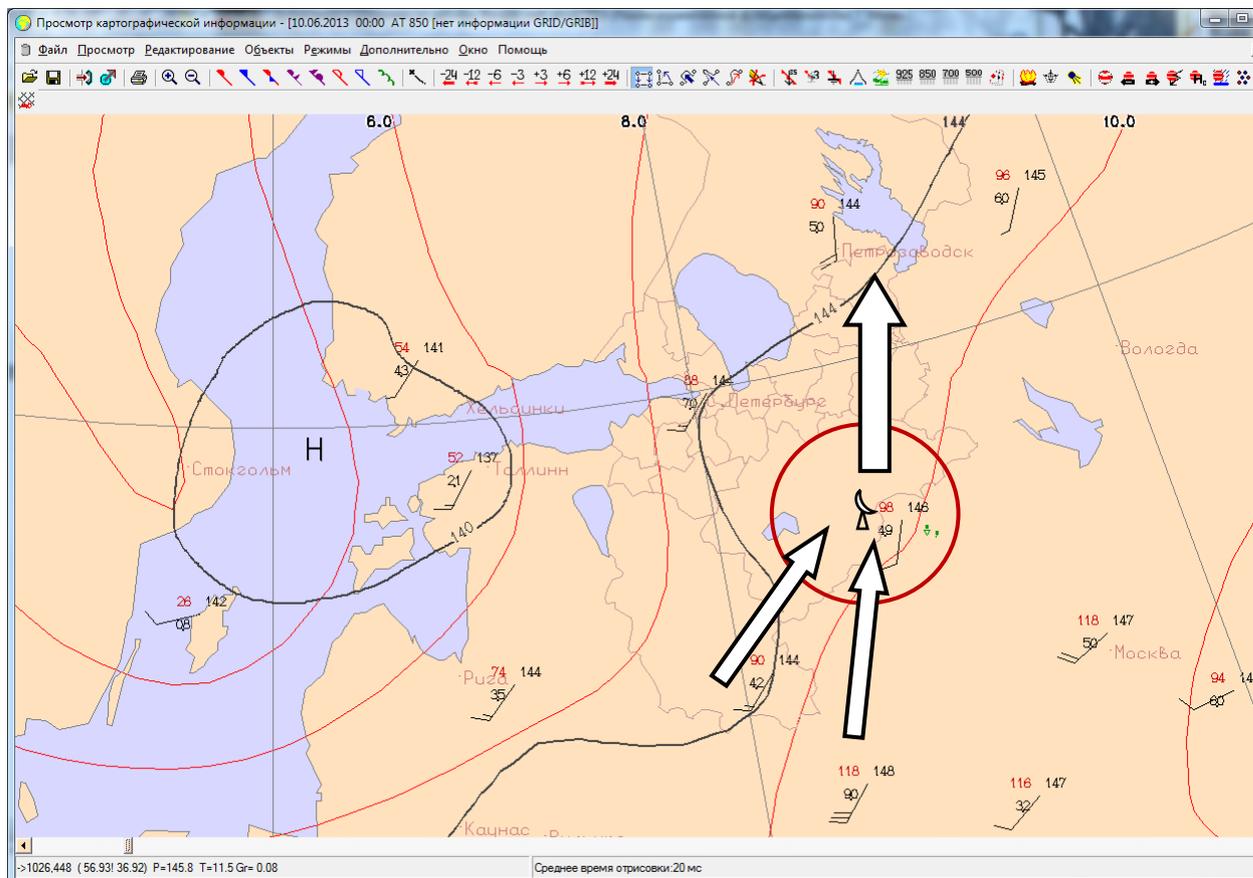


Рисунок 8.6 – Карта абсолютной топографии изобарической поверхности 850 мб за 00:00 UTC 10.06.2013 в районе Валдая

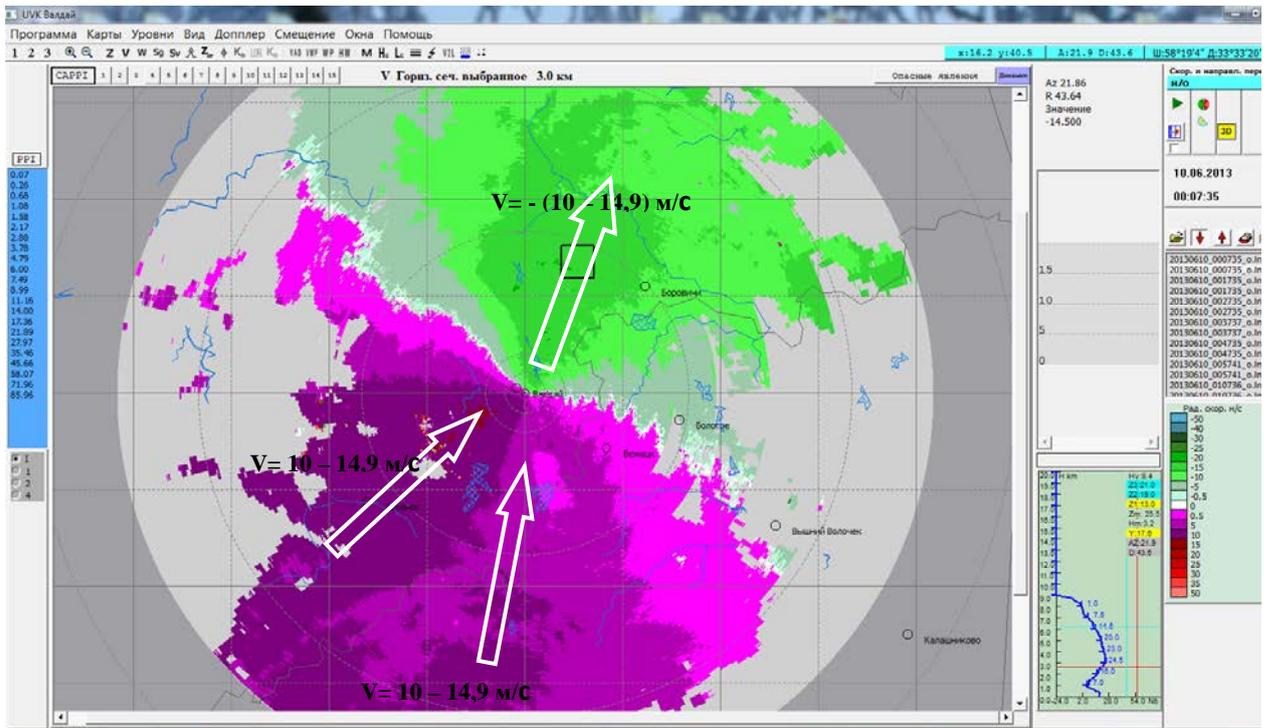


Рисунок 8.7 – Карта радиальных скоростей гидрометеоров в слое 2,0 - 3,0 км за 00:07 UTC 10.06.2013

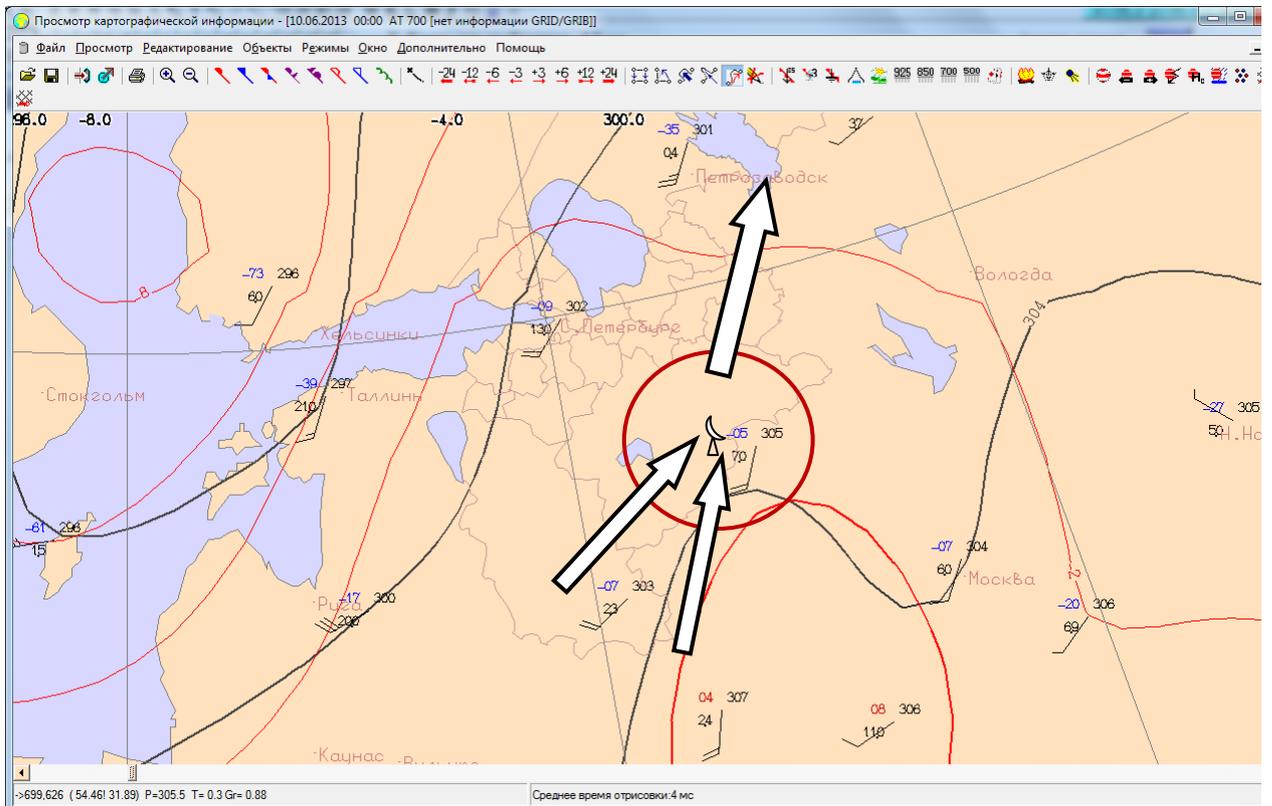


Рисунок 8.8 – Карта абсолютной топографии изобарической поверхности 700 мб за 00:00 UTC 10.06.2013 в районе Валдая

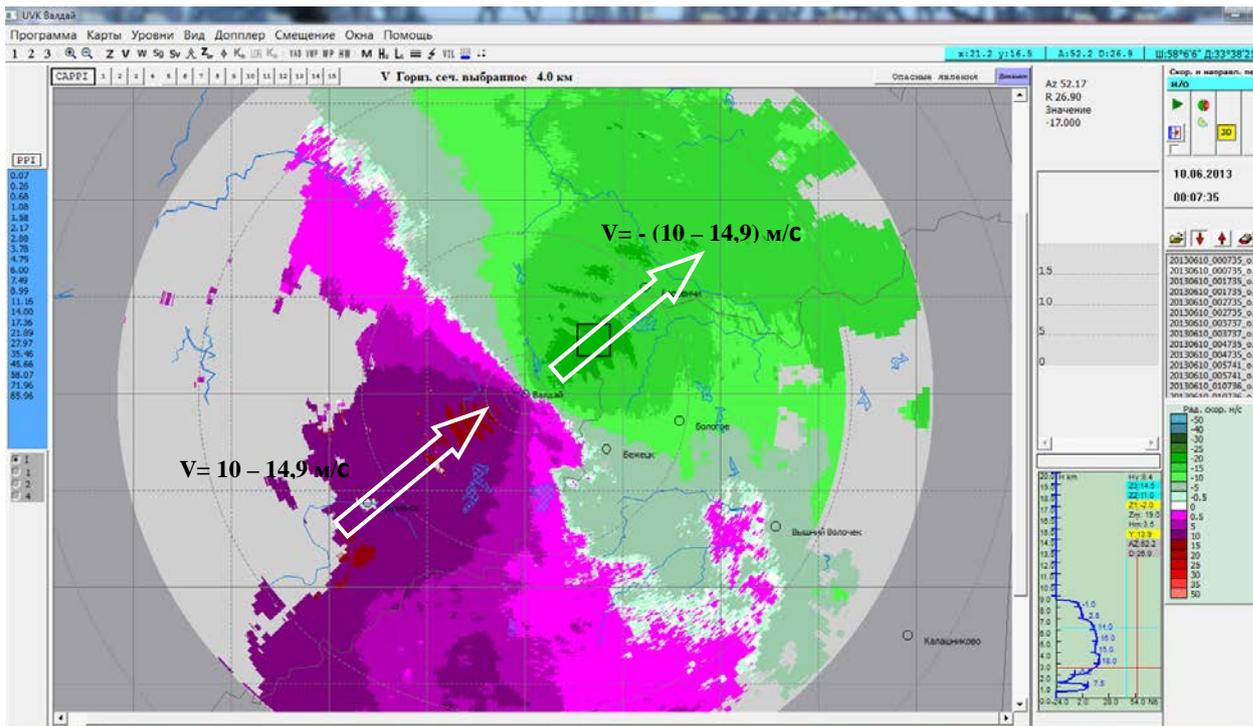


Рисунок 8.9 – Карта радиальных скоростей гидрометеоров в слое 3,0 - 4,0 км за 00:07 UTC 10.06.2013

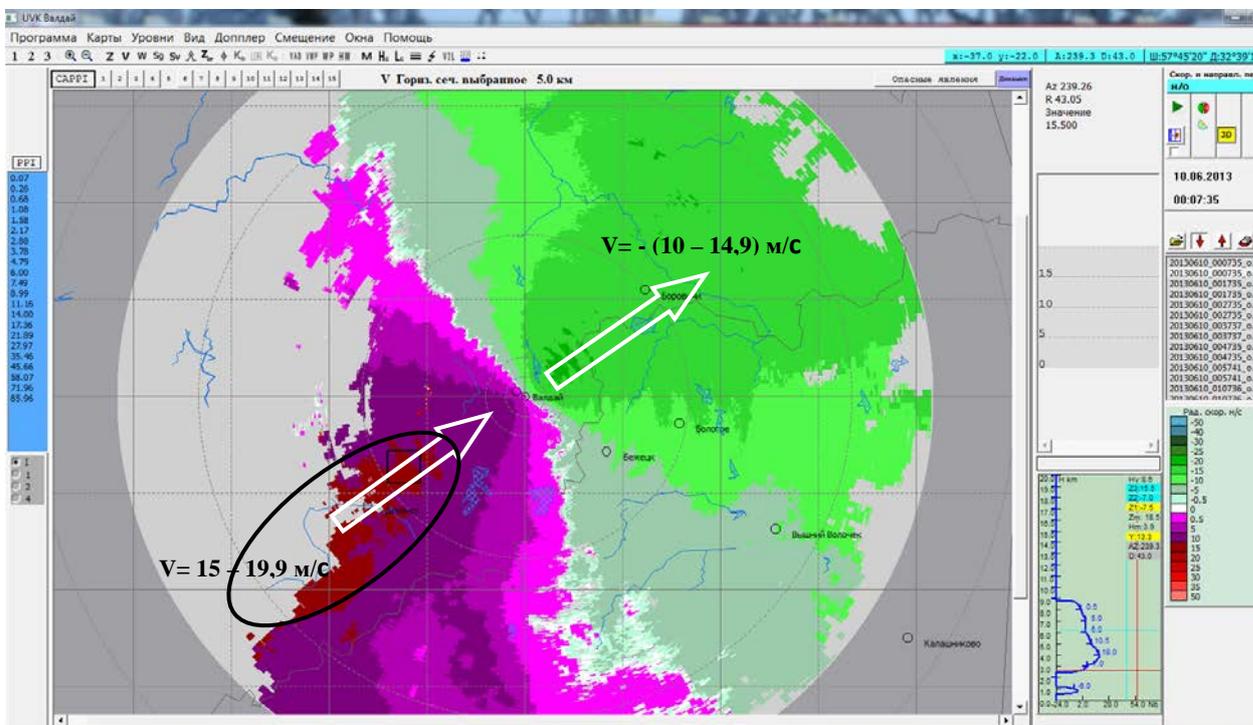


Рисунок 8.10 – Карта радиальных скоростей гидрометеоров в слое 4,0 - 5,0 км за 00:07 UTC 10.06.2013

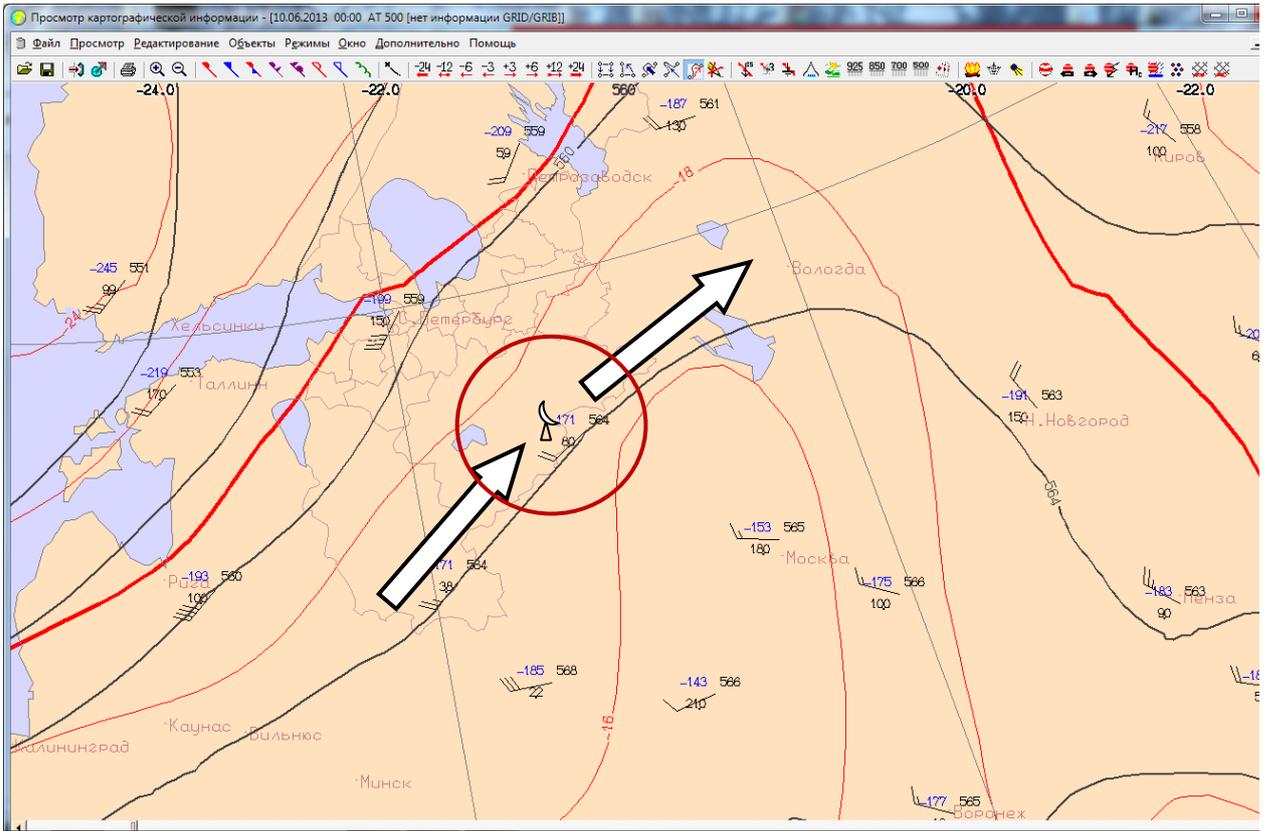


Рисунок 8.11 – Карта абсолютной топографии изобарической поверхности 500 мб за 00:00 UTC 10.06.2013 в районе Валдая

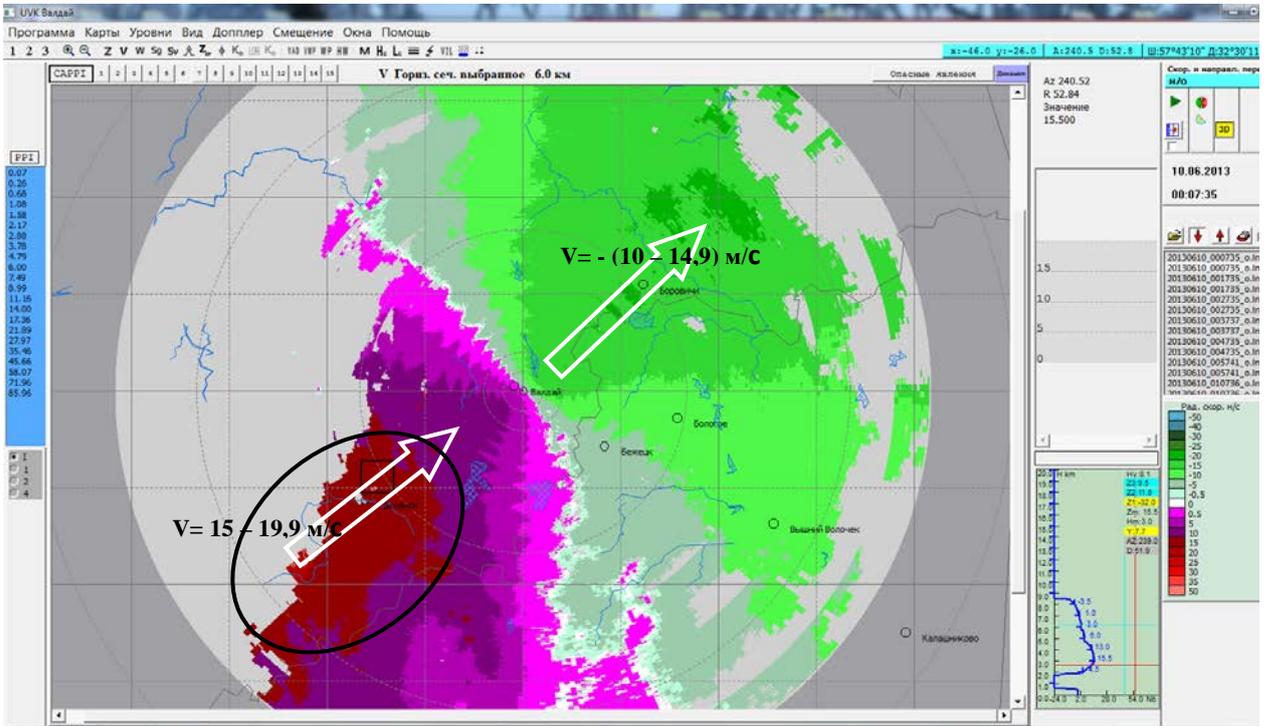


Рисунок 8.12 – Карта радиальных скоростей гидрометеоров в слое 5,0 - 6,0 км за 00:07 UTC 10.06.2013

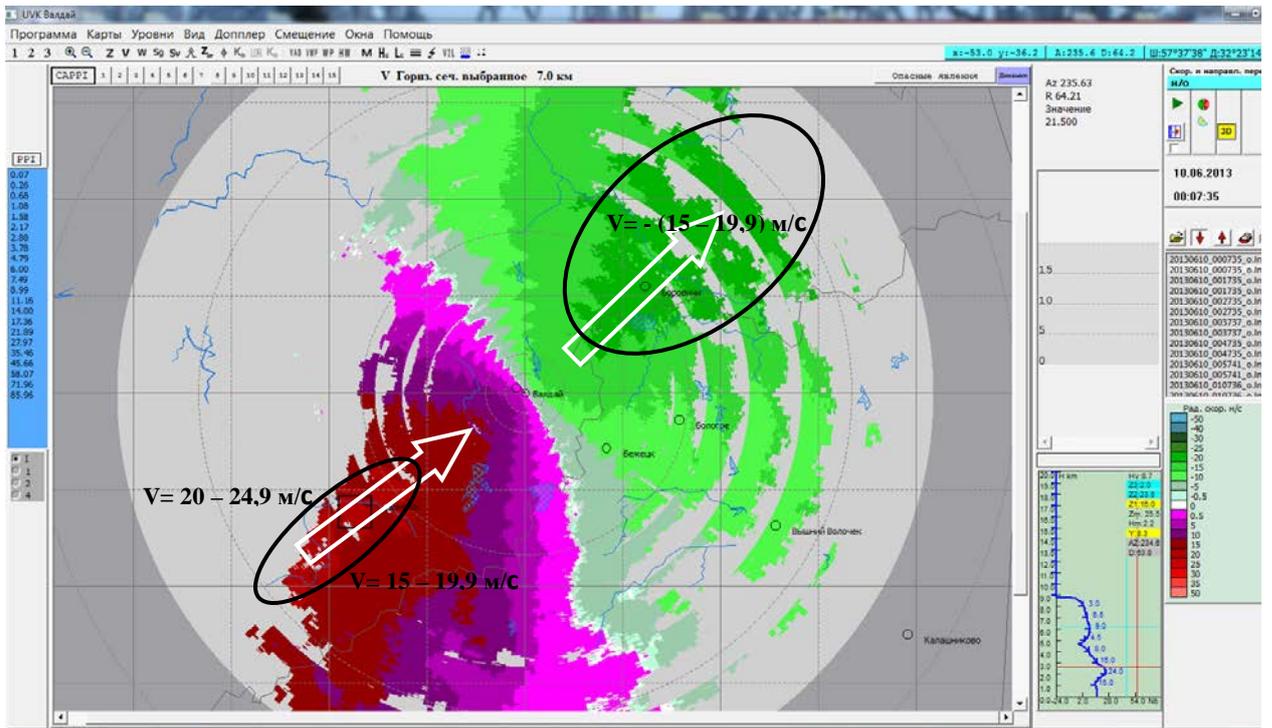


Рисунок 8.13 – Карта радиальных скоростей гидрометеоров в слое 6,0 - 7,0 км
за 00:07 UTC 10.06.2013

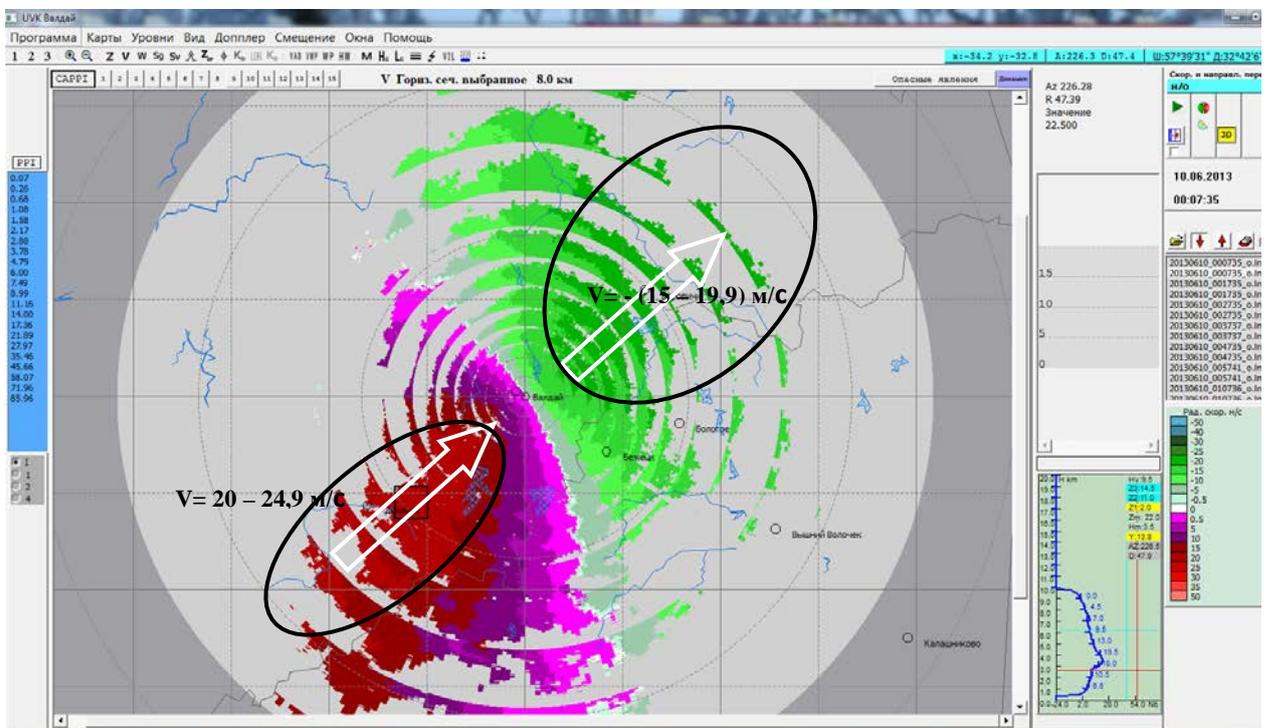


Рисунок 8.14 – Карта радиальных скоростей гидрометеоров в слое 7,0 - 8,0 км
за 00:07 UTC 10.06.2013

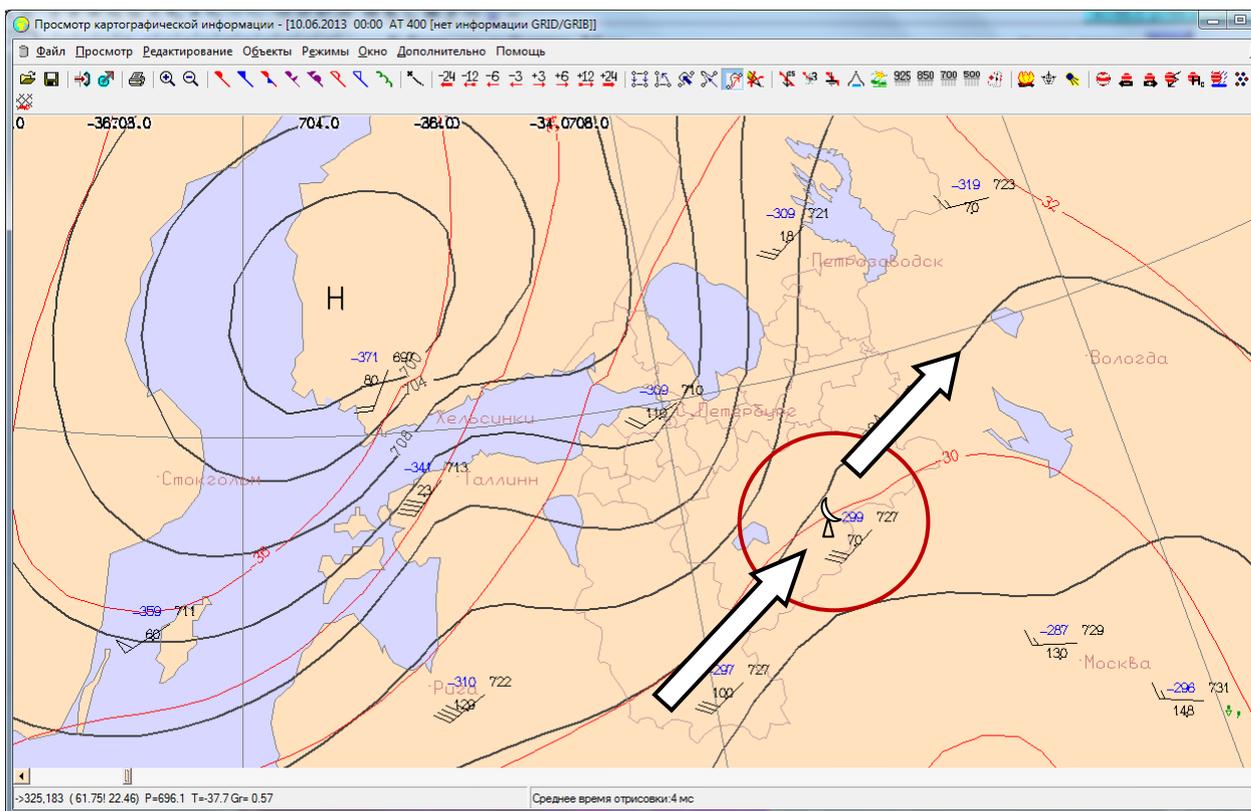


Рисунок 8.15 – Карта абсолютной топографии изобарической поверхности 400 мб за 00:00 UTC 10.06.2013 в районе Валдая

Кроме фактического определения скорости и направления ведущего потока по слоям атмосферы, с помощью ДМРЛ-С, благодаря 10-минутным обзорам можно проследить динамику процесса изменения скорости и направления потока, не дожидаясь последующих данных аэрологического зондирования атмосферы. Тем более, что за период в 12 часов скорость потока в нижних слоях атмосферы может измениться несколько раз. При этом единственным обязательным условием является наличие облачности (ДМРЛ-С может определять радиальную составляющую скорости при наличии гидрометеоров).

Для примера рассмотрим ситуацию 11 мая 2013 года. По данным аэрологического зондирования в 00:00 UTC 11.05.2013 на аэрологической станции «Бологое» в слое 0,2 - 1,5 км и на высоте 3,8 км и выше наблюдался поток северо-западного направления (280 - 300°) (Рис. 8.16). В это время ярко-выраженная облачность в зоне ответственности ДМРЛ-С «Валдай» отсутствовала. В 06:00 UTC с юга к Валдайской возвышенности подошел теплый атмосферный фронт (рис. 8.17) с дождем, и ветер у земли перед фронтом изменил направление с юго-западного на юго-восточное.

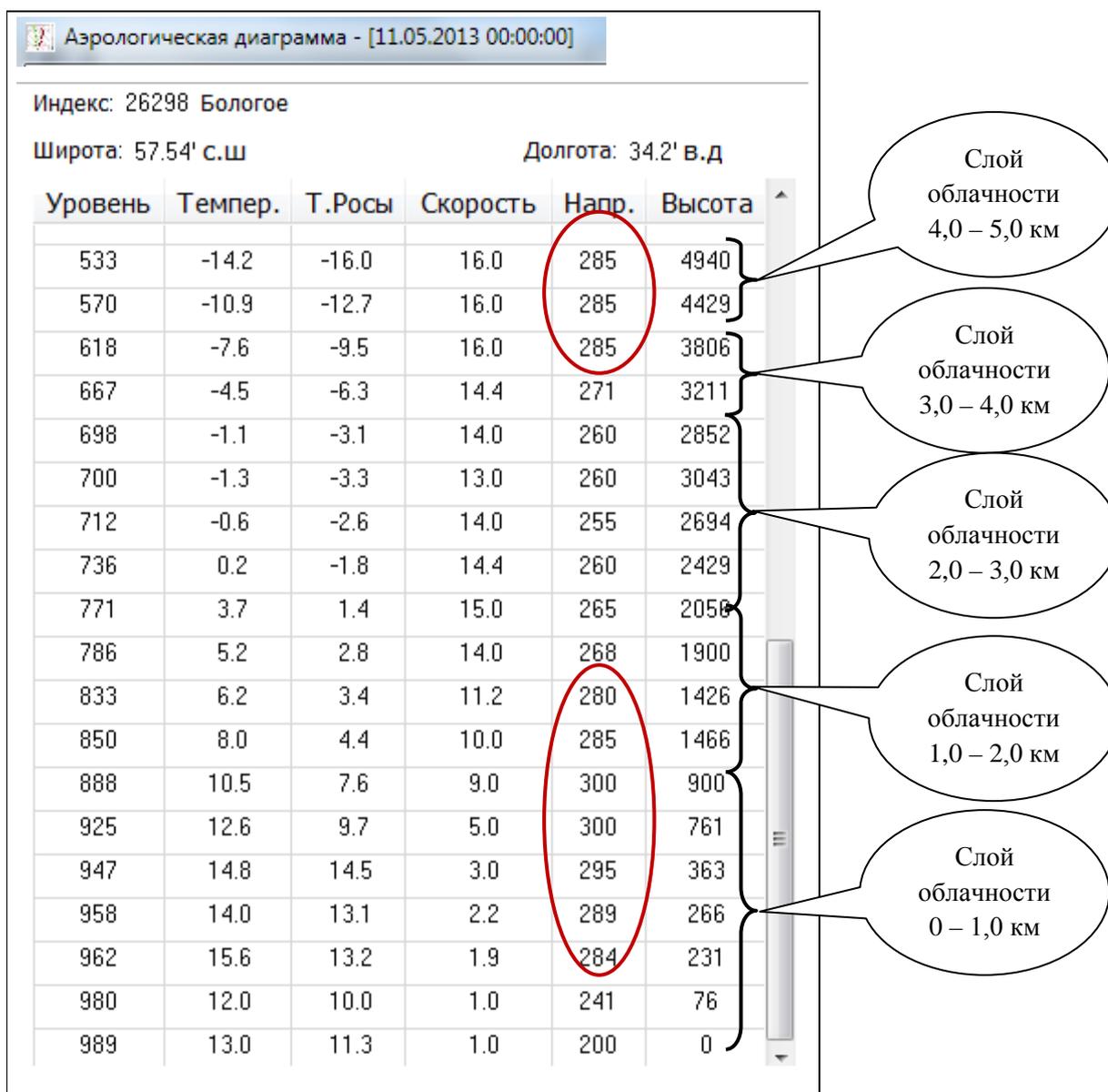


Рисунок 8.16 – Данные температурно-ветрового зондирования, полученные из кода КН-04 за срок 00:00 UTC 11.05.2013 на аэрологической станции «Бологое»

По данным ДМРЛ-С за срок 06:27 UTC в слое 0 – 1,0 км (рис. 8.18), в слое 1,0 – 2,0 км (рис. 8.19) и в слое 3,0 – 4,0 км (рис. 8.21) гидрометеоры приближались к локатору с юго-запада ($\approx 250^\circ - 259^\circ$). В слое 2,0 – 3,0 км (рис. 8.20) сохранился поток юго-западного направления ($\approx 256^\circ$). Подобное изменение направления воздушного потока было подтверждено данными аэрологического зондирования за 12:00 UTC (рис. 8.22), т.е. только через 6 часов после сведений, полученных ДМРЛ-С.

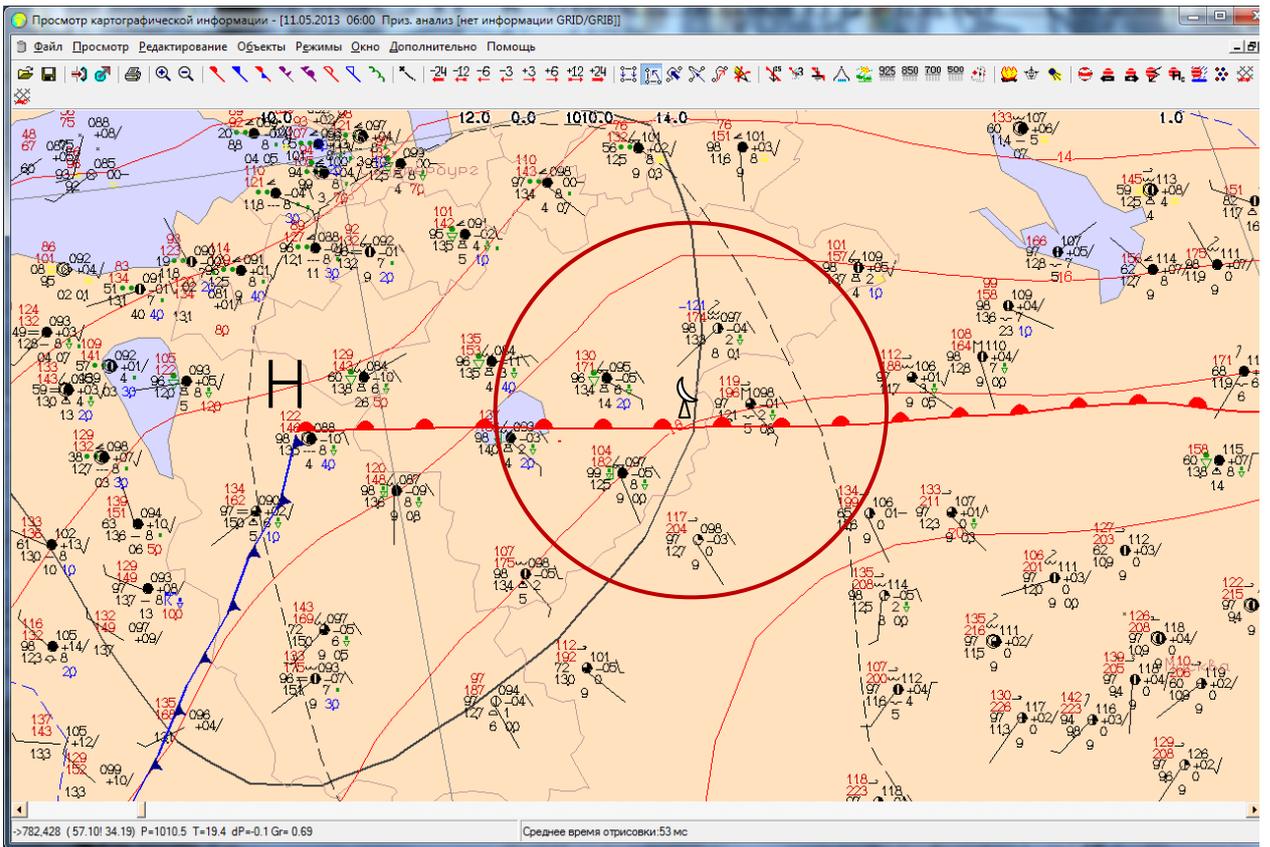


Рисунок 8.17 – Синоптическая карта за 06:00 UTC 11.05.2013 в районе Валдая

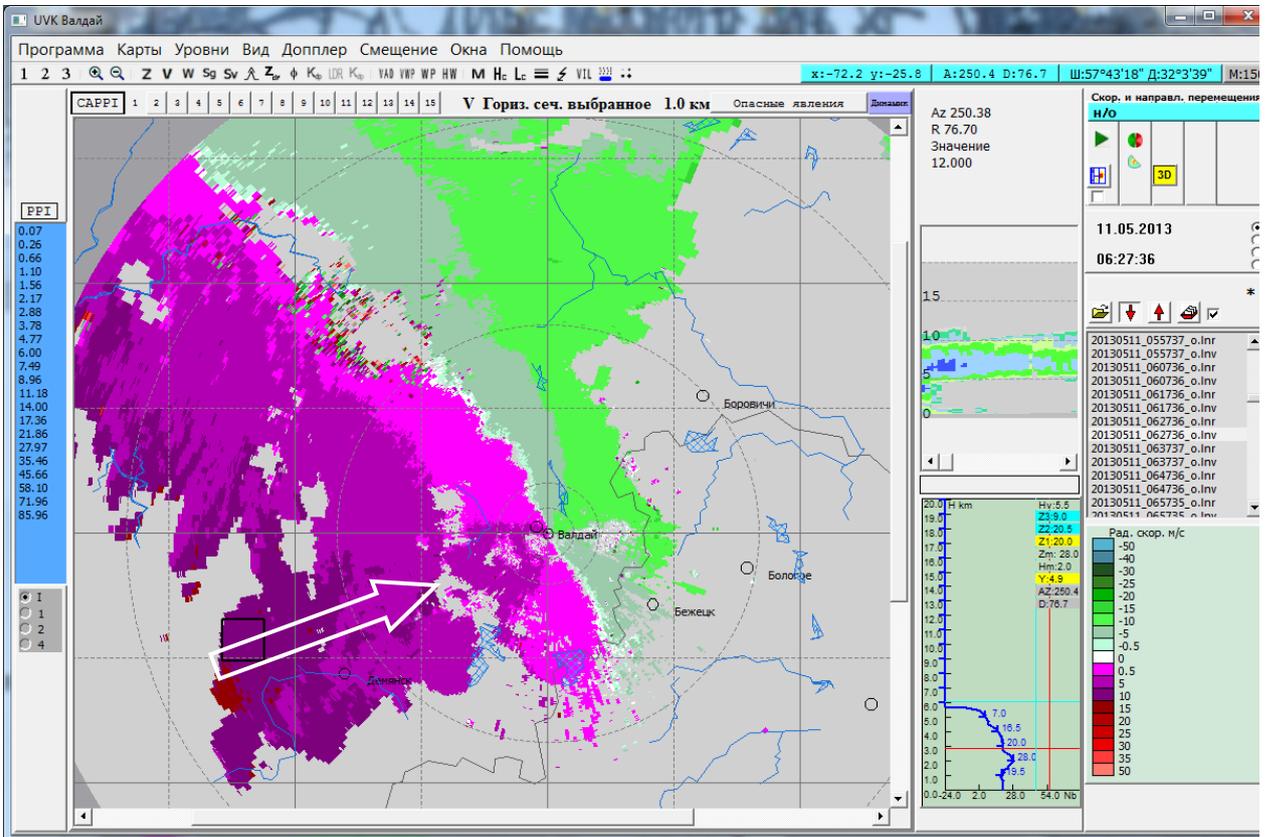


Рисунок 8.18 – Карта радиальных скоростей гидрометеоров в слое 0 - 1,0 км за 06:27 UTC 11.05.2013

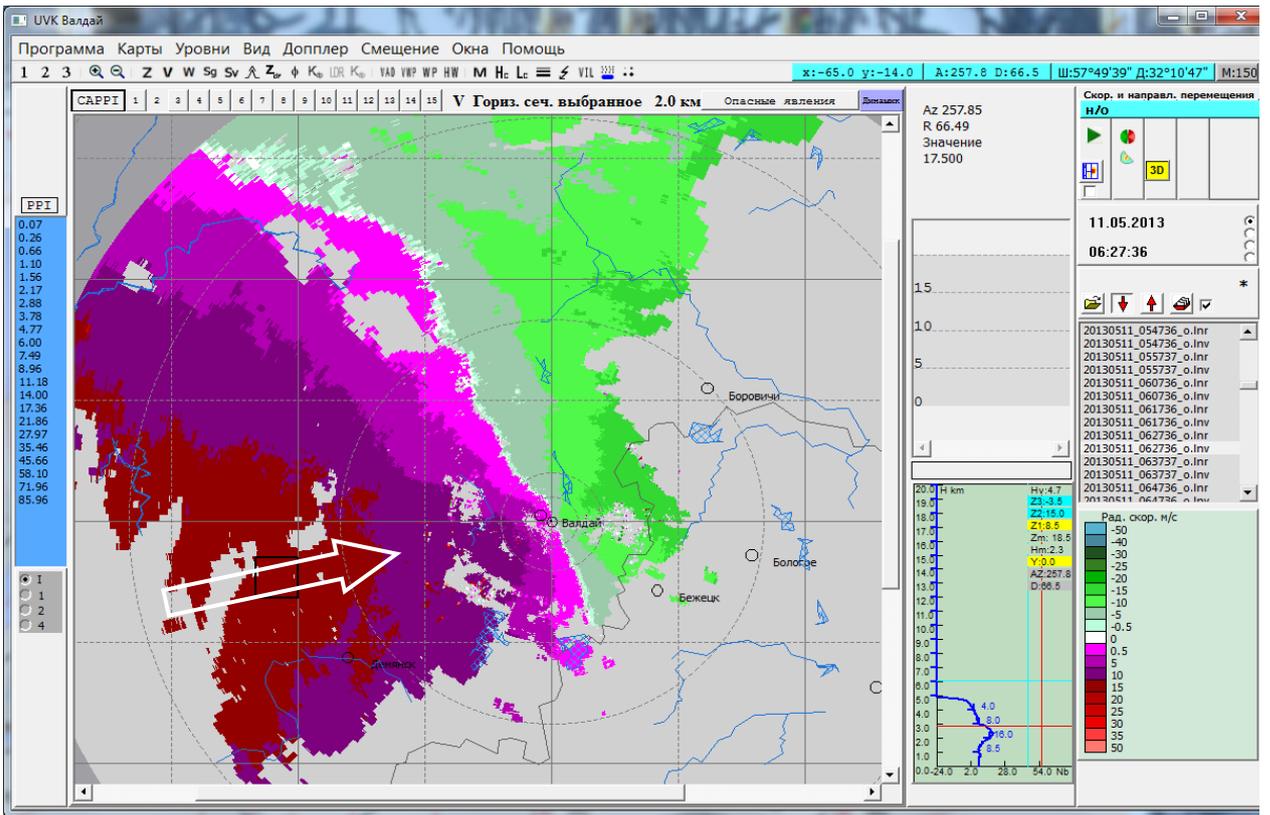


Рисунок 8.19 – Карта радиальных скоростей гидрометеоров в слое 1,0 - 2,0 км
за 06:27 UTC 11.05.2013

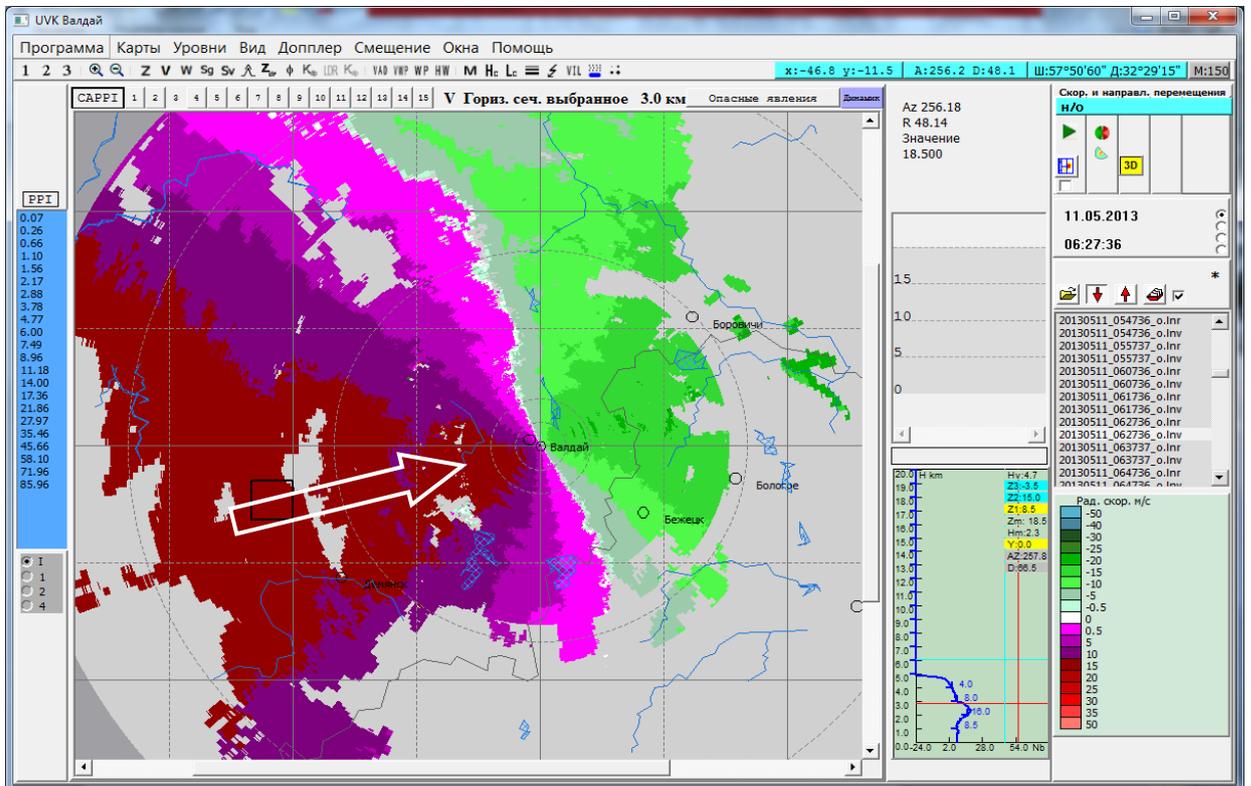


Рисунок 8.20 – Карта радиальных скоростей гидрометеоров в слое 2,0 - 3,0 км
за 06:27 UTC 11.05.2013

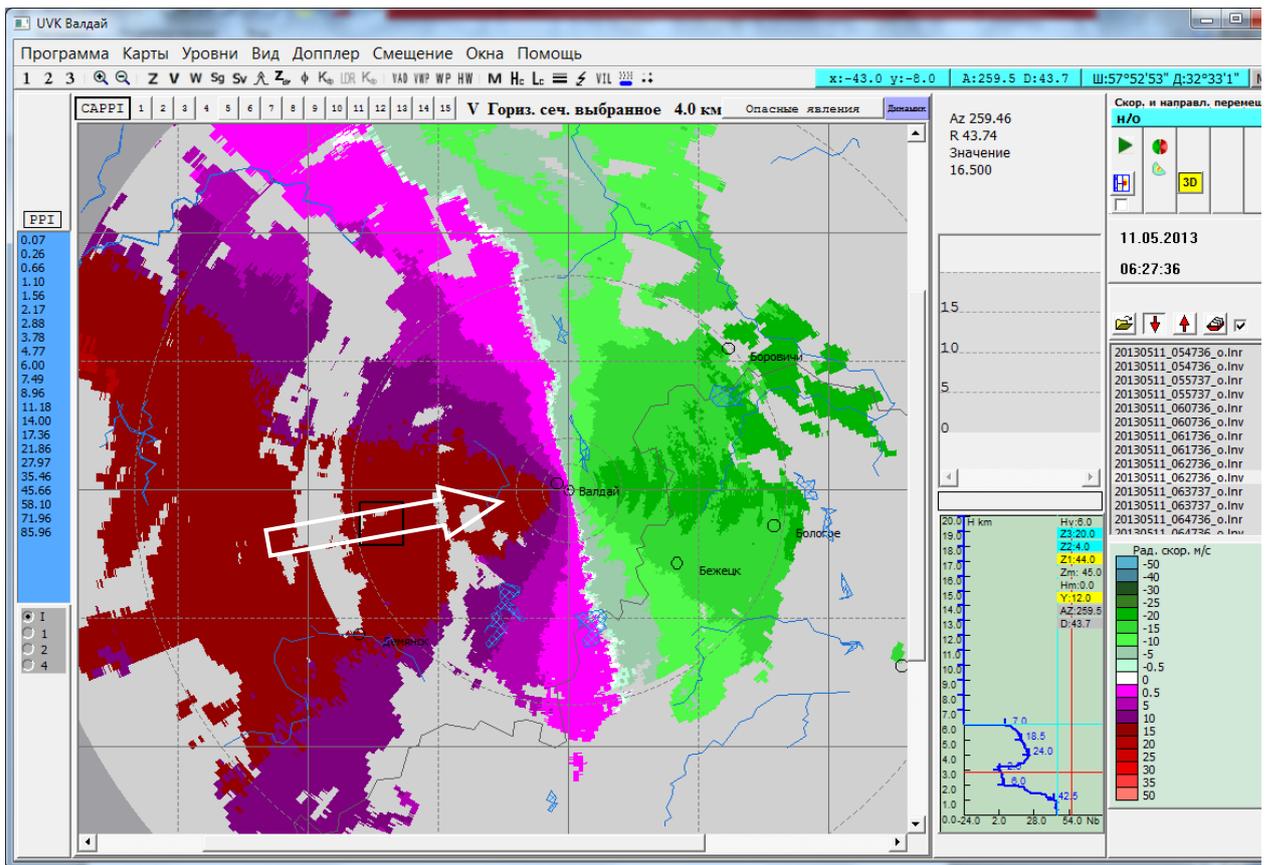


Рисунок 8.21 – Карта радиальных скоростей гидрометеоров в слое 3,0 - 4,0 км
за 06:27 UTC 11.05.2013

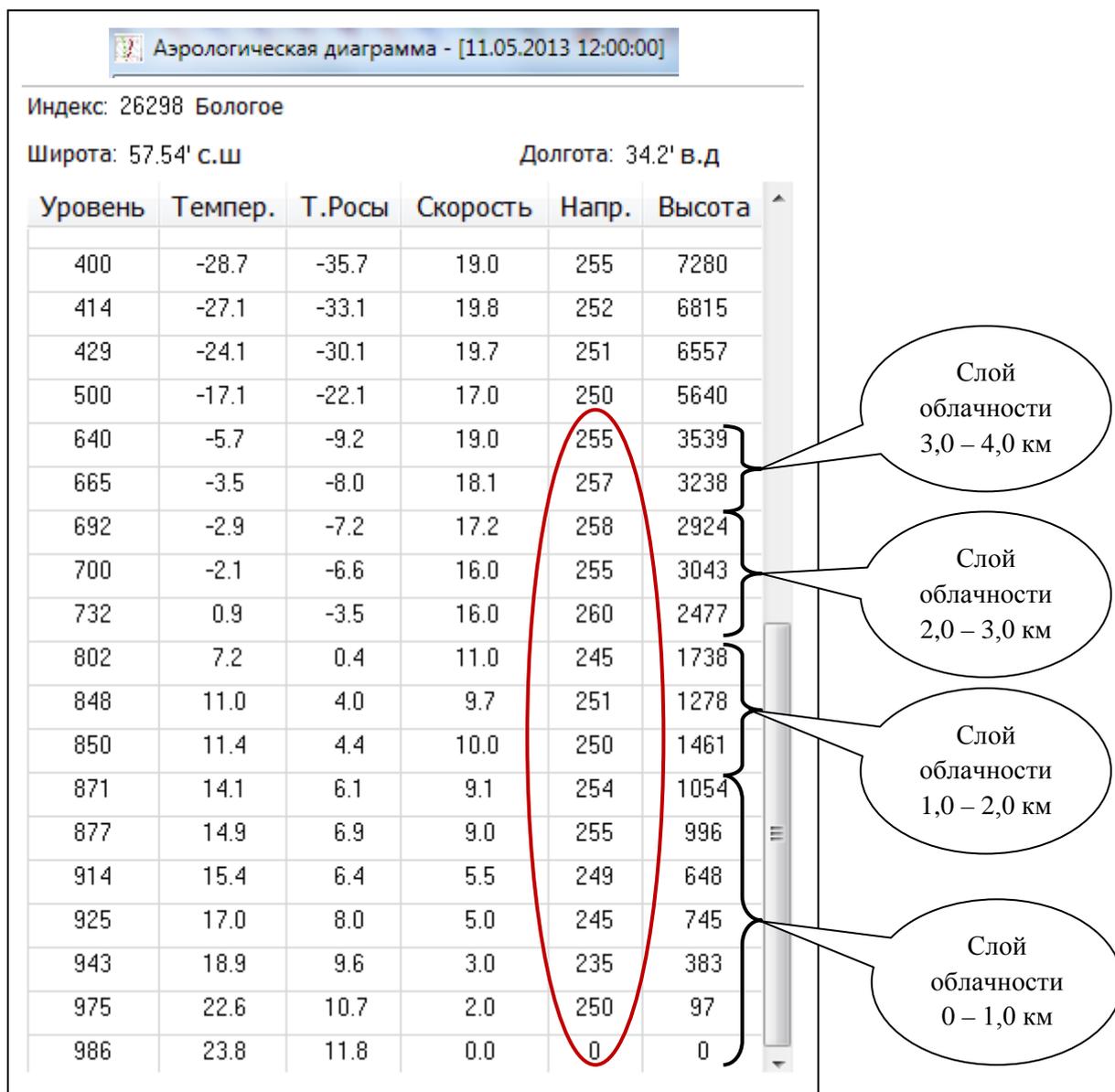


Рисунок 8.22 – Данные температурно-ветрового зондирования, полученные из кода КН-04 за срок 12:00 UTC 11.05.2013 на аэрологической станции «Бологое»

8.2 Определение зон дивергенции и конвергенции воздушного потока на основании анализа данных доплеровской скорости ДМРЛ-С

Кроме того, по распределению радиальных доплеровских скоростей можно узнать о дивергенции и конвергенции линий ведущего потока. На рисунке 8.23 видно, что гидрометеоры в слое 0 – 1,0 км приближаются к ДМРЛ-С с трех направлений ($\approx 120^\circ$, $\approx 190^\circ$ и $\approx 270^\circ$), а удаляются только в одном направлении – на северо-запад ($\approx 325^\circ$). При этом максимальная радиальная составляющая скорости гидрометеоров, приближающихся к ДМРЛ-С с юго-востока (120°), находится в диапазоне 15,0 -19,9 м/с, с других направлений гидрометеоры приближаются со скоростями, находящимися в диапазоне 10,0 – 14,9 м/с. Удаляются же гидрометеоры от ДМРЛ-С с максимальной скоростью, соответствующей диапазону 15,0 – 19,9 м/с. Такая картина распределения радиальных скоростей гидрометеоров свидетельствует о наличии конвергенции (сходимости воздушных потоков) в рассматриваемом воздушном слое. На рисунке 8.24 представлена карта абсолютной барической топографии за 12 UTC 22.05.2013 на геопотенциальной поверхности 925 мб, соответствующая атмосферному слою 0 – 1,0 км. На ней отчетливо видна конвергенция потоков в районе Валдайской возвышенности в ярко-выраженной барической ложбине: в районе населенного пункта Бологое, наблюдается поток юго-восточного направления (110°) со скоростью 15 м/с, в районе населенного пункта Великие Луки – поток юго-западного направления (255°) со скоростью 6 м/с, а над Санкт-Петербургом – поток юго-восточного направления (110°) со скоростью 10 м/с. Переход от юго-западного потока к юго-восточному в зоне ответственности ДМРЛ-С осуществляется через южное направление, что и отражено на рисунке 8.23. Как видно из сопоставления данных на рисунках 8.23 и 8.24, скорости потока на карте АТ 925 мб отличаются от значений радиальных скоростей ДМРЛ-С. Но ДМРЛ-С определяет максимальную радиальную составляющую скорости гидрометеоров в воздушном слое. Согласно данным аэрологического зондирования за срок 12:00 UTC (рис. 8.25) в слое 0 – 1,0 км максимальная скорость 16 м/с наблюдается на высоте 644 метра, а изобарическая поверхность 925 мб находится на высоте 717 м. Именно эту скорость смещения гидрометеоров с юго-восточного направления и определил ДМРЛ-С.

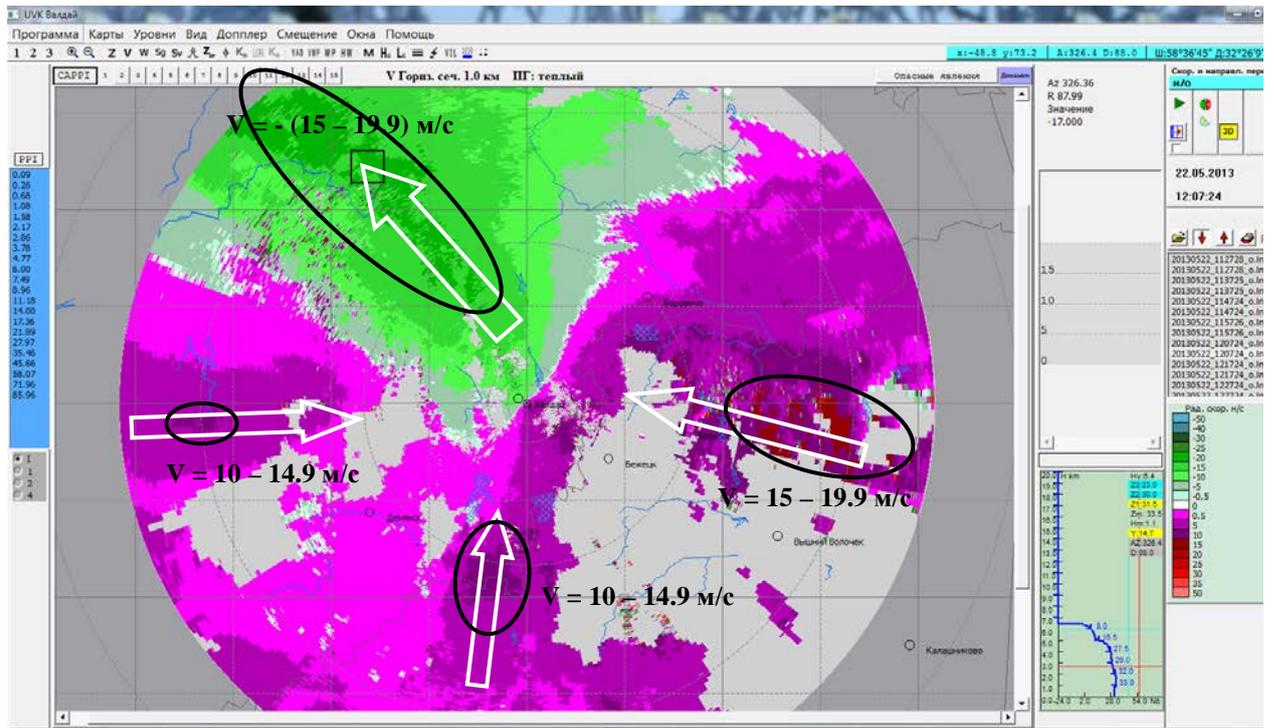


Рисунок 8.23 – Карта радиальных скоростей гидрометеоров в слое 0 - 1,0 км
за 12:07 UTC 22.05.2013

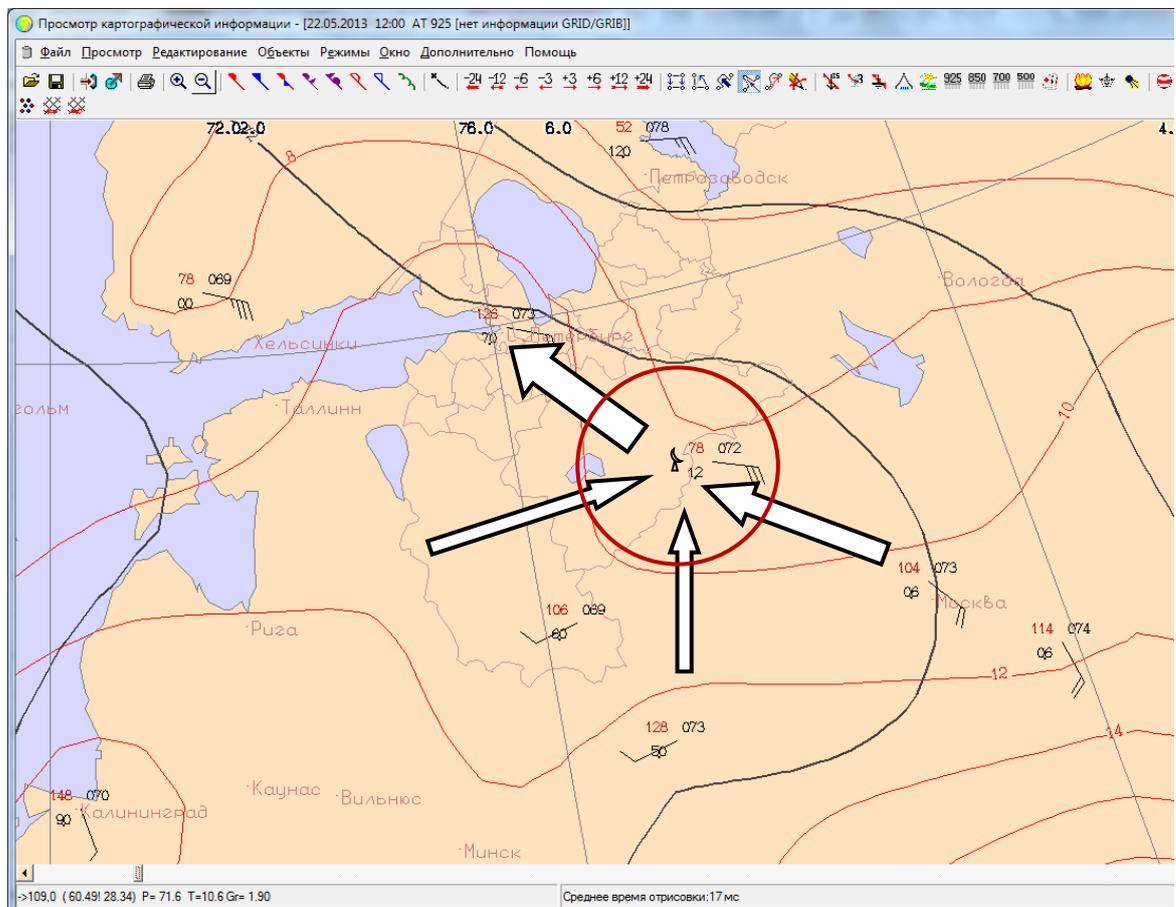


Рисунок 8.24 – Карта абсолютной топографии изобарической поверхности 925 мб
за 12:00 UTC 22.05.2013 в районе Валдая

Аэрологическая диаграмма - [22.05.2013 12:00:00]

Индекс: 26298 Бологое
 Широта: 57.54' с.ш Долгота: 34.2' в.д

Уровень	Темпер.	Т.Росы	Скорость	Напр.	Высота
584	-10.5	-14.5	7.8	196	4186
594	-9.2	-12.7	8.0	205	4055
617	-6.3	-9.3	7.7	188	3759
620	-6.3	-9.3	7.8	185	3721
634	-6.1	-8.7	8.0	175	3547
671	-3.9	-5.8	7.0	165	3102
700	-2.5	-4.7	8.0	185	2977
708	-1.9	-3.8	8.0	190	2678
736	-1.9	-4.5	7.9	185	2371
751	0.4	-1.9	7.9	182	2211
787	2.6	0.2	8.0	175	1835
834	5.2	4.0	9.0	135	1365
850	6.0	4.8	10.0	125	1406
852	6.2	5.0	9.7	133	1191
888	6.8	5.6	11.0	130	853
911	7.2	6.0	16.0	120	644
921	7.4	6.2	14.4	119	554
925	7.8	6.6	15.0	110	717
985	11.6	10.6	5.0	95	0

Рисунок 8.25 – Данные температурно-ветрового зондирования, полученные из кода КН-04 за срок 12:00 UTC 22.05.2013 на аэрологической станции «Бологое»

Но конвергенция воздушного потока не всегда так ярко просматривается в барических ложбинах. На рисунках 8.26 и 8.28 представлены карты распределения радиальных составляющих скорости гидрометеоров, также наблюдающиеся в барической ложбине. В данном случае гидрометеоры движутся в направлении к ДМРЛ-С только с юго-запада, а удаляются от него на север с одинаковыми скоростями, находящимися в диапазоне 5 -9,9 м/с. Вышеописанное распределение движения гидрометеоров наглядно подтверждается данными аэрологического зондирования в виде карт абсолютной топографии на высотах, соответствующих рассматриваемым слоям тропосферы (рис. 8.27 и 8.29).

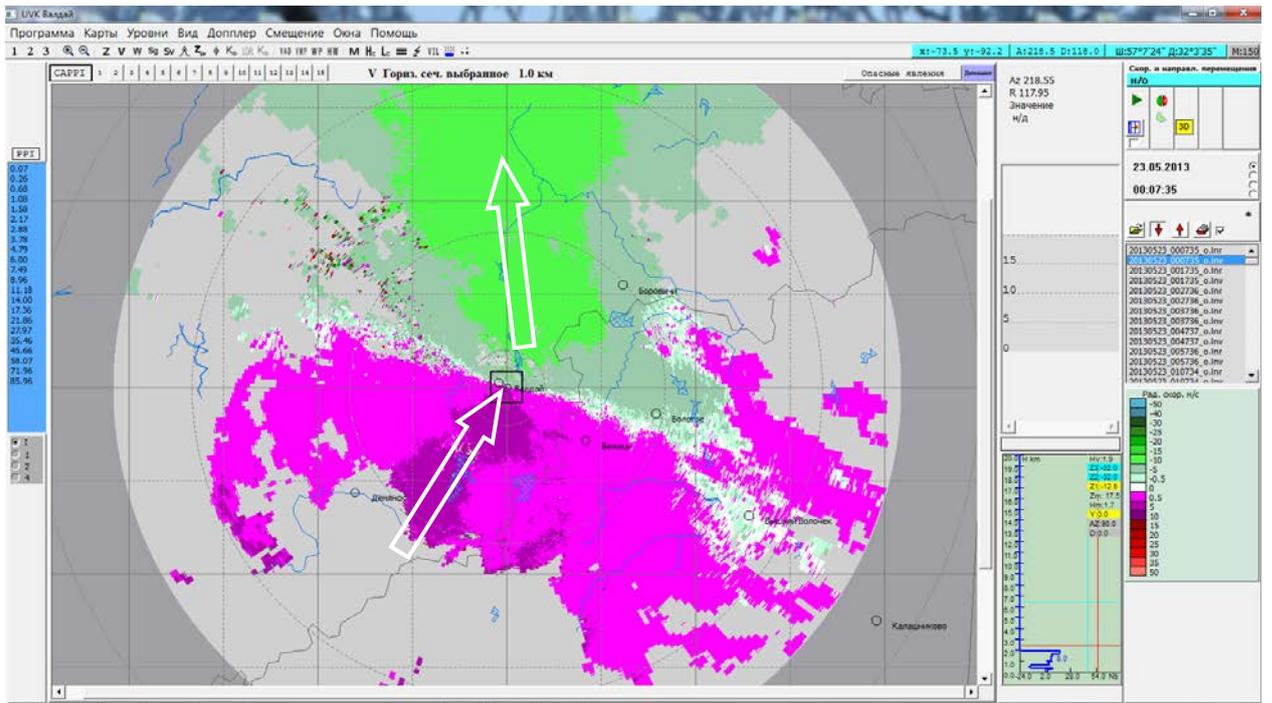


Рисунок 8.26 – Карта радиальных скоростей гидрометеоров в слое 0 - 1,0 км
за 00:07 UTC 23.05.2013

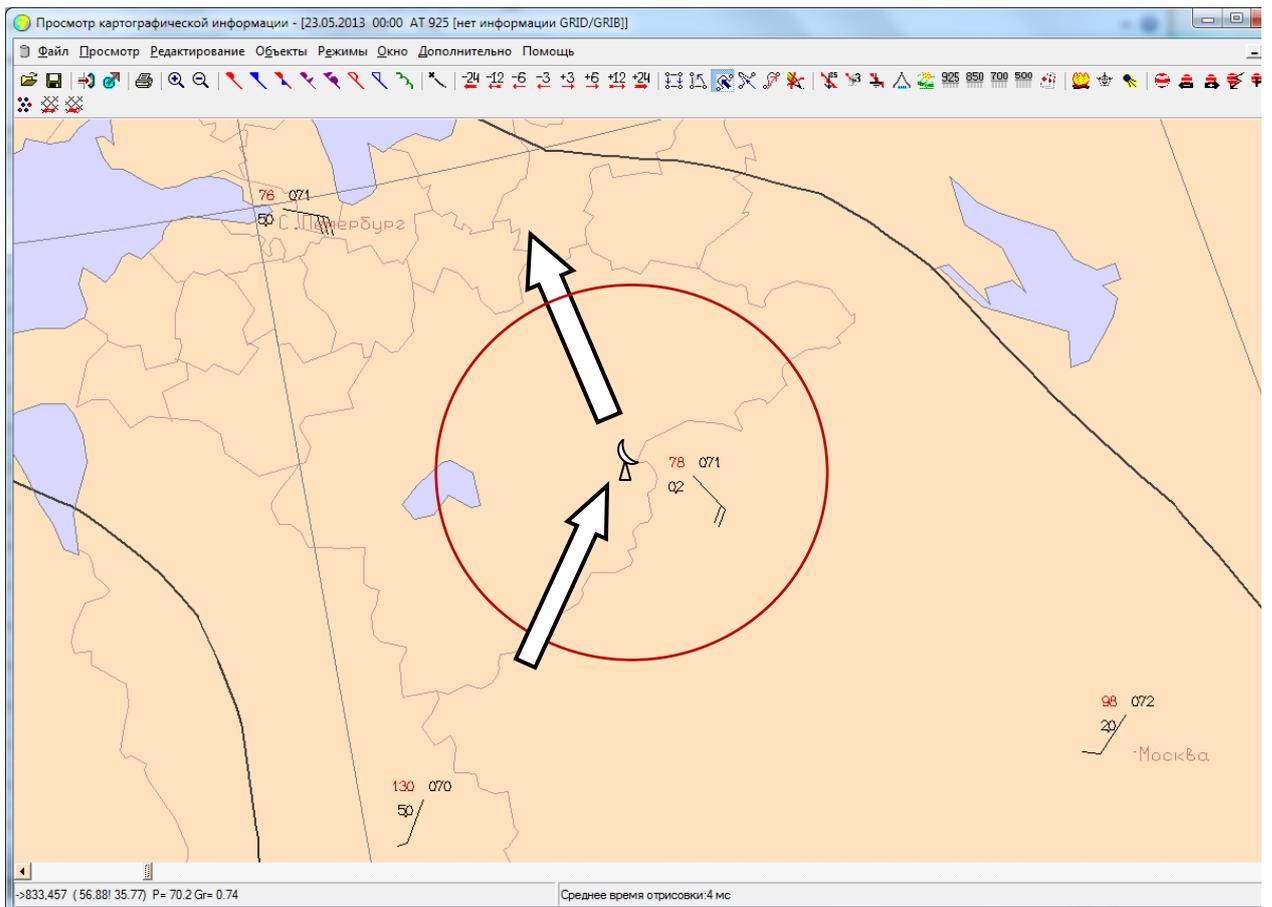


Рисунок 8.27 – Карта абсолютной топографии изобарической поверхности 925 мб
за 00:00 UTC 23.05.2013 в районе Валдая

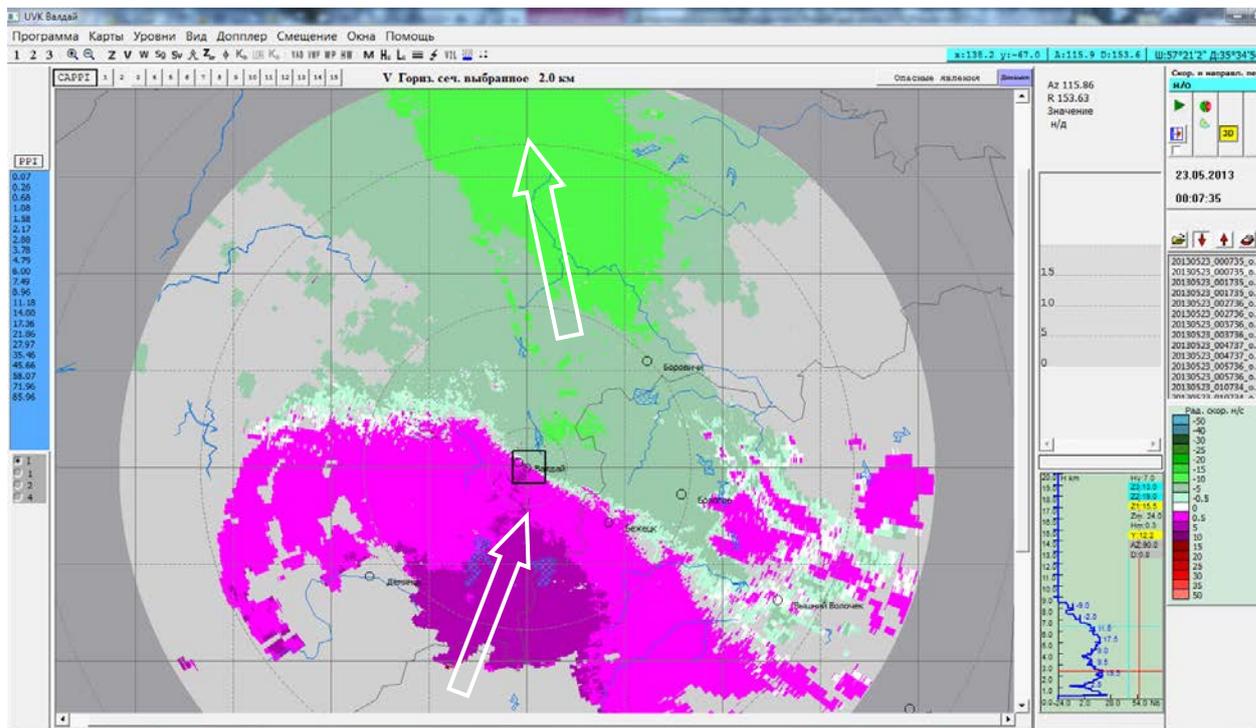


Рисунок 8.28 – Карта радиальных скоростей гидрометеоров в слое 1,0 - 2,0 км
за 00:07 UTC 23.05.2013

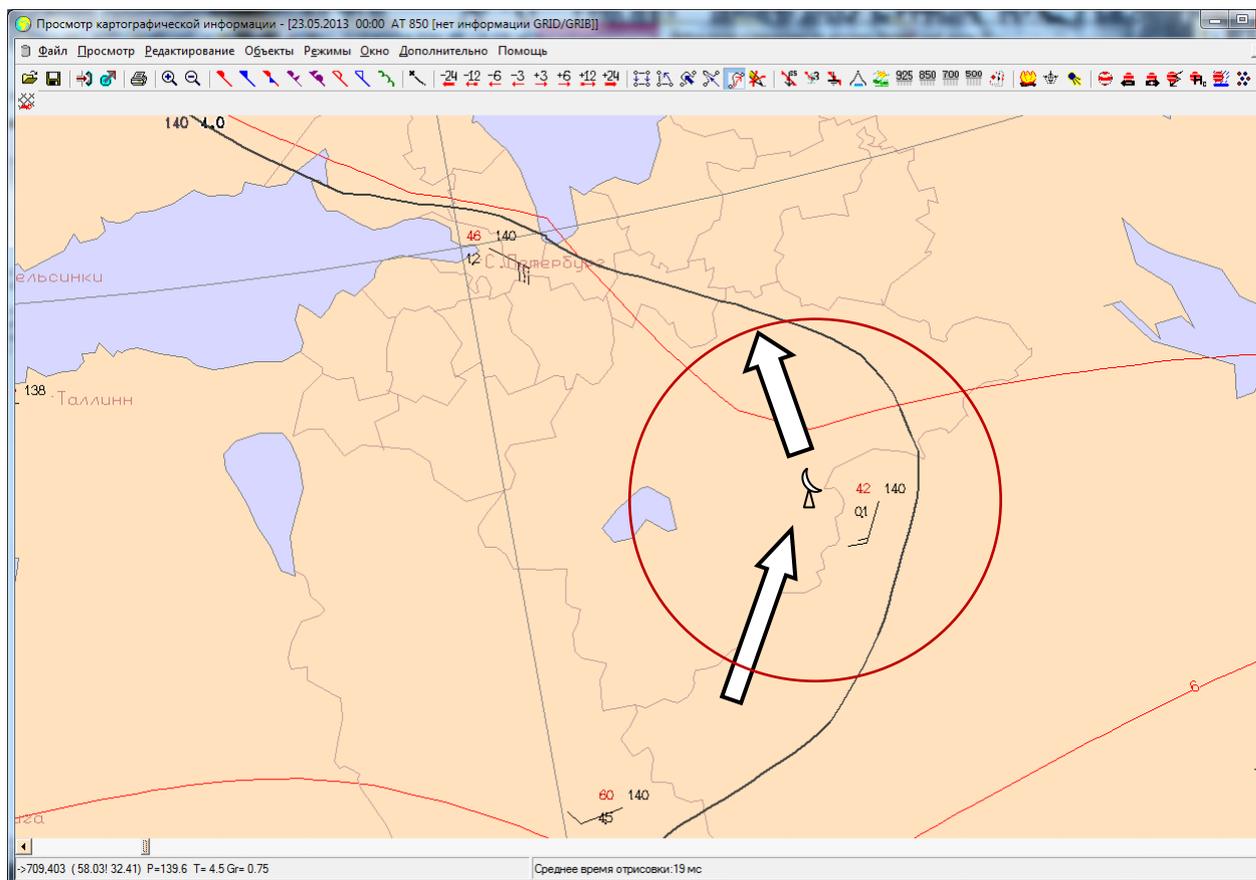


Рисунок 8.29 – Карта абсолютной топографии изобарической поверхности 850 мб
за 00:00 UTC 23.05.2013 в районе Валдая

Точно так же по распределению доплеровских радиальных скоростей гидрометеоров в облаке можно определить и дивергенцию воздушного потока, не привязываясь к данным аэрологического зондирования атмосферы.

В данном разделе рассмотрена лишь принципиальная возможность использования информации о доплеровской радиальной скорости, полученной с помощью ДМРЛ-С, в оперативной практике синоптика. Большой круг вопросов, связанных с пространственным распределением радиальной компоненты доплеровской скорости вблизи, например, центра циклона, оси глубокой ложбины, дивергенции воздушного потока, фронтального раздела, не может быть освещен ввиду скудности архива достоверных наблюдений ДМРЛ-С, имеющегося в распоряжении ФГБУ «ГГО». В 2014 году, по мере установки ДМРЛ-С на новых позициях в разных климатических зонах РФ, а также истечения срока опытной эксплуатации уже установленных образцов ДМРЛ-С, ситуация должна измениться в лучшую сторону и данный раздел будет дополняться новыми примерами.

Приложение 1

Перечень организаций, отзывы которых направлены в ФБГУ «ГГО»

- 1 **ФБГУ «Ставропольский ЦГМС»** (Федеральное Государственное бюджетное учреждение «Ставропольский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»).
- 2 **ФБГУ «Волгоградский ЦГМС»** (Федеральное Государственное бюджетное учреждение «Волгоградский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»).
- 3 **ФБГУ «Приморское УГМС»** (Федеральное Государственное бюджетное учреждение «Приморское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»).
- 4 **ФБГУ «Приволжское УГМС»** (Федеральное Государственное бюджетное учреждение «Приволжское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»).
- 5 **ФБГУ «Карельский ЦГМС»** (Федеральное Государственное бюджетное учреждение «Карельский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»).
- 6 **ФГБУ «УГМС Республики Татарстан»** (Федеральное Государственное бюджетное учреждение «Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Республики Татарстан»).
- 7 **ФГБУ «ГАМЦ Росгидромета»** ФБГУ «Главный авиаметеорологический Центр Росгидромета»).
- 8 **«ВНИИСХМ Россельхозакадемии»** (Федеральное Государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии Российской академии сельскохозяйственных наук»).
- 9 **ФГБУ «ВГИ»** (Федеральное государственное бюджетное учреждение "Высокогорный геофизический институт").
- 10 **«ОЛАГА»** (Ордена Ленина Академия гражданской авиации).
- 11 **МГУ имени М.В.Ломоносова** (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова).

- 12 **«ПГНИУ»** (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»).
- 13 **Военно-космическая академия им. А.Ф.Можайского** (Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского» Министерства обороны Российской Федерации).
- 14 **ФГБУ «ЦАО»** (Федеральное Государственное бюджетное учреждение «Центральная аэрологическая обсерватория»).
- 15 **«РГГМУ»** (Федеральное Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский Государственный гидрометеорологический университет»).
- 16 **ФГБУ «Смоленский ЦГМС»** (Федеральное Государственное бюджетное учреждение «Смоленский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»).
- 17 **ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета»** (Федеральное Государственное бюджетное учреждение «Авиаметтелеком Росгидромета»).

Библиография

- 1 Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. СПб: Гидрометеиздат, 1993, 356 с.
- 2 Бочарников Н. В., Брылев Г.Б. и др. Автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы «Метеор – Метеоячейка». Институт радарной метеорологии. СПб: Гидрометеиздат, 2006, 197с.
- 3 Базлова Т.А., Бочарников Н. В., Брылев Г.Б. и др. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети. Институт радарной метеорологии. СПб: Гидрометеиздат, 2002, 331с.
- 4 Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. Л.: Гидрометеиздат, 1988, 512 с.
- 5 Программное обеспечение вторичной обработки информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С (шифр «Гимет 2010»). Описание программы. 2011, 108 с.
- 6 Российский Гидрометеорологический Энциклопедический словарь, том I-III, 2009.
- 7 Руководство по сдвигу ветра на малых высотах. Международная организация гражданской авиации, 2005, 258 с.
- 8 Авиационные факторы риска. ВМО. Программа обучения и подготовки. Женева, 2007.
- 9 Расследование авиационных происшествий и инцидентов, связанные с метеорологическим факторами.
- 10 Руководство по практике метеорологических подразделений, обслуживающих авиацию. Второе издание. ВМО, №732, 2003.
- 11 Богаткин О.Г. Авиационная метеорология. СПб: Изд. РГГМУ 2005, 328 с.
- 12 Методическое письмо об итогах работы в 2012 году функционирующей сети «МРЛ-Штормооповещения» и сети доплеровских метеорологических радиолокаторов С-диапазона (ДМРЛ-С), создаваемой в рамках ФЦП. Санкт-Петербург, 2013 г.
- 13 Приказ Руководителя Росгидромета А. И. Бедрицкого № 95 от 21.06.2004 г. “Основные технические требования к системе обнаружения опасных атмосферных явлений и штормового оповещения на базе метеорологических радиолокаторов”.
- 14 Мельников В. М. Обработка информации в доплеровских МРЛ Зарубежная радиоэлектроника, 1993, № 4.- с. 35-42.
- 15 Рыжков А.В. Поляризационная селекция в доплеровских метеорологических РЛС. – Труды ГГО, 1991, вып.535.

- 16 Рыжков А. В. Поляризационные методы метеорологической радиолокации — Зарубежная радиоэлектроника, 1993, № 4.
- 17 Брылев Г.Б., Шведов В.В. радиолокационные критерии грозоопасности в оперативной практике. В кн.: Радиолокационная метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1982, с.144 – 154.
- 18 Брылев Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминова Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1986, 219 с.
- 19 Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary Scales, Journal of the Atmospheric Sciences, Fujita, 1981.
- 20 NASA Contractor Report CR-204381 «Report on the Radar/PIREP Cloud Top Discrepancy Study» 1997.
- 21 Радиолокатор метеорологический доплеровский ДМРЛ –С.
Руководство по эксплуатации. Части 1-6.
- 22 Словарь ветров. Ленинград. Гидрометеиздат. Л.З. Прох.1983.