



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

На тему: «Исследование аномальных отражений на сети штормоповещения
Российской Федерации»

Исполнитель Копылова Софья Дмитриевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель доктор физико-математических наук
(ученая степень, ученое звание)

Жуков Владимир Юрьевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

«8» июня 2026года

Санкт-Петербург
2026

Оглавление

Введение	2
Глава 1. Принципы поляриметрического зондирования	4
1.1. Роли и задачи современной метеорологической радиолокации	4
1.2. Принцип доплеровского измерения скорости	5
1.3. Принцип двойной поляризации	6
1.4. Поляриметрические параметры	7
Глава 2. Обнаружение и классификация радиолокационных целей методами двойной поляризации	8
2.1. Проблема неметеорологических отражений	8
2.2. Дифференциальная отражаемость (z_{dr}) при идентификации целей	8
2.3. Коэффициент взаимной корреляции (ρ_{hv}) при идентификации целей	9
2.4. Алгоритм классификации гидрометеоров	10
2.5. Поляриметрическое обнаружение отдельных типов гидрометеоров	11
Глава 3. Постановка вопроса исследования	14
3.1. Доказательная база в ранних исследованиях	14
3.2. Недостаточность существующих методов	16
Глава 4. Установление природы отражателей	18
4.1. Ограничения исходных данных и методы их обработки	19
4.2. Расчёт компонент суммарного движения по радиолокационным данным	22
4.3. Методика покомпонентного расчёта	25
Глава 5. Исследование влияния динамических характеристик атмосферы на модуляцию дифференциальной отражаемости	29
5.1 Влияние высокой скорости ветра на отсутствие модуляции	30
5.2 Влияние поворота ветра на отсутствие модуляции	34
5.3. Анализ сводных результатов и обсуждение необъяснённых случаев	41
Заключение	44
Список литературы	46

Введение

Метеорологическая радиолокация на протяжении последних десятилетий остаётся одним из ключевых инструментов оперативного мониторинга атмосферы. Внедрение доплеровских радаров двойной поляризации (ДМРЛ-С) существенно расширило аналитические возможности: наряду с традиционной отражаемостью они позволяют измерять дифференциальную отражаемость (Z_{DR}), коэффициент взаимной корреляции (ρ_{hv}) и радиальную скорость целей. Тем не менее практическая интерпретация получаемых данных по-прежнему сопряжена с рядом нерешённых задач, одной из которых является надёжная идентификация неметеорологических целей.

В ходе оперативного использования данных ДМРЛ-С в тёплое время года, с мая по сентябрь, на картах радиальных скоростей в нижнем слое атмосферы регулярно фиксируются отражения, которые одновременно отсутствуют на картах радиолокационной отражаемости. Подобные аномалии наблюдаются преимущественно в дневные часы при ясной погоде, что однозначно указывает на их неметеорологическое происхождение. Основная гипотеза, получившая обоснование в предшествующих исследованиях, состоит в том, что источником таких сигналов являются насекомые, летящие в упорядоченном потоке.

Стандартным радиолокационным признаком биологических объектов считается модуляция параметра дифференциальной отражаемости — закономерное изменение Z_{DR} в зависимости от азимута антенны, обусловленное вытянутой формой тела насекомых и их единообразной пространственной ориентацией. Вместе с тем в практике радиолокационных наблюдений был выявлен значительный массив случаев, когда аномальные цели на картах скоростей присутствуют, а модуляция Z_{DR} при этом отсутствует.

Актуальность работы определяется отсутствием на сегодняшний день утверждённых алгоритмов, позволяющих оперативно и надёжно

разграничивать отражения от биологических объектов (насекомых, птиц), метеорологических явлений и техногенных помех. Действующие методики фильтрации, нацеленные на получение «чистых» карт отражаемости, нередко отбраковывают биологические сигналы как шум, что ведёт к потере информации о реальных атмосферных процессах. Разработка физически обоснованных критериев распознавания неметеорологических целей создаст предпосылки для последующей автоматизации классификации и повышения качества радиолокационной информации в целом.

Целью данной работы является исследование динамических факторов атмосферы, влияющих на отсутствие модуляции дифференциальной отражаемости при наблюдении биологических целей.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Подтверждение биологической природы наблюдаемых отражателей на основе расчёта их собственной скорости методом векторного вычитания;
- 2) Формирование и статистический анализ выборки радиолокационных наблюдений за период с 20 июня по 8 сентября 2024 года (116 случаев);
- 3) Проверка гипотезы о влиянии высокой скорости ветра на дезориентацию насекомых и исчезновение модуляции Z_{DR} ;
- 4) Проверка гипотезы о влиянии вертикального поворота ветра на нарушение упорядоченной ориентации биологических целей;
- 5) Выявление и анализ случаев, не объяснённых рассмотренными факторами, и определение направлений дальнейших исследований.

Объектом исследования являются аномальные радиолокационные отражения. Предметом исследования выступают динамические характеристики воздушной среды — скорость ветра и изменение направления с высотой с высотой.

Глава 1. Принципы поляриметрического зондирования

1.1. Роли и задачи современной метеорологической радиолокации

Метеорологические радиолокационные станции работают по активному принципу: передатчик излучает короткий зондирующий импульс, антенна переключается на приём, и регистрируется сигнал, отражённый от гидрометеоров. По характеристикам принятого эхо-сигнала можно судить о расположении, размерах и движении облаков и осадков.

Главное преимущество радиолокационного метода перед контактными наблюдениями – возможность охватить одновременно огромную территорию в режиме реального времени. По данным Степаненко, одна станция обеспечивает обзор площади в тысячи квадратных километров, а полный цикл сканирования занимает не более нескольких минут [13]. Никакая сеть наземных датчиков не способна обеспечить такое пространственное покрытие при сопоставимом временном разрешении.

Переход к доплеровским радарам, а затем к радарам с двойной поляризацией (ДМРЛ-С) существенно расширил круг решаемых задач. Если традиционный МРЛ измерял только отражаемость, то есть, по сути, количество и размер частиц в луче, то ДМРЛ-С дополнительно измеряет скорость движения рассеивателей и их форму. Практическая ценность заключается в:

1. Улучшение качества радарных измерений

- Автоматическая самокалибровка радара
- Надежная коррекция сигнала на ослабление в осадках
- Устойчивость к частичному блокированию луча препятствиями
- Очень эффективное распознавание и фильтрация сигналов от неметеорологических рассеивателей (местники, птицы, насекомые и т.п.)

2. Уникальная способность автоматического распознавания типа гидрометеоров, что включает:

- Детектирование града с высокой точностью

- Детектирование торнадо
- Различение между дождем и снегом
- Обледенение

3. Высокая точность измерения осадков (летних и зимних)

4. Качественный прорыв в понимании микрофизических процессов в облаках и осадках, что приведет к коренному улучшению микрофизической параметризации в мезомасштабных моделях погоды (главное ограничение в существующих моделях)

1.2. Принцип доплеровского измерения скорости

В основе доплеровского метода лежит эффект Доплера: если рассеиватель движется относительно радара, то частота отражённого сигнала отличается от частоты излучённого. Это отличие называется доплеровским сдвигом частоты и определяется по формуле:

$$f_d = 2v_r / \lambda, \quad (1.2.1)$$

где v_r – радиальная составляющая скорости рассеивателя (проекция вектора скорости на направление луча), λ – длина волны радара [14]. Знак сдвига указывает направление движения: приближение даёт положительный сдвиг, удаление – отрицательный.

Важно понимать, что радар измеряет не скорость конкретной капли, а среднюю радиальную скорость всей группы рассеивателей в разрешаемом объёме. Эта средняя скорость отражает в первую очередь ветер – горизонтальный перенос, который несёт гидрометеоры. Помимо средней скорости, из анализа спектра доплеровских частот можно извлечь его ширину σ_v , которая характеризует разброс скоростей внутри объёма – турбулентность и неоднородность движения частиц.

Существенное ограничение метода состоит в том, что доплеровский сдвиг связан только с радиальной составляющей скорости. Тангенциальное движение (перпендикулярное лучу) радар не видит. Поэтому по данным одного локатора восстановить полный вектор ветра невозможно – для этого нужно как минимум три станции, зондирующих один объём с разных

направлений. Тем не менее карты радиальных скоростей уже содержат богатую информацию о структуре ветрового поля и направлении переноса атмосферных образований.

Для реализации доплеровских измерений система должна быть когерентной, то есть сохранять информацию о фазе излучённого импульса до момента приёма отражённого сигнала. Именно разность фаз между последовательными импульсами несёт информацию о скорости целей. [12].

1.3. Принцип двойной поляризации

Обычный радар излучает волну одной поляризации – как правило, горизонтальной. ДМРЛ-С одновременно излучает и принимает сигналы двух ортогональных поляризаций: горизонтальной (H) и вертикальной (V). Физический смысл заключается в том, что, если частицы несферические и ориентированы неслучайно, они будут по-разному рассеивать волны разных поляризаций. Анализируя разницу в откликах на H и V, можно судить о форме и ориентации целей.

В современных оперативных системах применяется схема одновременного излучения и приёма: мощность передатчика делится поровну между двумя ортогональными каналами. Это требует двух независимых приёмных трактов с тщательно согласованными характеристиками. К антенне предъявляются жёсткие требования: диаграммы направленности для H и V поляризаций должны быть идентичны в пределах главного лепестка, уровень боковых лепестков должен быть не выше -30 дБ, уровень кросс-поляризации – не выше -32 дБ. Кроме того, для таких систем не подходят стандартные обтекатели в виде «апельсиновых долек» - их конструкция вносит искажения поляриметрических параметров, поэтому используются панели с хаотически расположенными стыками.

Основным недостатком схемы является снижение чувствительности на 3 дБ по сравнению с однополяризационным радаром той же мощности, поскольку мощность делится между двумя каналами. Тем не менее

преимущества – отсутствие высокомоощного поляризационного переключателя, более высокая точность поляриметрических параметров и простота разделения доплеровских и поляриметрических эффектов – делают эту схему стандартной для современных оперативных ДМРЛ-С.

1.4. Поляриметрические параметры

В дополнение к стандартным доплеровским характеристикам (отражаемость (Z), средняя скорость (V) и ширина спектра (σ_v)) ДМРЛ-С измеряет три поляриметрических параметра.

Дифференциальная отражаемость Z_{DR} – это отношение факторов радиолокационной отражаемости на горизонтальной и вертикальной поляризациях, выраженное в логарифмическом масштабе:

$$Z_{DR} = Z_h / (Z_v), \quad (1.4.1)$$

где Z_h и Z_v – факторы эквивалентной радиолокационной отражаемости на горизонтальной и вертикальной поляризациях соответственно. Z_{DR} отражает форму и ориентацию частиц: для сплюснутых горизонтально ориентированных объектов $Z_{DR} > 0$ дБ, для сферических или хаотически ориентированных – $Z_{DR} \approx 0$ дБ.

Удельная дифференциальная фаза K_{DP} – производная по дальности от разности фаз между H и V сигналами. K_{DP} не зависит от калибровки радара и ослабления сигнала в осадках, что делает её наиболее надёжным параметром для количественного измерения интенсивности дождя [3].

Коэффициент взаимной корреляции ρ_{hv} характеризует, насколько однородны рассеиватели в разрешаемом объёме. Для однотипных гидрометеоров ρ_{hv} близок к 1 (0,97–0,99). Если в одном объёме присутствуют частицы разных типов, форм или ориентаций, ρ_{hv} заметно снижается.

Глава 2. Обнаружение и классификация радиолокационных целей методами двойной поляризации

2.1. Проблема неметеорологических отражений

В оперативной работе с данными ДМРЛ-С наряду с метеорологическими объектами на картах радиолокационной информации регулярно появляются так называемые неметеорологические цели – отражения от наземных сооружений, птиц, насекомых или от аномальных условий распространения радиоволн. Если не фильтровать такие сигналы, они искажают карты осадков и поля ветра, что приводит к ошибкам в прогнозе.

В традиционной однополяризационной радиолокации для выявления таких помех использовались косвенные признаки: постоянство отражений во времени, нетипичная пространственная структура, слишком резкие градиенты отражаемости. Однако биологические объекты, такие как: птицы и насекомые – постоянно движутся и могут давать картину, внешне напоминающую слабые осадки. Поляриметрические параметры позволяют решить эту задачу принципиально иначе: они несут прямую информацию о форме целей, которая у гидрометеоров и биологических объектов существенно различается.

2.2. Дифференциальная отражаемость (Z_{DR}) при идентификации целей

Дифференциальная отражаемость отражает среднюю форму частиц в разрешаемом объёме. Дождевые капли при падении принимают сплюснутую форму – горизонтальный размер у них больше вертикального, причём тем заметнее, чем крупнее капля. Поэтому для дождя Z_{DR} положительна и растёт с размером частиц, достигая 4–5 дБ для крупных капель. Для сухого снега, крупы и крупного сухого града Z_{DR} близка к нулю, так как эти частицы либо сферичны, либо ориентированы хаотично. Мокрый снег в зоне таяния, напротив, характеризуется повышенными значениями Z_{DR} .

Принципиально иначе ведут себя биологические объекты. Тело насекомого сильно вытянуто – горизонтальный размер значительно превышает вертикальный. Это приводит к аномально высоким значениям Z_{DR}

как правило, выше 5–7 дБ, что принципиально недостижимо для любых гидрометеоров. Именно это свойство является главным поляриметрическим признаком биологических целей.

Местные предметы с вертикальной ориентацией: опоры, мачты, трубы – дают $Z_{DR} < 0$ дБ, то есть вертикальная составляющая отражаемости у них больше горизонтальной. Это позволяет надёжно отличать их от осадков и биологических целей.

На рисунке 2.2.1. изображен пример карты дифференциальной отражаемости.

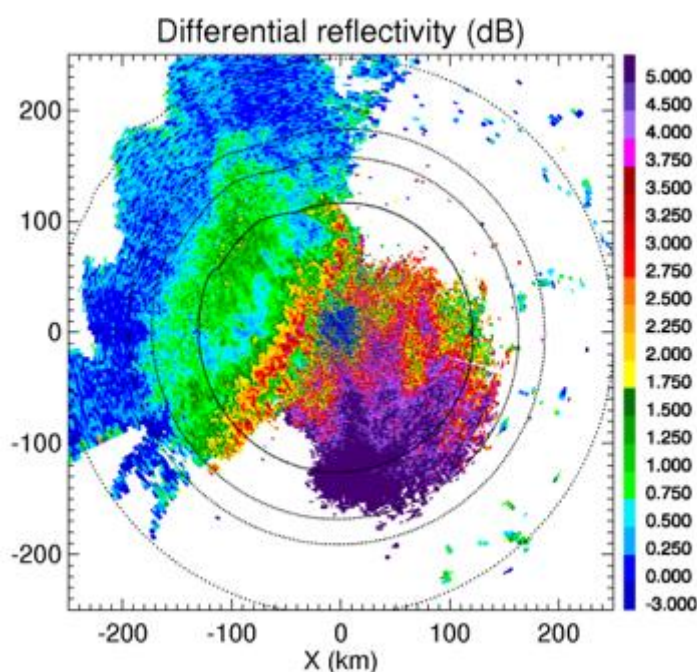


Рис.2.2.1 Карта дифференциальной отражаемости

2.3. Коэффициент взаимной корреляции ρ_{hv} при идентификации целей

Если дифференциальная отражаемость говорит о средней форме объектов, то коэффициент взаимной корреляции отражает их однородность. Для группы одинаковых частиц, например, капель дождя примерно одного размера – ρ_{hv} близок к единице (0,97–0,99). Как только в разрешаемом объёме оказываются объекты с сильно различающимися формами и ориентациями, ρ_{hv} падает.

Для биологических целей ρ_{hv} , как правило, заметно ниже 0,90, нередко в районе 0,60–0,80. Это объясняется тем, что даже в плотном скоплении насекомые и птицы обладают существенным разбросом форм, размеров и диэлектрических свойств. Снижение ρ_{hv} ниже порогового значения – один из стандартных признаков, по которому алгоритмы классификации относят сигнал к метеорологическим целям.

Помимо биологических объектов, коэффициент взаимной корреляции снижается в зоне таяния. Там одновременно присутствуют частицы в разных стадиях таяния: снежинки, мокрые агрегаты и капли. Их сильно различающиеся диэлектрические свойства и формы дают ρ_{hv} порядка 0,85–0,90. Таким образом, пространственная структура поля ρ_{hv} позволяет не только выявлять метеорологические цели, но и определять высоту нулевой изотермы.

На рисунке 2.3.1. изображен пример карты дифференциальной отражаемости.

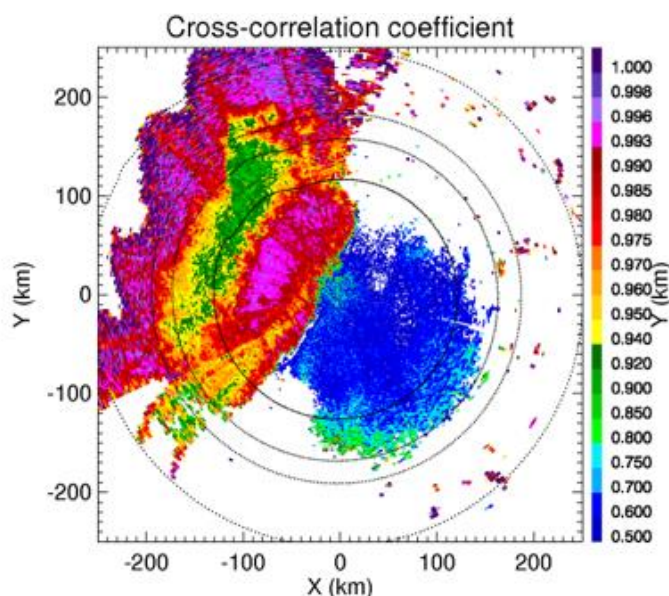


Рис.2.3.1. Карта коэффициента взаимной корреляции

2.4. Алгоритм классификации гидрометеоров

Практическая классификация типов радарного эхо в ДМРЛ-С осуществляется с помощью алгоритмов – НСА (Hydrometeor Classification Algorithm). Алгоритм одновременно анализирует шесть параметров: Z , Z_{DR} ,

K_{DP} , ρ_{hv} , а также текстурные характеристики $SD(Z)$ и $SD(\Phi DP)$ – пространственный разброс отражаемости и дифференциальной фазы в окрестности каждой точки. Текстурные параметры помогают отличить гладкие поля осадков от пятнистых, неоднородных отражений, характерных для неметеорологических объектов.

Оперативная версия алгоритма выделяет следующие классы: местники и аномальное распространение (GC/AP), биологические рассеиватели (BS), сухой снег (DS), мокрый снег (WS), ледяные кристаллы (CR), ледяная крупа (GR), крупные капли (BD), слабый и умеренный дождь (RA), сильный дождь (HR) и град (HA).

Биологические рассеиватели (BS) в этом алгоритме определяются по совокупности признаков: умеренная отражаемость Z (обычно 5–30 дБ), аномально высокая Z_{DR} ($> 4-5$ дБ), малые значения K_{DP} , пониженный ρ_{hv} ($< 0,85$) и высокая пространственная вариабельность. Такая комбинация достаточно специфична, чтобы надёжно отделять биологические цели от осадков в большинстве случаев.

2.5. Поляриметрическое обнаружение отдельных типов гидрометеоров

Наряду с идентификацией неметеорологических целей поляриметрические параметры позволяют значительно улучшить качество диагностики самих гидрометеоров.

Обнаружение града – один из наиболее показательных примеров. Традиционный метод, основанный только на пороге по отражаемости ($Z > 45$ дБ), давал вероятность обнаружения (POD) 88% и долю ложных тревог (FAR) = 39%. Поляриметрический алгоритм, использующий совместно Z , Z_{DR} и ρ_{hv} , улучшил эти показатели до POD = 100% и FAR = 11%. Физически это объясняется тем, что крупный сухой град характеризуется высокой Z , но $Z_{DR} \approx 0$ дБ (градины крупные, но ориентированы хаотично) и пониженным ρ_{hv} . Такое сочетание трёх параметров однозначно указывает на твёрдые осадки.

Зона таяния в поле Z (рисунок 2.5.1) выглядит как поле повышенной отражаемости на высоте нулевой изотермы. В полях Z_{DR} и ρ_{hv} (рисунок 2.5.2. и 2.5.3) она проявляется значительно чётче, в виде кольца. Это делает поляриметрические данные основным инструментом для надёжного определения высоты нулевой изотермы — важной характеристики как для авиации, так и для прогноза опасных явлений.

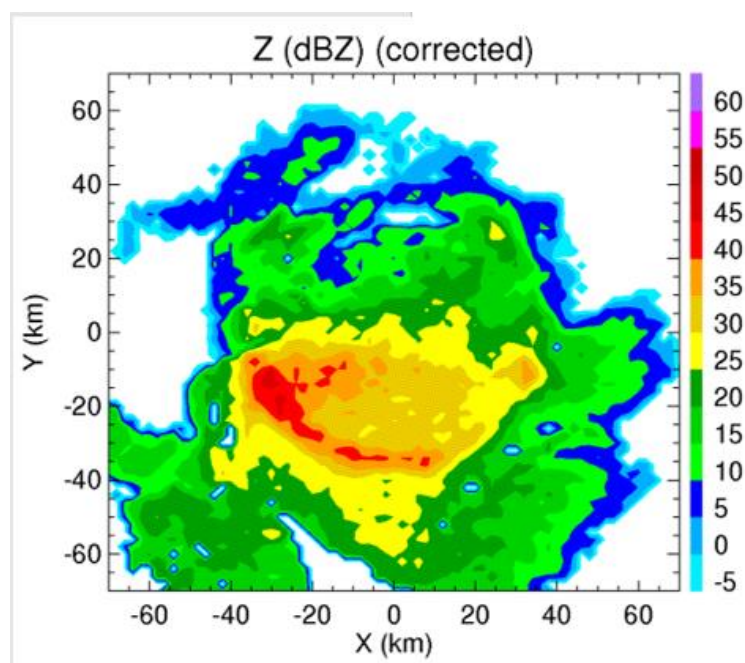


Рис.2.5.1. Карта радиолокационной отражаемости зоны таяния

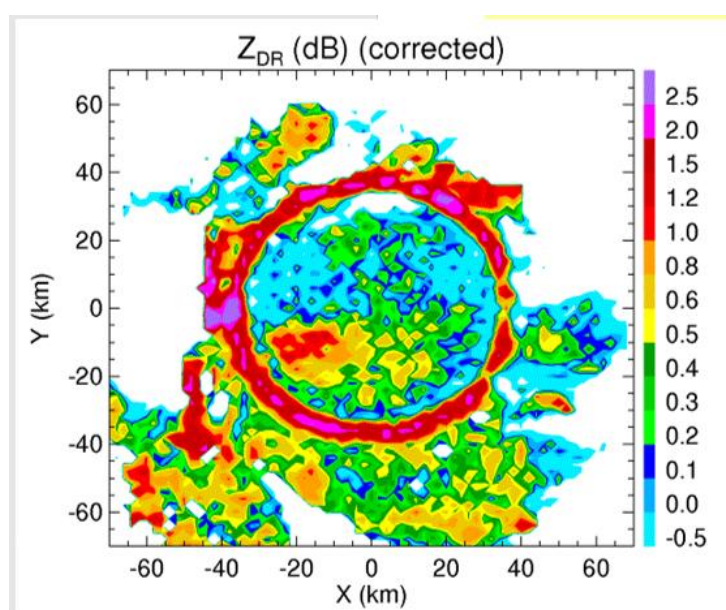


Рис.2.5.2. Карта дифференциальной отражаемости зоны таяния

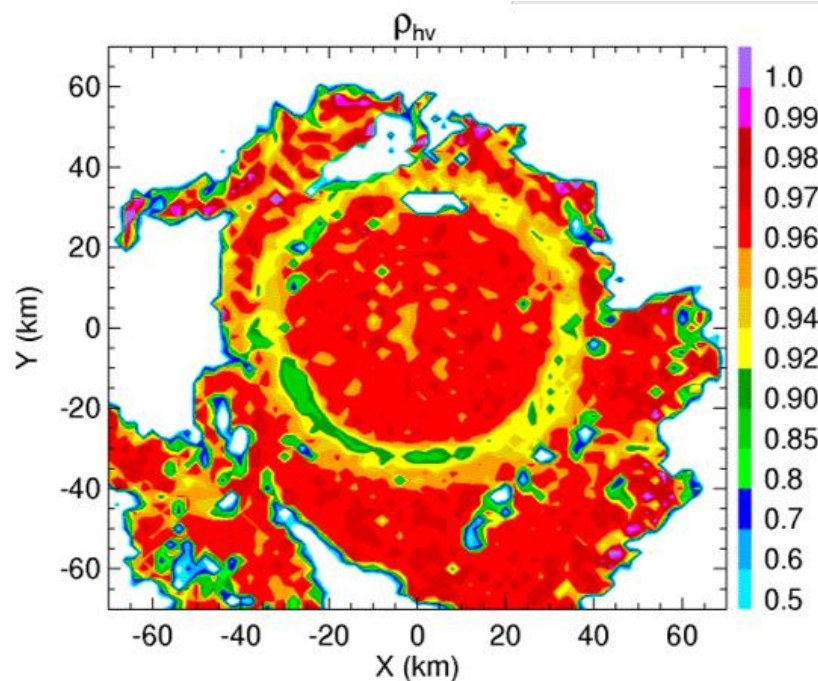


Рис.2.5.3. Карта коэффициента взаимной корреляции зоны таяния

С точки зрения авиационной безопасности ДМРЛ-С открывает ещё ряд возможностей. По пространственной структуре Z_{DR} и ρ_{hv} можно выявить зоны ледяных кристаллов на больших высотах, которые могут нарушить работу двигателя. Аномалии Z_{DR} в вершинах конвективных облаков служат ранним признаком интенсивных восходящих потоков и позволяют прогнозировать усиление конвекции на несколько десятков минут вперёд. Также, совместный анализ параметров помогает выявлять зоны переохлаждённых капель и потенциального обледенения — задачу, которую традиционный МРЛ решить не мог.

Таким образом, поляриметрические параметры дифференциальная отражаемость (Z_{DR}), удельная дифференциальная фаза (K_{DP}) и коэффициент взаимной корреляции (ρ_{hv}) в совокупности с отражаемостью (Z) и доплеровскими характеристиками формируют базу инструментов, которая позволяет решать задачи идентификации и классификации радиолокационных целей на качественно ином уровне по сравнению с традиционной радиолокацией.

Глава 3. Постановка вопроса исследования

В практике оперативного использования данных ДМРЛ-С в весенне-летний период регулярно обнаруживается явление, при котором в нижнем слое атмосферы (до 1–1,5 км) фиксируются отчетливые отражения на картах радиальных скоростей, в то время как на картах отражаемости (Z) сигнал практически отсутствует. Данные цели наблюдаются преимущественно в дневные часы при отсутствии облачности, что позволяет классифицировать их как отражения от неметеорологических целей.

Ключевым научным вопросом данного исследования является идентификация природы этих объектов. Основная гипотеза предполагает, что источником сигналов выступают насекомые. В радиолокационной метеорологии базовым критерием для подтверждения этой гипотезы считается наличие модуляции на картах дифференциальной отражаемости (Z_{DR}). Под модуляцией понимается закономерное изменение интенсивности сигнала в зависимости от азимута антенны, что обусловлено вытянутой формой тел насекомых и их способностью к упорядоченной ориентации в пространстве.

3.1. Доказательная база в ранних исследованиях

В работе Терещенко Д. И. «Исследование природы аномальных отражений, полученных радаром сети штормооповещения РФ» была представлена методика, подтверждающая биологическую природу аномальных отражений. Его аргументация строилась на анализе геометрических характеристик целей и их поведении относительно воздушных потоков.

Одним из аргументов в его исследовании стало выявление разницы между направлением ветра и ориентацией самих целей. Было установлено, что вектор ветра, фиксируемый на картах радиальных скоростей, часто не совпадает с направлением ориентации целей, которое отображается на картах дифференциальной отражаемости. Это несовпадение векторов является прямым доказательством того, что отражатели являются биологическими

объектами, способными к активному полету (собственному движению), а не просто пассивными частицами, например, семена деревьев.

Кроме того, автор исследования обосновал использование параметра дифференциальной отражаемости (Z_{DR}), как индикатора формы. Поскольку насекомые обладают выраженной вытянутым телом, при наблюдении в плоскости, перпендикулярной их телу, горизонтальная отражаемость значительно превышает вертикальную. Это создает высокие положительные значения Z_{DR} (более 5 дБ), что невозможно для водяных капель. Наличие выраженной модуляции этого параметра при вращении антенны служило в его работе основным подтверждением того, что цели имеют упорядоченную структуру и биологическое происхождение.

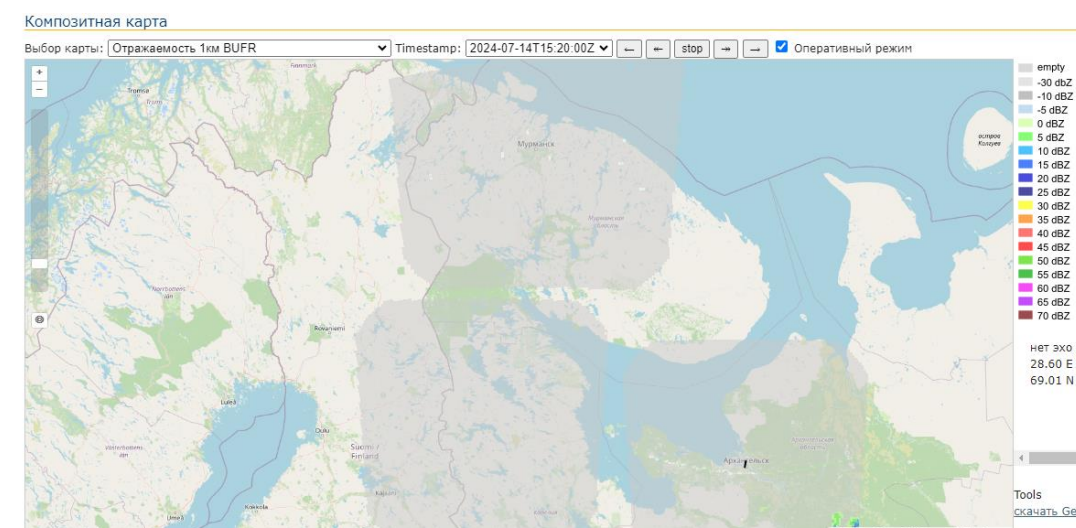


Рис.3.1.1. Карта радиолокационной отражаемости за 14.07.2024

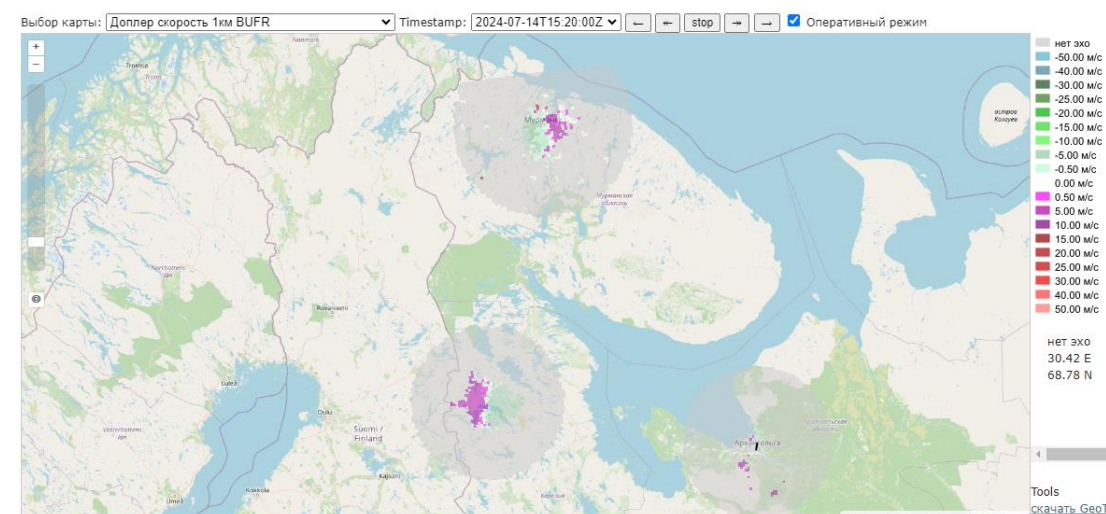


Рис.3.1.2. Карта радиальных скоростей за 14.07.2024

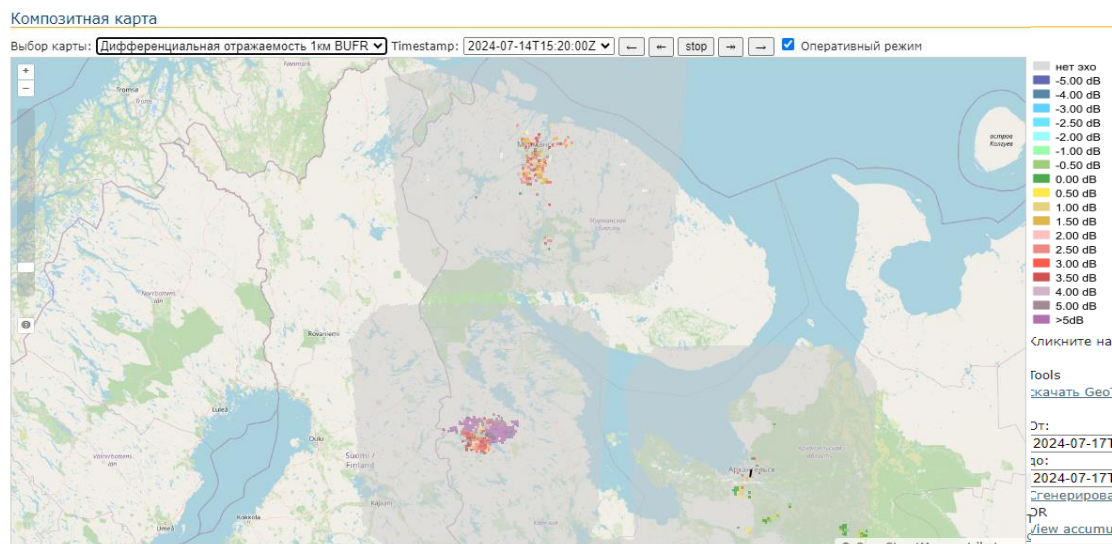


Рис. 3.1.3. Карта дифференциальной отражаемости за 14.07.2026

Оба аргумента можно наглядно увидеть на рисунках 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3. На карте радиолокационной отражаемости не наблюдается никакая отражаемость, в то время как на картах радиальных скоростей цели присутствуют. Это подходит под случаи с аномалиями.

На карте дифференциальной отражаемости для станции Калевала отчётлива наблюдается модуляция со значением выше 5 дБ, что подтверждает наличие ориентированной на юго-юго-запад формы цели. Однако, на карте радиальных скоростей (станция Калевала) направление суммарного движения запад-северо-запад, что отличается от направления целей, из чего можно сделать вывод, что цели не просто дрейфуют в потоке, а движутся в собственном направлении.

3.2. Недостаточность существующих методов

Несмотря на значимость выводов Терещенко Д. И., его методика имеет ограничения применительно к анализу всех архивных данных.

Основная проблема заключается в том, что разработанный им подход опирается на случаи «упорядоченного» полета, когда модуляция выражена ярко. Однако существует значительный массив данных, где цели на картах скоростей присутствуют, а модуляционная структура на картах дифференциальной отражаемости отсутствует. Например, станция Мурманск (рисунки 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3) на карте Z_{DR} модуляция параметра отсутствует, из-

за чего невозможно сравнить направление движения цели с направлением суммарного движения. Это создает проблему: можно ли достоверно классифицировать данные цели как биологические в отсутствие модуляции?

Глава 4. Установление природы отражателей

Прежде чем переходить к главным вопросам исследования, необходимо подтвердить, что источником фиксируемых отражений действительно являются насекомые.

Ключевым доказательством в данном случае выступает именно скорость насекомых, так как, если она окажется много больше природной возможности самих насекомых, под сомнения ставятся исследования предшественников.

Для решения этой задачи используется векторное представление движения. Скорость, фиксируемая радиолокатором ($\vec{W}$), представляет собой сумму двух векторов:

$$\vec{W} = \vec{V} + \vec{U} \quad (4.1)$$

где: $\vec{V}$ — вектор реального ветра; $\vec{U}$ — вектор собственного движения насекомого.

Необходимыми данными для расчёта скоростей насекомых являются вектора скорости и направления суммарного движения, а также вектора направления и скорости реального ветра.

Исходными данными моего исследования являются карты радиолокационной информации, отражающие слой атмосферы 1 километр. Из этого следует, что значения компонент реального ветра наиболее репрезентативны на высоте 500 метров.

Наилучшим источником такой информации для реального ветра являются результаты аэрологического зондирования атмосферы. В моём исследовании использовались данные с сайта американского университета Вайоминга, пример представлен на рисунке 4.1.

Observations for Station 22543 at 12 UTC 29 Jun 2024

MAYMAKSA, AR, RUSSIA

Latitude: 64.620 Longitude: 40.510

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SPED m/s	THTA K	THTE K	THTV K
1010.0	6	28.0	13.0	40	9.35	200	3.0	300.3	328.1	302.0
1000.0	87	25.8	3.8	24	5.02	215	8.0	298.9	314.2	299.9
995.0	131	25.0	3.0	24	4.77	220	11.0	298.6	313.0	299.4
969.0	360	22.5	2.7	27	4.80	215	5.0	298.4	312.9	299.2
925.0	762	18.2	2.2	34	4.85	225	9.0	297.9	312.5	298.8
902.0	976	16.1	1.7	38	4.79	225	9.0	297.9	312.4	298.8
866.0	1321	12.8	0.8	44	4.68	242	8.3	297.9	312.1	298.8
850.0	1478	12.2	-0.8	41	4.24	250	8.0	298.9	311.8	299.7
839.0	1587	12.3	-4.9	30	3.17	260	7.0	300.1	310.0	300.7
829.0	1688	12.4	-8.6	22	2.41	259	7.2	301.3	308.9	301.7
725.0	2794	4.2	-7.8	41	2.93	251	9.8	304.0	313.3	304.6
719.0	2862	4.0	-8.5	40	2.80	250	10.0	304.5	313.4	305.0
700.0	3079	3.2	-10.8	35	2.40	255	11.0	306.0	313.7	306.4
645.0	3736	0.5	-18.2	23	1.42	290	10.0	310.1	314.9	310.4
619.0	4067	-0.9	-21.9	19	1.07	285	10.0	312.2	315.9	312.4
548.0	5016	-7.9	-25.4	23	0.88	270	10.0	315.0	318.1	315.2
500.0	5730	-13.1	-28.1	27	0.76	275	12.0	317.0	319.7	317.2
445.0	6597	-19.4	-33.8	27	0.49	275	14.0	319.8	321.7	319.9
400.0	7390	-25.1	-39.1	26	0.32	275	11.0	322.3	323.5	322.3
379.0	7779	-27.9	-42.9	23	0.23	276	9.5	323.6	324.5	323.6
333.0	8682	-35.0	-48.9	23	0.14	280	6.0	326.1	326.6	326.1
314.0	9092	-38.2	-51.6	23	0.11	235	4.0	327.1	327.6	327.1
300.0	9410	-40.7	-53.7	24	0.09	225	4.0	327.9	328.2	327.9
295.0	9522	-41.7	-54.7	23	0.08	225	4.0	328.1	328.4	328.1
268.0	10164	-47.1	-60.1	22	0.04	254	4.6	329.3	329.5	329.3
250.0	10620	-49.9	-63.9	18	0.03	275	5.0	331.7	331.9	331.8
212.0	11687	-55.7	-68.7	19	0.02	300	5.0	338.7	338.8	338.7
200.0	12060	-55.3	-68.3	19	0.02	305	8.0	345.0	345.1	345.0
187.0	12498	-53.0	-66.3	19	0.03	285	8.0	355.4	355.6	355.5

Рис.4.1 Результаты аэрологического зондирования Архангельска за 29.06.2024

4.1. Ограничения исходных данных и методы их обработки

При формировании единого массива данных для сопоставления результатов радиолокационных и аэрологических наблюдений возник ряд систематических ограничений:

1. Пространственная несовместимость данных (дефицит станций радиозондирования).

Для ряда географических пунктов, по которым имелись архивы данных ДМРЛ-С, прямые данные аэрологического зондирования полностью отсутствовали из-за неравномерности сети станций. Чтобы исключить влияние пространственных погрешностей и неопределённостей в расчёты,

такие пункты были полностью исключены из дальнейшего анализа. Исследование проводилось строго по тем станциям, где радиолокационные и аэрологические архивы были полностью совмещены.

2. Дискретность по высоте (отсутствие фиксированного уровня 500 м).

Данные стандартного радиозондирования атмосферы фиксируются на обязательных (главных) изобарических поверхностях и особых точках (например, уровни 360 м и 762 м для станции Архангельск на рисунке 4.1). Из-за этого значения параметров ветра на целевой высоте $H = 500$ м не представлены в явном виде.

Для преодоления проблемы дискретности по высоте и приведения всех параметров ветра к единому расчетному уровню 500 м была применена методика линейной интерполяции, по следующим формулам 1 и 2.

$$V_{500} = V_{\text{ниж}} + \frac{V_{\text{верх}} - V_{\text{ниж}}}{H_{\text{верх}} - H_{\text{ниж}}} \times (500 - H_{\text{ниж}}), \quad (4.1.1)$$

где: V_{500} – скорость ветра на высоте 500 метров, $V_{\text{ниж}}$, $V_{\text{верх}}$, - значение скорости ветра на ближайших высотах к 500 метрам, $H_{\text{ниж}}$, $H_{\text{верх}}$ – значение ближайших высот к целевой высоте (500 метров).

$$\theta v_{500} = \theta v_{\text{ниж}} + \frac{\theta v_{\text{верх}} - \theta v_{\text{ниж}}}{H_{\text{верх}} - H_{\text{ниж}}} \times (500 - H_{\text{ниж}}), \quad (4.1.2)$$

где: θv_{500} – направление ветра на высоте 500 метров, $\theta v_{\text{ниж}}$, $\theta v_{\text{верх}}$, - значение направления ветра на ближайших высотах к 500 метрам, $H_{\text{ниж}}$, $H_{\text{верх}}$ – значение ближайших высот к целевой высоте (500 метров).

Применение фильтрации пропущенных станций и алгоритма вертикальной интерполяции позволило сформировать репрезентативную и математически однородную выборку для последующего анализа. Пример рассчитанных данных в период с 29.06.2024 по 19.07.2024 представлен в таблице 4.1.1. С полной таблицей расчётов для всех случаев можно ознакомиться в приложении 1.

Таблица 4.1.1

Дата	Город	Реальный ветер направление(θ_v),°(500м)	Реальный ветер скорость(V), м/с(500м)
29.06.2024	Архангельск	218	6,4
	Волгоград	326	10,9
	Воронеж	347	3,0
	Казань	353	7,5
	Махачкала	294	4,8
	Москва	285	2,6
	Пермь	14	9,8
	Ростов	77	5,8
	Самара	353	10,7
	Саратов	11	8,4
	Смоленск	208	3,0
30.06.2024	Казань	287	4,7
	НН	236	2,1
	Пермь	360	6,0
	Самара	351	9,1
	Саратов	331	6,0
	Смоленск	272	3,6
01.07.2024	Самара	334	6,6
03.07.2024	Волгоград	153	5,9
	Воронеж	224	3,7
	Казань	215	3,5
	НН	221	3,8
	Пермь	285	6,0
	Самара	66	4,5
04.07.2024	Волгоград	113	3,8
	Казань	179	4,0
	Пермь	260	5,0
	Петрозаводск	110	2,2
	Самара	121	5,5
10.07.2024	Москва	11	3,7
	НН	351	5,5
	Самара	355	8,5
	Смоленск	37	4,5
14.07.2024	Мурманск	211	5,1
	Самара	360	4,9
15.07.2024	Волгоград	54	5,0
	Казань	336	4,0
	Саратов	281	3,4
	Смоленск	360	2,0
	СПб	277	10,7
16.07.2024	Казань	48	5,6
	Москва	330	5,0
	Мурманск	39	3,1
	НН	102	3,0
	Пермь	54	5,0

	Смоленск	121	2,5
17.07.2024	Архангельск	313	9,0
	Волгоград	34	3,0
	Воронеж	332	4,4
	Петрозаводск	280	3,1
	Самара	58	4,0
	Саратов	85	3,0
18.07.2024	Воронеж	344	4,4
	Саратов	26	5,5
19.07.2024	Архангельск	72	6,9
	Волгоград	330	3,6
	Воронеж	311	8,9
	Казань	288	2,6
	Самара	10	2,9

4.2. Расчёт компонент суммарного движения по радиолокационным данным

Компоненты суммарного движения находятся по картам радиолокационной информации. Для определения направления суммарного движения восстанавливался перпендикуляр от линии нулевых значений радиальной скорости (белая полоса) к центру обзора локатора, а для того, чтобы узнать значение скорости суммарного движения используется шкала справа от карты и берется её максимальное положительное значение.

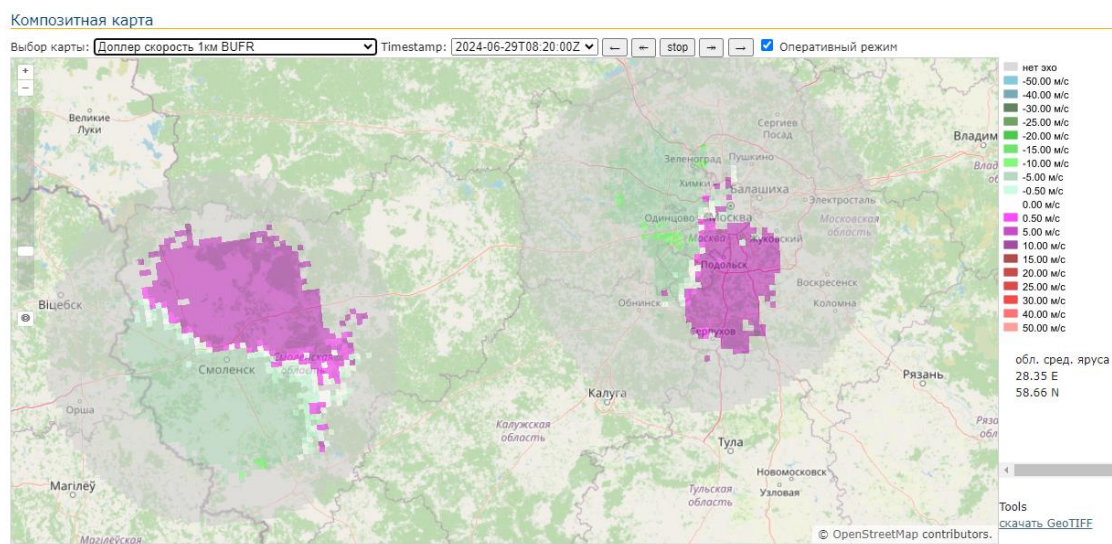


Рис.4.2.1 Карта радиальных скоростей за 29.06.2024

Так, на рисунке 1 можно определить, что направления суммарного движения в городе Смоленске - ССВ, а в городе Москве – ВЮВ, скорости суммарного движения, определяются по шкале справа карты, и для обоих городов

составляют 10 м/с. Также для дальнейших расчётов направление суммарного движения необходимо перевести из румбов в градусы.

Также необходимо учитывать принципиальное различие в системах отсчёта направления, применяемых в радиолокационных измерениях и классической метеорологии. ДМРЛ-С регистрирует вектор скорости, характеризующий направление перемещения цели — то есть указывающий, в какую сторону движутся исследуемые объекты (гидрометеоры). В метеорологической практике, напротив, направление ветра принято определять по стороне горизонта, откуда движется воздушный поток: так, северный ветер представляет собой поток, направленный с севера на юг, и характеризуется углом 0° , тогда как сами частицы физически перемещаются в направлении 180° .

Таким образом, одно и то же физическое явление описывается двумя значениями угла, отличающимися на 180° , что обусловлено различием в определении направления в каждой из систем. Поскольку в данном исследовании проводится сравнение данных ДМРЛ-С с реальными метеорологическими данными о направлении ветра, непосредственное сопоставление радиолокационного вектора скорости с вектором ветра является некорректным и приводит к систематической ошибке. В связи с этим обязательным этапом обработки данных служит вычисление азимута направления суммарного движения, осуществляемое путём прибавления 180° к радиолокационному углу с последующим взятием результата по модулю 360° , что позволяет привести оба показателя к единой системе отсчёта и обеспечить корректность сравнительного анализа.

В таблице 4.2.1 представлены результаты расчётов для случаев в период с 29.06.2024 по 10.07.2024. Такие же расчёты были проведены для всех случаев (приложение 2).

Таблица 4.2.1.

Дата	Город	Суммарное Направление движения, румбы	Суммарное Направление движения, °	Азимут суммарного движения (θ_w), °	Скорость суммарного движения(W), м/с
29.06.2024	Архангельск	СВ	45	225	10
	Волгоград	ЮЮЗ	202,5	22,5	15
	Воронеж	ЮЮВ	157,5	337,5	10
	Казань	ЮЮЗ	202,5	22,5	15
	Махачкала	ЮВ	135	315	15
	Москва	ВЮВ	112,5	292,5	10
	Пермь	ЮЗ	225	45	15
	Ростов	ЗЮЗ	247,5	67,5	10
	Самара	Ю	180	0	15
	Саратов	Ю	180	0	15
	Смоленск	ССВ	22,5	202,5	10
30.06.2024	Казань	ВЮВ	112,5	292,5	10
	НН	В	90	270	10
	Пермь	ЮВ	135	315	15
	Самара	ЮЮВ	157,5	337,5	15
	Саратов	ЮВ	135	315	10
	Смоленск	СВ	45	225	10
01.07.2024	Самара	ЮВ	135	315	10
03.07.2024	Волгоград	СЗ	315	135	10
	Воронеж	ССВ	22,5	202,5	10
	Казань	СВ	45	225	10
	НН	ССВ	22,5	202,5	15
	Пермь	ВСВ	67,5	247,5	10
	Самара	ЗЮЗ	247,5	67,5	10
04.07.2024	Волгоград	СЗ	315	135	15
	Казань	ССЗ	337,5	157,5	10
	Пермь	ВЮВ	112,5	292,5	10
	Петрозаводск	ССЗ	337,5	157,5	15
	Самара	СЗ	315	135	15
10.07.2024	Москва	ЮЗ	225	45	10
	НН	ЮЮЗ	202,5	22,5	10
	Самара	ЮЗ	225	45	15
	Смоленск	ЮЗ	225	45	10
14.07.2024	Мурманск	СВ	45	225	15
	Самара	ЮЮЗ	202,5	22,5	15
15.07.2024	Волгоград	ЮЗ	225	45	10
	Казань	ЮЗ	225	45	10
	Саратов	ЮЗ	225	45	10
	Смоленск	ЮЮЗ	202,5	22,5	10
	СПб	ВЮВ	112,5	292,5	10
16.07.2024	Казань	ЮЗ	225	45	10
	Москва	ЗЮЗ	247,5	67,5	10
	Мурманск	СЗ	315	135	10
	НН	ЮЮЗ	202,5	22,5	10

	Пермь	ЮЗ	225	45	10
	Смоленск	СВ	45	225	10
17.07.2024	Архангельск	ЮВ	135	315	10
	Волгоград	ЮЗ	225	45	5
	Воронеж	ЮЗ	225	45	10
	Петрозаводск	ВЮВ	112,5	292,5	10
	Самара	ЗЮЗ	247,5	67,5	5
	Саратов	ЮЮЗ	202,5	22,5	10
18.07.2024	Воронеж	ВЮВ	112,5	292,5	10
	Саратов	ЮВ	135	315	10
19.07.2024	Архангельск	ЮЗ	225	45	15
	Волгоград	ЮВ	135	315	5
	Воронеж	ЮВ	135	315	5
	Казань	ЗЮЗ	247,5	67,5	5
	Самара	ЗЮЗ	247,5	67,5	10

4.3. Методика покомпонентного расчета

Для получения точного модуля скорости $|U|$ был использован метод разложения векторов на составляющие. Расчет проводился по следующим этапам:

1. Определение компонент реального ветра (V_x, V_y):

На основе интерполированных данных о скорости ($|V|$) и направлении реального ветра (θ_v) на высоте 500 м, были рассчитаны его проекции на оси координат:

$$V_x = - |V| * \sin(\theta_v) \quad (4.3.1)$$

$$V_y = - |V| * \cos(\theta_v) \quad (4.3.2)$$

2. Определение компонент суммарного движения (W_x, W_y):

Аналогично, используя модуль скорости ($|W|$) и азимут движения целей (θ_w) из карт радиальных скоростей, были вычислены проекции суммарного вектора:

$$W_x = - |W| * \sin(\theta_w) \quad (4.3.3)$$

$$W_y = - |W| * \cos(\theta_w) \quad (4.3.4)$$

3. Вычисление компонент собственной скорости (U_x, U_y):

Компоненты вектора собственного движения насекомых определялись как разность соответствующих проекций:

$$U_x = W_x - V_x \quad (4.3.5)$$

$$U_y = W_y - V_y \quad (4.3.6)$$

4. Нахождение итогового модуля скорости насекомых ($|U|$):

Искомая скорость собственного полета насекомых рассчитывалась по формуле 4.3.7:

$$|U| = \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \quad (4.3.7)$$

Результаты расчётов для случаев с 29.06.2024 по 19.07.2024 приведены в таблице 4.3.1. Таблица, отражающая полный набор случаев представлена в приложении 3.

Таблица 4.3.1

Дата	Город	Реальный ветер		Суммарное движение		Насекомые		Скорость насекомых
		V _x	V _y	W _x	W _y	U _x	U _y	
29.06.2024	Архангельск	4,0	5,0	7,1	7,1	3,1	2,1	3,7
	Волгоград	6,1	-9,0	-5,7	-13,9	-11,8	-4,8	12,8
	Воронеж	0,7	-2,9	3,8	-9,2	3,1	-6,3	7,1
	Казань	0,9	-7,4	-5,7	-13,9	-6,7	-6,4	9,3
	Махачкала	4,4	-1,9	10,6	-10,6	6,2	-8,7	10,7
	Москва	2,5	-0,7	9,2	-3,8	6,7	-3,2	7,4
	Пермь	-2,4	-9,5	-10,6	-10,6	-8,2	-1,1	8,3
	Ростов	-5,7	-1,3	-9,2	-3,8	-3,6	-2,5	4,4
	Самара	1,3	-10,6	0,0	-15,0	-1,3	-4,4	4,6
	Саратов	-1,6	-8,2	0,0	-15,0	1,6	-6,8	6,9
	Смоленск	1,4	2,6	3,8	9,2	2,4	6,6	7,0
30.06.2024	Казань	4,5	-1,4	9,2	-3,8	4,7	-2,5	5,3
	НН	1,7	1,2	10,0	0,0	8,3	-1,2	8,3
	Пермь	0,0	-6,0	10,6	-10,6	10,6	-4,6	11,6
	Самара	1,4	-9,0	5,7	-13,9	4,3	-4,9	6,5
	Саратов	2,9	-5,2	7,1	-7,1	4,2	-1,8	4,5
	Смоленск	3,6	-0,1	7,1	7,1	3,5	7,2	8,0
01.07.2024	Самара	2,9	-5,9	7,1	-7,1	4,2	-1,1	4,3
03.07.2024	Волгоград	-2,7	5,3	-7,1	7,1	-4,4	1,8	4,8
	Воронеж	2,6	2,7	3,8	9,2	1,3	6,6	6,7
	Казань	2,0	2,9	7,1	7,1	5,1	4,2	6,6
	НН	2,5	2,9	5,7	13,9	3,2	11,0	11,5
	Пермь	5,8	-1,6	9,2	3,8	3,4	5,4	6,4

	Самара	-4,1	-1,8	-9,2	-3,8	-5,1	-2,0	5,5
04.07.2024	Волгоград	-3,5	1,5	-10,6	10,6	-7,1	9,1	11,6
	Казань	-0,1	4,0	-3,8	9,2	-3,7	5,2	6,4
	Пермь	4,9	0,9	9,2	-3,8	4,3	-4,7	6,4
	Петрозаводск	-2,1	0,8	-5,7	13,9	-3,7	13,1	13,6
	Самара	-4,7	2,8	-10,6	10,6	-5,9	7,8	9,8
10.07.2024	Москва	-0,7	-3,6	-7,1	-7,1	-6,4	-3,4	7,3
	НН	0,9	-5,4	-3,8	-9,2	-4,7	-3,8	6,0
	Самара	0,7	-8,5	-10,6	-10,6	-11,3	-2,1	11,5
	Смоленск	-2,7	-3,6	-7,1	-7,1	-4,4	-3,5	5,6
14.07.2024	Мурманск	2,6	4,4	10,6	10,6	8,0	6,2	10,1
	Самара	0,0	-4,9	-5,7	-13,9	-5,7	-9,0	10,6
15.07.2024	Волгоград	-4,1	-2,9	-7,1	-7,1	-3,0	-4,2	5,1
	Казань	1,6	-3,6	-7,1	-7,1	-8,7	-3,4	9,4
	Саратов	3,3	-0,6	-7,1	-7,1	-10,4	-6,4	12,2
	Смоленск	0,0	-2,0	-3,8	-9,2	-3,8	-7,2	8,2
	СПб	10,6	-1,3	9,2	-3,8	-1,4	-2,5	2,9
16.07.2024	Казань	-4,2	-3,7	-7,1	-7,1	-2,9	-3,3	4,4
	Москва	2,5	-4,3	-9,2	-3,8	-11,7	0,5	11,7
	Мурманск	-2,0	-2,4	-7,1	7,1	-5,1	9,5	10,8
	НН	-2,9	0,6	-3,8	-9,2	-0,9	-9,9	9,9
	Пермь	-4,0	-2,9	-7,1	-7,1	-3,0	-4,1	5,1
	Смоленск	-2,2	1,3	7,1	7,1	9,2	5,8	10,9
17.07.2024	Архангельск	6,6	-6,1	7,1	-7,1	0,4	-1,0	1,1
	Волгоград	-1,7	-2,5	-3,5	-3,5	-1,8	-1,1	2,1
	Воронеж	2,1	-3,9	-7,1	-7,1	-9,1	-3,2	9,7
	Петрозаводск	3,1	-0,5	9,2	-3,8	6,2	-3,3	7,0
	Самара	-3,4	-2,1	-4,6	-1,9	-1,2	0,2	1,2
	Саратов	-3,0	-0,3	-3,8	-9,2	-0,8	-9,0	9,0
18.07.2024	Воронеж	1,2	-4,2	9,2	-3,8	8,1	0,4	8,1
	Саратов	-2,4	-4,9	7,1	-7,1	9,5	-2,1	9,7
19.07.2024	Архангельск	-6,5	-2,2	-10,6	-10,6	-4,1	-8,4	9,3
	Волгоград	1,8	-3,1	3,5	-3,5	1,7	-0,4	1,8
	Воронеж	6,7	-5,8	3,5	-3,5	-3,2	2,3	3,9
	Казань	2,5	-0,8	-4,6	-1,9	-7,1	-1,1	7,2
	Самара	-0,5	-2,9	-9,2	-3,8	-8,7	-1,0	8,8

Из-за различной точности компонент и ошибок интерполяции, скорость насекомых слегка завышена, для дальнейшего анализа стоит использовать осреднённое значение скоростей, которое равно 6,6 м/с.

В ходе расчётов и анализа полученных результатов, установлено, что цели обладают собственной скоростью, отличной от скорости ветра, что исключает их принадлежность к пассивным частицам (например, семенам растений). Наличие собственной скорости U подтверждает биологическую природу объектов.

Глава 5. Исследование влияния динамических характеристик атмосферы на модуляцию дифференциальной отражаемости

Факторы, влияющие на отсутствие модуляции, можно разделить на 2 направления: хаотичное движение целей и пересечение потоков. В своей работе я разберу влияние хаотичного движения, поскольку для исследования пересечения потоков недостаточно статистической информации.

Под хаотичным движением понимается нарушение упорядоченной пространственной ориентации биологических объектов под воздействием динамических факторов атмосферы.

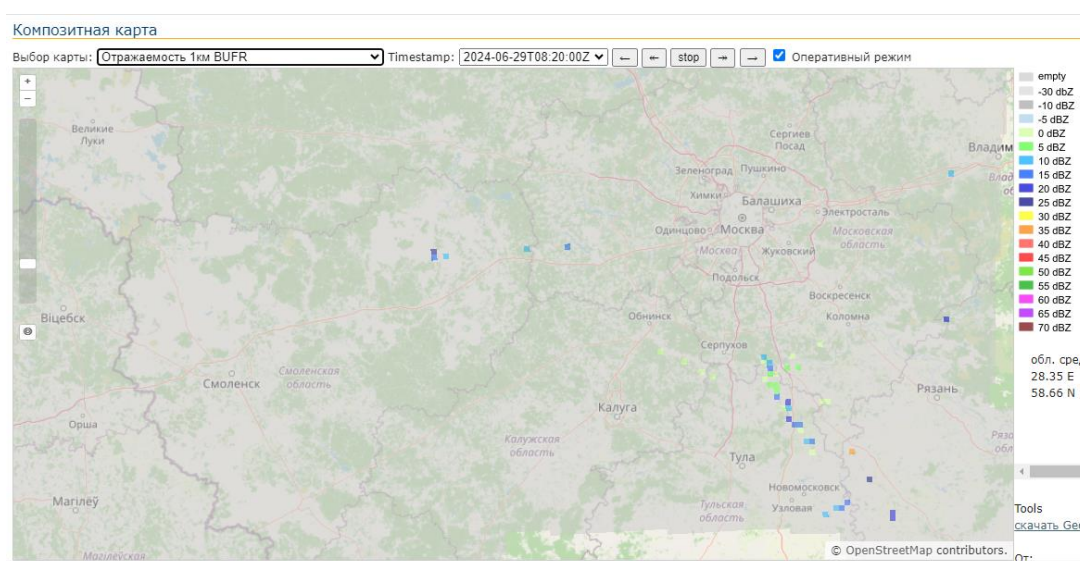


Рис.5.1. Карта радиолокационной отражаемости за 29.06.2024

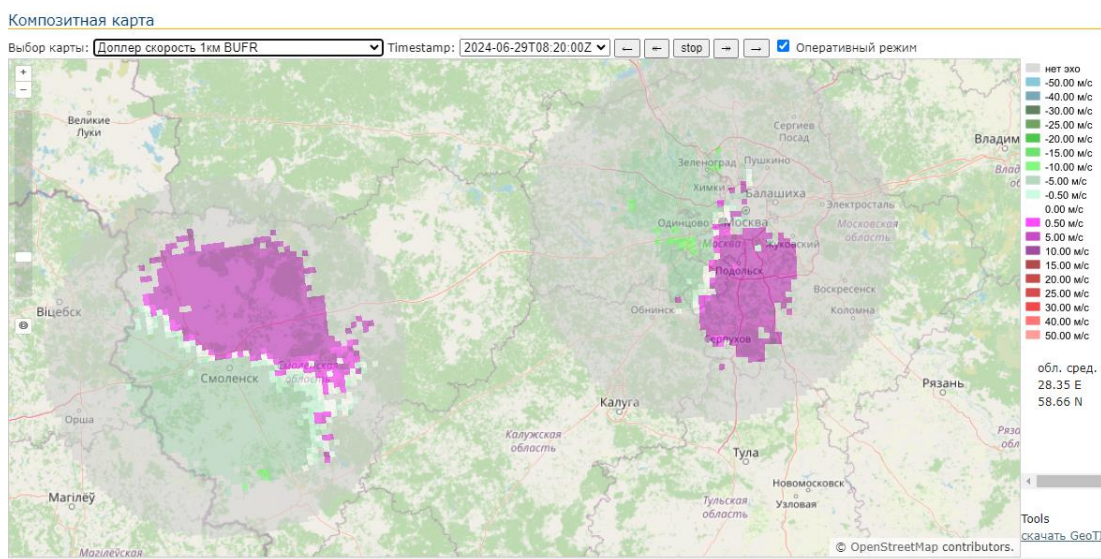


Рис.5.2. Карта радиальных скоростей за 29.06.2024

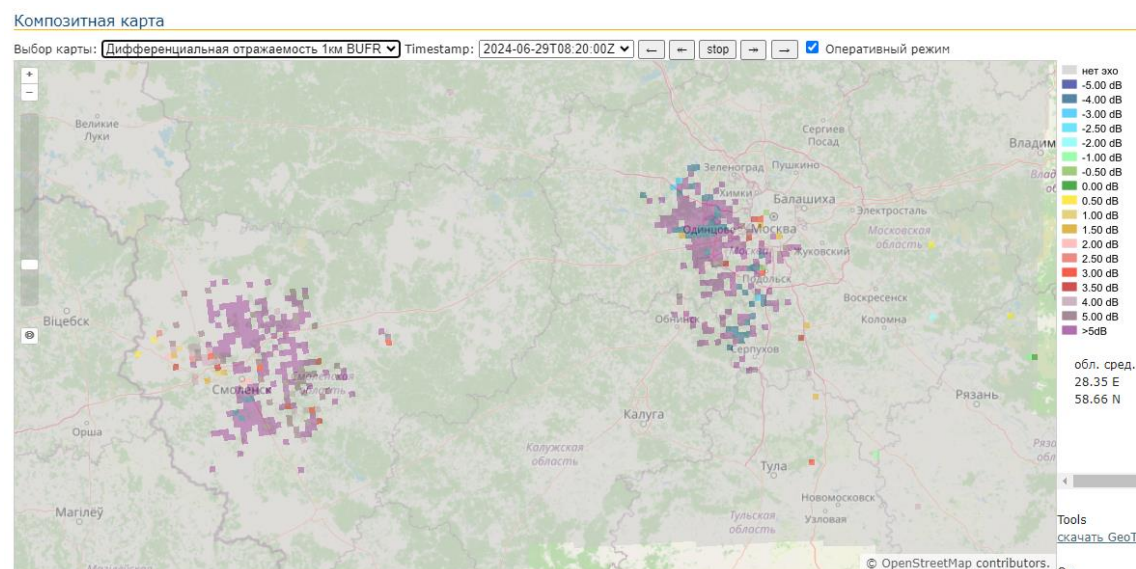


Рис.5.3. Карта дифференциальной отражаемости за 29.06.2024

На данных картах радиолокационной информации (рисунок 5.1,5.2,5.3) можно отчётливо проследить, что на карте радиолокационной отражаемости в городах Москва и Смоленск отсутствует какая-либо отражаемость, в то время как на карте радиальных скоростей цели присутствуют, что означает неметеорологическую природу объектов. В случае Смоленска модуляция параметра на карте дифференциальной отражаемости наблюдается, что, по методам предшественников означает, что отражателями являются насекомые. Однако в Москве модуляция отсутствует, а значит на упорядоченный полёт насекомых было оказано влияние воздушной среды.

На дезориентацию насекомых и, как следствие, на исчезновение модуляции параметра на картах дифференциальной отражаемости ключевое влияние оказывают такие динамические характеристики воздушной среды, как высокая скорость ветра и его поворот с высотой.

5.1 Влияние высокой скорости ветра на отсутствие модуляции

В рамках данного исследования одной из задач является постановка гипотезы о дезориентирующем воздействии скорости воздушного потока (реального ветра) на ориентацию насекомых. Суть выдвигаемой гипотезы заключается в том, что при превышении скоростью ветра собственной скорости полета насекомых аэродинамические силы полностью подавляют их

способность к поддержанию упорядоченной ориентации, что, в свою очередь, отражается на картах дифференциальной отражаемости как отсутствие модуляции.

Гипотеза исследования основывается на принципе сложения векторов скорости, которые показаны на рисунках 5.1.1 и 5.1.2. Результирующий вектор движения объекта W , фиксируемый радаром, является суммой вектора скорости ветра (V) и вектора собственного движения объекта (U) (насекомых). Важной деталью на данных схемах являются пунктирные линии — они обозначают турбулентность (случайные завихрения и порывы воздуха). Угол между пунктирной и сплошной линией показывает, насколько сильно воздушный поток отклоняется от своего основного направления.

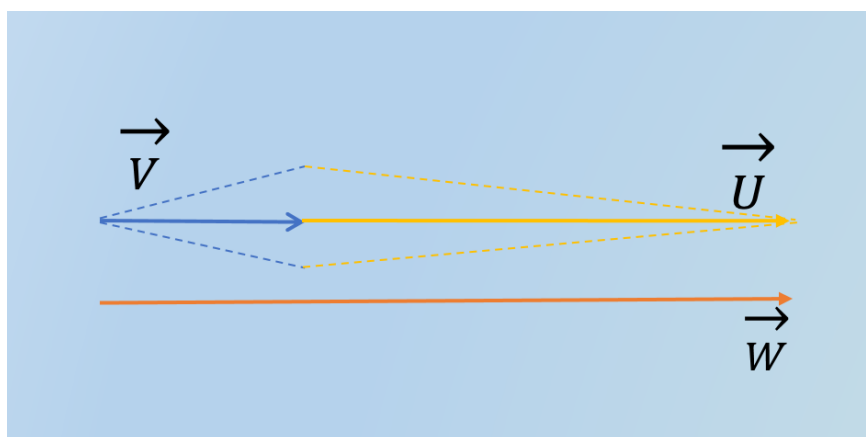


Рис.5.1.1. Схема векторного взаимодействия воздушного потока и собственного движения насекомых при $V < U$

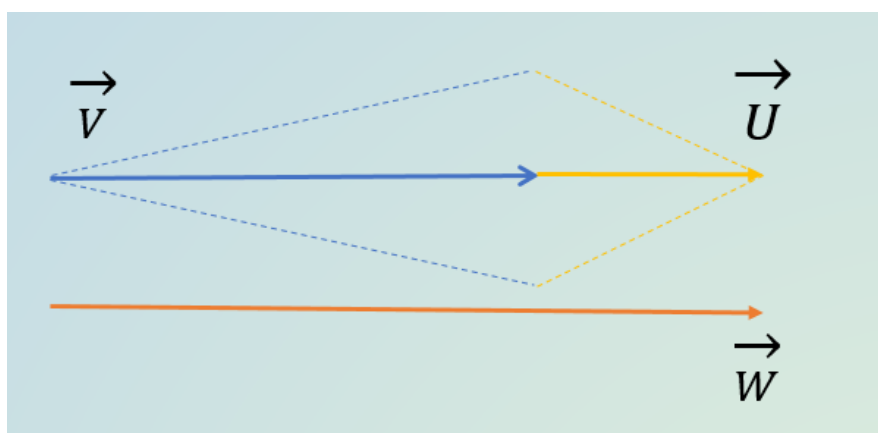


Рис.5.1.2. Схема векторного взаимодействия воздушного потока и собственного движения насекомых при $V > U$

На рисунке 5.1.1. показана ситуация при слабом ветре. Здесь скорость ветра меньше, чем скорость полета самих насекомых ($V < U$). В таких условиях, даже при наличии турбулентности, порывы воздуха не могут преодолеть собственные силы насекомых. Они испытывают лишь незначительные колебания и способны спокойно удерживать общую ориентацию полёта. Поскольку насекомые ориентированы упорядоченно, радар это видит, и на картах дифференциальной отражаемости появляется четкая модуляция.

На рисунке 5.1.2. показан случай, когда скорость реального ветра больше скорости биоты. Влияние турбулентности на насекомых резко увеличивается. На схеме видно, что угол отклонения жёлтых пунктирных линий (движения насекомых) становится больше. Из-за высокой скорости и порывов насекомых начинает сильно разворачивать в разные стороны, и они теряют способность удерживать единый курс. В результате в одном объеме воздуха они оказываются ориентированы хаотично. Радар усредняет этот сигнал от повернутых в разные стороны целей, из-за чего модуляция на картах дифференциальной отражаемости (Z_{DR}) полностью исчезает.

Для экспериментального подтверждения выдвинутой гипотезы необходимо сопоставить общее количество случаев с наличием и отсутствием модуляции параметра при различных скоростях ветра. С этой целью вся собранная выборка радиолокационных наблюдений и соответствующих им аэрологических данных была разделена на четыре диапазона по скорости реального ветра на высоте 500 метров, которая была рассчитана в главе 3. Для максимальной наглядности результаты анализа необходимо представить в виде столбчатой гистограммы, которая показывает точное процентное соотношение внутри каждой группы, и линейного графика, отражающего общую тенденцию исчезновения модуляции с ростом скорости ветра (Рис.5.1.3. и Рис.5.1.4.)

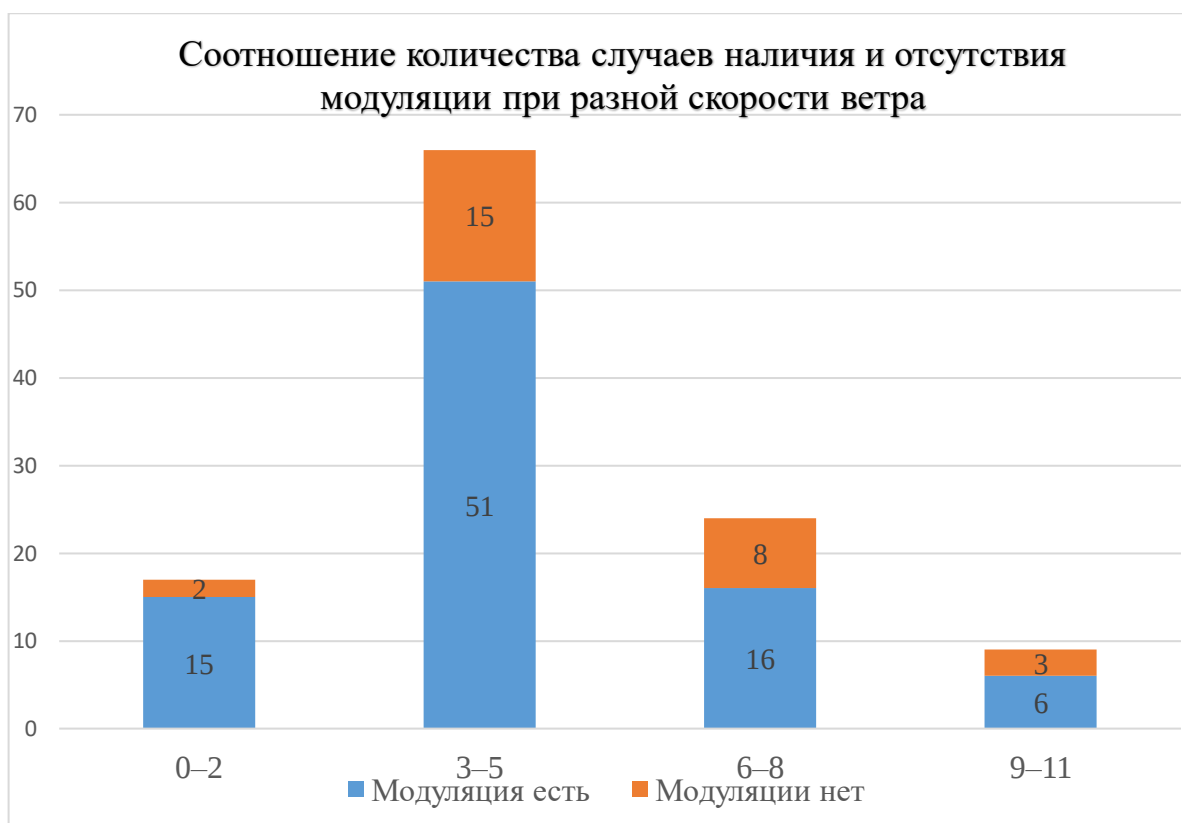


Рис.5.1.3. Гистограмма распределения случаев с наличием и отсутствием модуляции по градациям скорости ветра.

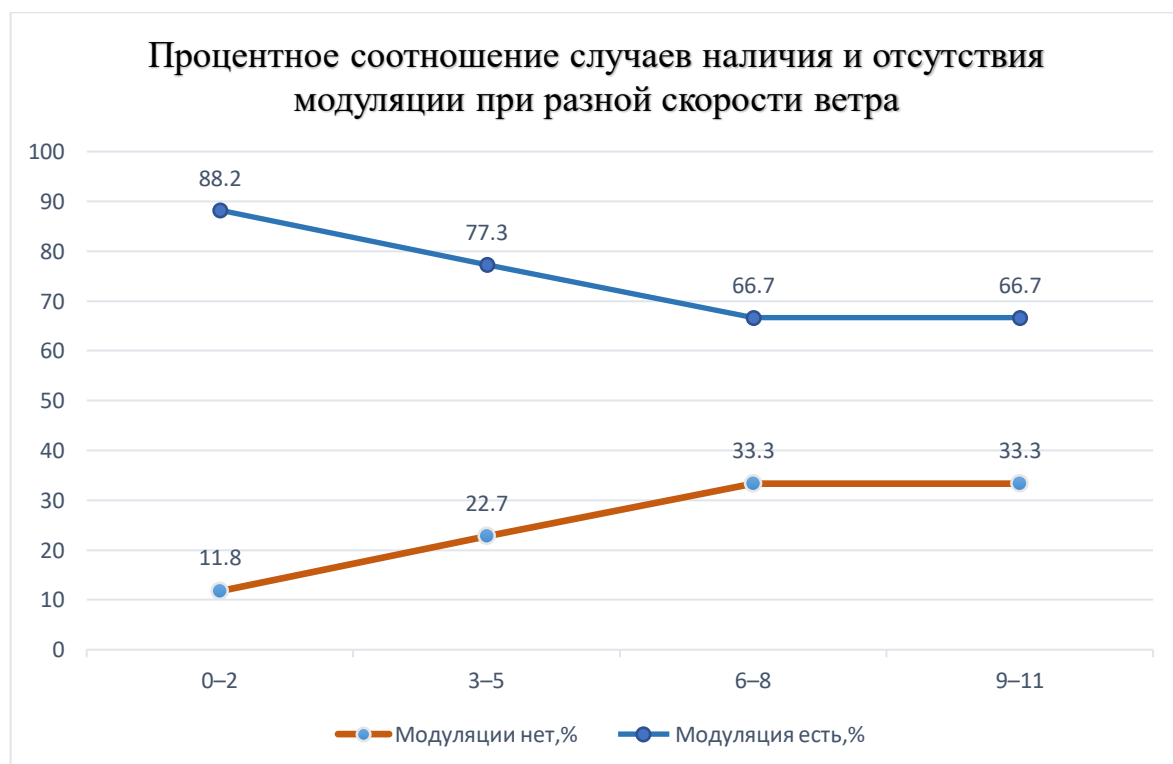


Рис.5.1.4. График процентного соотношения случаев наличия и отсутствия модуляции при разной скорости ветра

Анализ представленного материала позволяет детально проследить, как динамика атмосферы влияет на поведение биологических объектов. В первом диапазоне, при слабом ветре (1–2 м/с), на гистограмме видно абсолютное доминирование ситуаций с сохраненной модуляцией — их доля составляет 88,2 %. Линия графика, отражающая случаи без модуляции, в этой точке находится на своем минимуме (11,8 %). Это говорит о том, что в спокойном воздухе насекомые без проблем удерживают единую ориентацию, формируя четкую радиолокационную картину. При усилении ветра до 3–5 м/с на гистограмме замечен первый сдвиг: столбец случаев без модуляции начинает расти и достигает 22,7 %. Соответственно, линия графика в этом интервале начинает идти вверх. Такой подъем указывает на то, что умеренный ветер начинает дезориентировать отдельные, скорее всего, самые мелкие и легкие виды насекомых, хотя большинство (77,3%) все еще справляется с потоком. В интервале умеренных (6–8 м/с) и высоких скоростей (9–11 м/с) соотношение случаев становится равным 1/2, что в процентном соотношении 33,3 % к 66,7%. Это наглядно подтверждает, что данный диапазон скоростей является переходной зоной, когда для биологических целей ветер становится критическим фактором, поскольку скорость ветра превышает среднюю скорость насекомых, равную 6,6 м/с.

Таким образом, выдвинутая рабочая гипотеза полностью подтверждается экспериментальными данными — если скорость ветра превышает собственную скорость насекомых, их движение из упорядоченного превращается в хаотичное, что в свою очередь исключает наличие модуляции.

5.2 Влияние поворота ветра на отсутствие модуляции

Вторым независимым динамическим фактором атмосферы, определяющий хаотичное движение насекомых, выступает изменение направления фонового воздушного потока с высотой (вертикальный сдвиг ветра)

Суть данной гипотезы заключается в том, что при значительном повороте ветра по высоте насекомые на разных уровнях разворачивают свои тела в разные стороны, чтобы компенсировать снос. Когда эти разнонаправленные слои попадают в один разрешаемый объем радиолокатора, поляризационный сигнал усредняется, и модуляция Z_{DR} пропадает.

На рисунке 5.2.1 представлена схема для наглядной демонстрации изменения ориентации насекомых в слое 1 километр.

Направление итогового вектора перемещения (W), которое фиксирует радиолокатор, зависит от направления реального ветра (V) и направления, в выбранную сторону которого ориентировано тело самого насекомого (U). При повороте ветра с высотой поведение биоты меняется следующим образом:

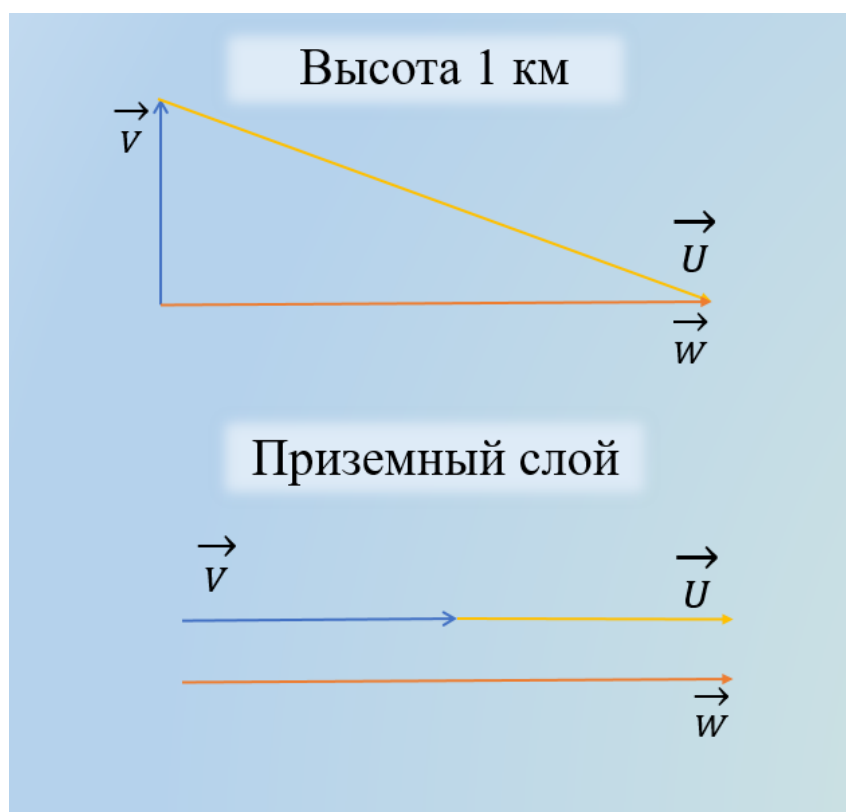


Рис.5.2.1 Схема векторного взаимодействия воздушного потока и собственного движения насекомых при $V > U$

В приземном слое ветер дует в направлении вектора (V). Чтобы двигаться по своему общему курсу (W), насекомые ориентируются в направлении вектора (U) (под определенным углом к потоку). В этом слое насекомые ориентированы упорядоченно в направлении реального ветра.

На высоте 1 км направление ветра может изменяться. Если бы насекомые сохранили прежнее положение тела в пространстве, изменившийся воздушный поток увлек бы их в сторону от цели. Чтобы компенсировать этот боковой снос и удержать прежнее общее направление движения (W), насекомые вынуждены развернуться. В результате направление их собственной ориентации меняется.

Также, важно отметить, что даже небольшие изменения направления ветра с высотой (более 45°) может приводит к тому, что направление насекомых в приземном слое и на высоте 1 км оказываются развернуты под существенно разными углами друг к другу.

Поскольку радиолокационные карты строятся путем усреднения данных по всему километровому слою, отраженные сигналы от этих разнонаправленных подслоев накладываются друг на друга в пределах одной точки на карте. Радар видит одновременно насекомых, развернутых в разные стороны, из-за чего общая упорядоченность слоя сглаживается, и модуляция параметра Z_{DR} полностью исчезает.

Для определения величины поворота ветра с высотой использовалась методика, состоящая из двух последовательных этапов.

На первом этапе необходимо было узнать точное направление ветра на фиксированной высоте 1000 метров (1 км). Так как в архивных таблицах аэрологического зондирования Университета Вайоминга данные приводятся по фактическим уровням подъема радиозонда, значения непосредственно для отметки 1000 м часто отсутствовали. В этих ситуациях направление ветра на 1 км находилось методом линейной интерполяции по формуле:

$$D_{1\text{км}} = D_1 + \frac{D_2 - D_1}{H_2 - H_1} \times (1000 - H_1) \quad (5.2.1)$$

Где: H_1 и H_2 — ближайшие к отметке 1000 м высоты аэрологического зондирования снизу и сверху соответственно, м; D_1 и D_2 — направления реального ветра на этих высотных уровнях, $^\circ$.

При расчетах также учитывался переход через нулевую отметку шкалы направлений в 360 градусов, чтобы избежать математических ошибок при резкой смене румба направления.

На втором этапе рассчитывался непосредственно сам угол поворота ветра (ΔD) в нижнем километровом слое атмосферы. Он определялся как абсолютная разность между полученным интерполированным значением направления ветра на высоте 1 км ($D_{1\text{км}}$) и направлением ветра на минимальной высоте ($D_{\text{мин}}$), то есть на нижней границе слоя фиксации биоцелей:

$$\Delta D = |D_{1\text{км}} - D_{\text{мин}}| \tag{5.2.2}$$

В случаях, когда рассчитанная разность углов превышала 180° , итоговое значение корректировалось по формуле $\Delta D_{\text{ист}} = 360^\circ - \Delta D$, так как для оценки дезориентации насекомых важен именно минимальный угол между направлениями двух воздушных потоков.

Результаты расчётов для случаев в период с 29.06.2024 по 10.07.2024 представлены в таблице 5.2.1. С таблицей для всех случаев, можно ознакомиться в приложении 4.

Таблица 5.2.1

Дата	Город	Направление ветра на минимальной высоте,°	Направление ветра на 1 км,°	Поворот ветра,°
29.06.2024	Архангельск	200	226	26
	Волгоград	350	332	18
	Воронеж	360	346	14
	Казань	15,0	360	15
	Махачкала	120,0	327	153
	Москва	290,0	73	143
	Пермь	345,0	6	21
	Ростов	85,0	70,0	15
	Самара	355,0	75,0	80
	Саратов	350	349,0	1
	Смоленск	200	214,0	14
30.06.2024	Казань	270,0	307	37
	НН	185,0	308	123
	Пермь	340	348	8
	Самара	325,0	348,0	23

	Саратов	340	4,0	24
	Смоленск	270	275,0	5
01.07.2024	Самара	355,0	346,0	9
03.07.2024	Волгоград	130	126	4
	Воронеж	180	186	6
	Казань	185	223	38
	НН	250,0	211	39
	Пермь	300	233	67
	Самара	75	56,0	19
04.07.2024	Волгоград	130	105	25
	Казань	165	184	19
	Пермь	255	250	5
	Петрозаводск	70,0	205,0	135
	Самара	110	136,0	26
10.07.2024	Москва	15,0	4	11
	НН	330,0	355	25
	Самара	330	38,0	68
	Смоленск	20	41,0	21
14.07.2024	Мурманск	200,00	245,0	45
	Самара	325	8,0	43
15.07.2024	Волгоград	60,0	44	16
	Казань	295	13	78
	Саратов	40	124,0	84
	Смоленск	360	351,0	9
	СПб	250	276,0	26
16.07.2024	Казань	30	40	10
	Москва	320,0	340	20
	Мурманск	20,00	63,0	43
	НН	130,0	88	42
	Пермь	45	44	1
	Смоленск	110	152,0	42
17.07.2024	Архангельск	340	318	22
	Волгоград	360,0	37	37
	Воронеж	360	324	36
	Петрозаводск	290,0	264,0	26
	Самара	20	90,0	70
	Саратов	170	37,0	133
18.07.2024	Воронеж	315	329	14
	Саратов	340	340,0	0
19.07.2024	Архангельск	90	88	2
	Волгоград	310	326	16
	Воронеж	335	334	1
	Казань	265	324	59
	Самара	10	341,0	29

Полученные в результате расчетов значения углов разворота ветра для всей выборки из 116 случаев были распределены по градациям от 0° до 180° с

шагом в 30° для последующего статистического анализа и построения графиков зависимости.

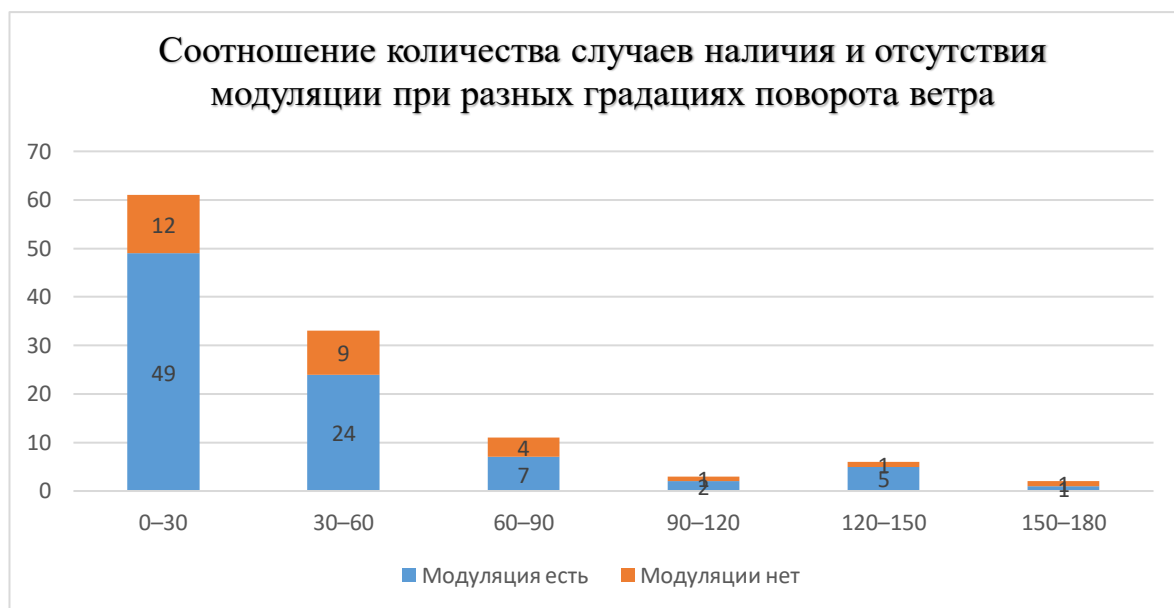


Рис.5.2.2. Гистограмма распределения случаев с наличием и отсутствием модуляции по градациям поворота ветра

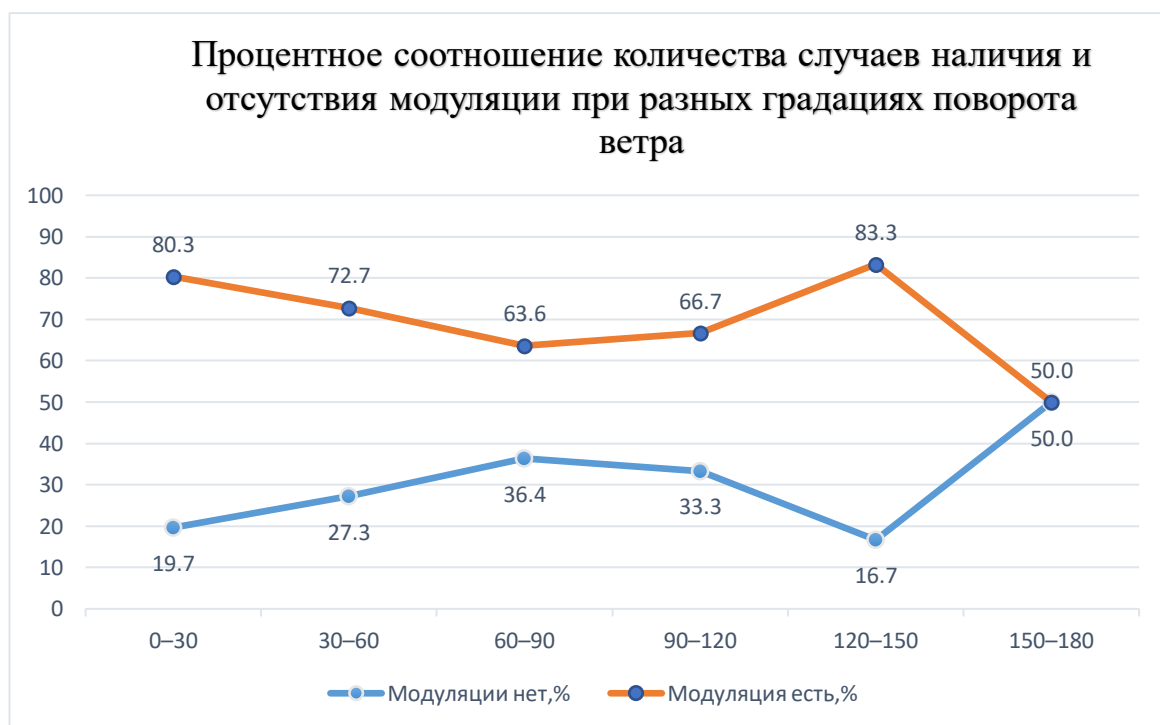


Рис.5.2.3. График процентного соотношения случаев наличия и отсутствия модуляции при разных градациях поворота ветра

В первом интервале, где поворот ветра минимален ($0\text{--}30^\circ$), модуляция дифференциальной отражаемости сохраняется в большинстве случаев — примерно в 80%. Линия, показывающая случаи без модуляции, здесь

находится на самом низком уровне. Это объясняется тем, что когда направление ветра у земли и на высоте 1 км практически одинаковое, насекомым на всех ярусах нет необходимости разворачивать тела в разные стороны. Они летят сонаправленно, и радар фиксирует четкую общую ориентацию целей.

Когда угол поворота ветра увеличивается (интервалы $30-60^\circ$ и $60-90^\circ$), доля случаев с сохраненной модуляцией плавно снижается до 63,6%, а линия графиков без модуляции начинает расти. Это подтверждает, что с ростом вертикального сдвига ветра насекомым на верхних уровнях приходится сильнее изменять положение тела в пространстве, чтобы подстроиться под изменившийся поток, компенсировать боковой снос и удержать свой курс.

В интервалах $90-120^\circ$ и $120-150^\circ$ на графике наблюдаются явные аномалии: вопреки общей тенденции, здесь фиксируется пик для случаев с модуляцией и минимум для ситуаций без неё. Этот резкий перепад объясняется исключительно малым объемом выборки в данном конкретном диапазоне. Из-за дефицита данных единичные случаи сильно исказили процентное соотношение в этой группе, поэтому данный пик является локальным статистическим шумом.

В последнем интервале разворота ветра ($150-180^\circ$) характер распределения возвращается к ожидаемым результатам: здесь случаи без модуляции снова преобладают. При таком сильном повороте воздушного потока насекомые в приземном слое и на высоте 1 км вынуждены разворачивать свои тела практически в противоположные стороны. Радар усредняет сигналы, из-за чего общая упорядоченность сглаживается, и модуляция параметра Z_{DR} пропадает. Однако стоит отметить, что выборка в этом интервале также очень мала (всего 2 случая), поэтому для получения более статистически значимых графиков необходимо дальнейшее расширение массива наблюдений.

В целом, за исключением локальной аномалии в районе $120-150^\circ$, полученные результаты подтверждают общую закономерность: чем больше

поворот ветра между приземным слоем и высотой 1 км, тем реже насекомые сохраняют единую ориентацию для локатора и тем чаще на картах дифференциальной отражаемости отсутствует модуляция.

5.3. Анализ сводных результатов и обсуждение необъясненных случаев

Чтобы увидеть общую картину и подвести итоги, из всей выборки (116 случаев) были отобраны случаи, когда модуляция параметра отсутствовала (27 случаев), и объединены в сводную таблицу (Таблица 5.3.1). Для каждого случая сопоставлены ключевые параметры: реальная скорость ветра на высоте 500 метров и угол его вертикального поворота в километровом слое, а также средняя скорость насекомых, в качестве сравнения.

Таблица 5.3.1

Дата	Город	Реальный ветер скорость, м/с(500м)	Поворот ветра,°	Средняя скорость насекомых, м/с
29.06.2024	Казань	7,5	15	6,6
	Москва	2,6	143	
	Ростов	5,8	15	
	Самара	10,7	80	
30.06.2024	Казань	4,7	37	
	Самара	9,1	23	
	Саратов	6,0	24	
04.07.2024	Волгоград	3,8	25	
	Пермь	5,0	5	
10.07.2024	Самара	8,5	68	
14.07.2024	Мурманск	5,1	45	
19.07.2024	Воронеж	8,9	1	
	Самара	2,9	29	
07.08.2024	Архангельск	3,3	51	
09.08.2024	Волгоград	8,1	61	
	Смоленск	3,5	7	
10.08.2024	Саратов	7,0	96	
14.08.2024	Петрозаводск	5,4	33	
30.08.2024	Саратов	3,1	56	
31.08.2024	Москва	4,5	167	
	Самара	7,7	43	
01.09.2024	Самара	4,5	73	

	Саратов	5,6	45	
07.09.2024	Волгоград	9,4	22	
	Петрозаводск	6,9	14	
08.09.2024	Пермь	3,7	30	
	Смоленск	4,7	20	

Если сгруппировать эти 27 дней по конкретным физическим факторам, которые исследовались в работе, то получается следующее распределение:

1. Влияние только скорости ветра (6 случаев, желтый цвет). В эти дни единственным дезориентирующим фактором выступала высокая скорость ветра, которая превышала собственную скорость насекомых. Ветер был слишком сильным, насекомых перемешивало, и они теряли единый курс, хотя сам поворот потока по высоте был минимальным.

2. Влияние только поворота ветра (7 случаев, синий цвет). Здесь скорость ветра оставалась слабой или умеренной и не превышала скорость биоты, но направления потоков у земли и на высоте сильно расходились. Сигналы от разнонаправленных тел насекомых накладывались друг на друга, из-за чего модуляция на картах дифференциальной отражаемости отсутствовала.

3. Совместное влияние обоих факторов (4 случая, зелёный цвет). В этих ситуациях на биоцели воздействовали оба фактора – высокая скорость ветра, и его резкий разворот с высотой. Наглядный пример – случай в Самаре 29.06.2024 г., где скорость ветра достигла 10,7 м/с при угле поворота в 80°.

Таким образом, гипотезы успешно объясняют большую часть выборки – 17 случаев из 27 (порядка 63%).

Однако 10 случаев в рамках текущего анализа пока остаются необъясненными. В эти дни и скорость ветра не превышала скорость насекомых, и угол поворота был минимальным, но модуляция всё равно отсутствовала.

Наличие таких моментов абсолютно нормально, так как стандартное аэрологическое зондирование фиксирует только общую синоптическую ситуацию и не может учесть абсолютно все процессы в атмосфере.

Заключение

В рамках настоящей выпускной квалификационной работы было проведено исследование, направленное на выявление физических причин отсутствия модуляции дифференциальной отражаемости (Z_{DR}) при наблюдении предполагаемых биологических целей по данным радиолокаторов ДМРЛ-С. По итогам проделанной работы можно сформулировать следующие выводы.

1. Биологическая природа наблюдаемых отражателей подтверждена. На основе векторного расчёта и данных аэрологического зондирования была определена собственная скорость предполагаемых насекомых, которая в среднем составила 6,6 м/с. Полученное значение принципиально отличается от нулевой собственной скорости пассивных частиц (семян и т. п.) и соответствует диапазону скоростей активного полёта насекомых, что исключает случайное происхождение данных целей и подтверждает выводы предшествующих исследований.

2. Установлено статистически значимое влияние высокой скорости ветра на исчезновение модуляции Z_{DR} . Анализ 116 радиолокационных случаев за период с 20 июня по 8 сентября 2024 года показал, что при скорости ветра на высоте 500 м равной 1-2 м/с сохраняется подавляющее большинство наблюдений с модуляцией Z_{DR} . При увеличении скорости ветра и превышении средней скорости полёта насекомых, доля случаев с отсутствием модуляции возрастает. Это доказывает выдвинутую гипотезу и подтверждает влияние высокой скорости ветра на отсутствие модуляции дифференциальной отражаемости.

3. Подтверждено влияние вертикального сдвига ветра (поворота с высотой) на нарушение упорядоченной ориентации биологических целей. При малых углах поворота модуляция Z_{DR} наблюдается приблизительно в 80% случаев. По мере увеличения угла разворота ветра в километровом слое доля случаев с сохранённой модуляцией закономерно снижается, что также доказывает выдвинутую гипотезу.

4. Сводный анализ 27 случаев без модуляции позволил объяснить 17 из них (около 63%) воздействием одного или обоих исследованных факторов. Оставшиеся 10 случаев (около 37%) не укладываются в рамки предложенных гипотез, что указывает на существование дополнительных механизмов дезориентации биоты, не охватываемые исходными данными.

5. Установленные закономерности носят стохастический характер, что обусловлено как естественной изменчивостью поведения биологических объектов, так и ограниченным объёмом выборки в ряде диапазонов исследуемых параметров. Для получения более устойчивых количественных критериев необходимо расширение массива наблюдений.

Практическая значимость полученных результатов состоит в следующем: выявленные пороговые значения скорости ветра и вертикального сдвига могут быть использованы в качестве дополнительных диагностических признаков при автоматическом обнаружении неметеорологических целей. Это позволит снизить вероятность ошибочного отнесения биологических сигналов к шуму при фильтрации и тем самым улучшить качество радиолокационной информации, поступающей в системы штормооповещения.

В качестве направлений дальнейших исследований представляется перспективным: привлечение данных мезомасштабных численных моделей для учёта мелкомасштабных динамических процессов; сопоставление радиолокационных данных с энтомологическими наблюдениями в целях установления вида биоты; а также разработка формализованного алгоритма классификации с учётом выявленных зависимостей.

Таким образом, поставленная цель достигнута: определены два ключевых динамических фактора атмосферы: высокая скорость ветра и его вертикальный сдвиг, обуславливающих отсутствие модуляции дифференциальной отражаемости при наблюдении биологических целей. Полученные результаты вносят вклад в решение актуальной задачи разработки надёжных критериев идентификации неметеорологических целей в радиолокационной метеорологии.

Список литературы

1. Азаров А.С., Егоров А.С., Суханов Е.С., Чиркунова Ж.В., Орешкин В.И., Лялин К.С. Бортовой метеорологический радиолокатор со сжатием радиоимпульсов. Труды 28-го Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред», 2013, вып. 10, т.2, с. 309 - 317
2. Боровиков А.М., Костарев В.В., Мазин И.П., Смирнов В.И., Черников А.А. Радиолокационные измерения осадков. Гидрометеиздат. Л.:1967.
3. Вовшин Б.М., Лаврукевич В.В., Пушков А.А. Вылегжанин И.С. Результаты натурных испытаний российского метеорadiолокатора «ДМРЛ-С», Сборник статей Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», МРФ-2011, Том1, ч.1, стр.7-12, г.Харьков.
4. Готюр И.А., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В., Чернышев С.В., Щукин Г.Г. Допплеровский радиолокационный метод определения характеристик поля ветра и некоторые результаты. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета №21 СПб, 2011, с.66 - 75
5. Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Об особенностях радиолокационных измерений радиальной скорости гидрометеоров при двухмодальном спектре отраженного ими сигнала. Труды 28-го Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред», 2013, вып. 10, т.2, с. 337 – 344
6. Загорин Г.К., Кутуза Б.Г., Особенности переноса поляризованного теплового излучения в облаках и осадках. – Радиотехника, 1998, вып. 10, с. 32 – 31.
7. Иванов И.И., Колосков Б.П., Мельничук Ю.В., Черников А.А. Радиолокационный метод исследования пространственной структуры турбулентности в облаках и осадках. Труды 4-го Всесоюзного совещания по радиометеорологии. Под ред. А.А. Черникова. 1978., с. 37-40. М.:Гидрометеиздат.

8. Киктев, Д. Б. Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов / Д. Б. Киктев, А. В. Муравьев, А. Ю. Бундель. — Москва : Типография АМА ПРЕСС, 2021. — 94 с
9. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков и туманов. РГГМУ. Санкт-Петербург, 2012 г. 342 стр.
10. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Москва, 1969 г.
11. Руководящий документ РД 52.04.320-91. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. СПб, Гидрометеиздат, 1993, 357 стр
12. Рыжков А.В. Поляризационные методы метеорологической радиолокации. - Зарубежная радиоэлектроника, 1993, №4, с. 18 – 28.
13. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. – Ленинград, 1973.
14. Doviak R.Y., Zrnic D.S. Doppler Radar and Wether Observation Press. 1984.
15. Hu G., Lim K. S., Horvitz N., Clark S. J., Reynolds D. R., Sapir N., Chapman J. W. Mass seasonal bioflows of high-flying insect migrants // Science. — 2016. — Vol. 354, № 6319. — P. 1584.
16. Melnikov, V. M., and D. S. Zrnic, 2007: Autocorrelation and crosscorrelation estimators of polarimetric variables. J. Atmos. Oceanic Technol., 24, 1337-1350.
17. Zrnic D.S., Ryzhkov A.V. Polarimetry for Weather Surveillance Radars. Bulletin of the American Meteorological Society. Vol. 80, No. 3, March 1999, 389-406 p.
18. Ryzhkov A., Diederich M., Zhang P., Simmer C. Potential utilization of specific attenuation for rainfall estimation, mitigation of partial beam blockage, and radar networking. February 13, 2013. Submitted to the Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.

Дата	Город	Реальный ветер направление(θ_v),°(500м)	Реальный ветер скорость(V), м/с(500м)
29.06.2024	Архангельск	218	6,4
	Волгоград	326	10,9
	Воронеж	347	3,0
	Казань	353	7,5
	Махачкала	294	4,8
	Москва	285	2,6
	Пермь	14	9,8
	Ростов	77	5,8
	Самара	353	10,7
	Саратов	11	8,4
	Смоленск	208	3,0
30.06.2024	Казань	287	4,7
	НН	236	2,1
	Пермь	360	6,0
	Самара	351	9,1
	Саратов	331	6,0
	Смоленск	272	3,6
01.07.2024	Самара	334	6,6
03.07.2024	Волгоград	153	5,9
	Воронеж	224	3,7
	Казань	215	3,5
	НН	221	3,8
	Пермь	285	6,0
	Самара	66	4,5
04.07.2024	Волгоград	113	3,8
	Казань	179	4,0
	Пермь	260	5,0
	Петрозаводск	110	2,2
	Самара	121	5,5
10.07.2024	Москва	11	3,7
	НН	351	5,5
	Самара	355	8,5
	Смоленск	37	4,5
14.07.2024	Мурманск	211	5,1
	Самара	360	4,9
15.07.2024	Волгоград	54	5,0
	Казань	336	4,0
	Саратов	281	3,4
	Смоленск	360	2,0
	СПб	277	10,7
16.07.2024	Казань	48	5,6
	Москва	330	5,0
	Мурманск	39	3,1
	НН	102	3,0
	Пермь	54	5,0

	Смоленск	121	2,5
17.07.2024	Архангельск	313	9,0
	Волгоград	34	3,0
	Воронеж	332	4,4
	Петрозаводск	280	3,1
	Самара	58	4,0
	Саратов	85	3,0
18.07.2024	Воронеж	344	4,4
	Саратов	26	5,5
19.07.2024	Архангельск	72	6,9
	Волгоград	330	3,6
	Воронеж	311	8,9
	Казань	288	2,6
	Самара	10	2,9
21.07.2024	Волгоград	304	6,0
	Воронеж	285	4,0
	Саратов	329	9,4
25.07.2024	Волгоград	338	6,6
	Петрозаводск	85	4,3
	Самара	353	10,4
	Смоленск	83	1,5
	СПб	64	4,8
27.07.2024	Волгоград	70	4,0
	Воронеж	309	2,9
	Самара	348	7,0
	Саратов	299	3,5
28.07.2024	Волгоград	317	5,2
	Воронеж	297	6,4
	Самара	315	6,9
	Саратов	297	6,6
06.08.2024	Воронеж	357	3,2
	Казань	306	3,0
	Москва	353	3,5
	НН	308	4,9
07.08.2024	Архангельск	53	3,3
	Петрозаводск	41	5,8
09.08.2024	Волгоград	272	8,1
	Смоленск	295	3,5
10.08.2024	Волгоград	312	6,6
	Воронеж	343	2,5
	Пермь	129	3,6
	Ростов	291	2,8
	Саратов	307	7,0
11.08.2024	Пермь	98	6,5
14.08.2024	Петрозаводск	342	5,4
25.08.2024	Волгоград	68	5,5
	Казань	346	5,0
30.08.2024	Волгоград	95	5,5
	Воронеж	78	6,0
	Казань	13	4,0

	Москва	48	2,0
	Саратов	60	3,1
	Смоленск	98	3,0
31.08.2024	Воронеж	110	6,0
	Казань	50	2,1
	Москва	180	4,5
	Самара	17	7,7
01.09.2024	Воронеж	88	5,4
	Казань	334	2,0
	Самара	63	4,5
	Саратов	63	5,6
07.09.2024	Волгоград	99	9,4
	Воронеж	82	4,9
	Казань	339	3,9
	Петрозаводск	254	6,9
08.09.2024	Воронеж	115	3,0
	Казань	331	2,4
	Москва	150	1,2
	НН	300	1,0
	Пермь	316	3,7
	Смоленск	152	4,7

Приложение 2

Дата	Город	Суммарное Направление движения, румбы	Суммарное Направление движения, °	Азимут суммарного движения (θ_w), °	Скорость суммарного движения(W), м/с
29.06.2024	Архангельск	СВ	45	225	10
	Волгоград	ЮЮЗ	202,5	22,5	15
	Воронеж	ЮЮВ	157,5	337,5	10
	Казань	ЮЮЗ	202,5	22,5	15
	Махачкала	ЮВ	135	315	15
	Москва	ВЮВ	112,5	292,5	10
	Пермь	ЮЗ	225	45	15
	Ростов	ЗЮЗ	247,5	67,5	10
	Самара	Ю	180	0	15
	Саратов	Ю	180	0	15
	Смоленск	ССВ	22,5	202,5	10
30.06.2024	Казань	ВЮВ	112,5	292,5	10
	НН	В	90	270	10
	Пермь	ЮВ	135	315	15
	Самара	ЮЮВ	157,5	337,5	15
	Саратов	ЮВ	135	315	10
	Смоленск	СВ	45	225	10
01.07.2024	Самара	ЮВ	135	315	10
03.07.2024	Волгоград	СЗ	315	135	10
	Воронеж	ССВ	22,5	202,5	10
	Казань	СВ	45	225	10
	НН	ССВ	22,5	202,5	15

	Пермь	BCB	67,5	247,5	10
	Самара	ЗЮЗ	247,5	67,5	10
04.07.2024	Волгоград	СЗ	315	135	15
	Казань	ССЗ	337,5	157,5	10
	Пермь	ВЮВ	112,5	292,5	10
	Петрозаводск	ССЗ	337,5	157,5	15
	Самара	СЗ	315	135	15
10.07.2024	Москва	ЮЗ	225	45	10
	НН	ЮЮЗ	202,5	22,5	10
	Самара	ЮЗ	225	45	15
	Смоленск	ЮЗ	225	45	10
14.07.2024	Мурманск	СВ	45	225	15
	Самара	ЮЮЗ	202,5	22,5	15
15.07.2024	Волгоград	ЮЗ	225	45	10
	Казань	ЮЗ	225	45	10
	Саратов	ЮЗ	225	45	10
	Смоленск	ЮЮЗ	202,5	22,5	10
	СПб	ВЮВ	112,5	292,5	10
16.07.2024	Казань	ЮЗ	225	45	10
	Москва	ЗЮЗ	247,5	67,5	10
	Мурманск	СЗ	315	135	10
	НН	ЮЮЗ	202,5	22,5	10
	Пермь	ЮЗ	225	45	10
	Смоленск	СВ	45	225	10
17.07.2024	Архангельск	ЮВ	135	315	10
	Волгоград	ЮЗ	225	45	5
	Воронеж	ЮЗ	225	45	10
	Петрозаводск	ВЮВ	112,5	292,5	10
	Самара	ЗЮЗ	247,5	67,5	5
	Саратов	ЮЮЗ	202,5	22,5	10
18.07.2024	Воронеж	ВЮВ	112,5	292,5	10
	Саратов	ЮВ	135	315	10
19.07.2024	Архангельск	ЮЗ	225	45	15
	Волгоград	ЮВ	135	315	5
	Воронеж	ЮВ	135	315	5
	Казань	ЗЮЗ	247,5	67,5	5
	Самара	ЗЮЗ	247,5	67,5	10
21.07.2024	Волгоград	ЮЮВ	157,5	337,5	10
	Воронеж	ЮЮВ	157,5	337,5	10
	Саратов	ЮВ	135	315	10
25.07.2024	Волгоград	ЮВ	135	315	10
	Петрозаводск	ЮЗ	225	45	10
	Самара	Ю	180	0	15
	Смоленск	ЮЮЗ	202,5	22,5	10
	СПб	ЮЗ	225	45	10
27.07.2024	Волгоград	ЮЮВ	157,5	337,5	10
	Воронеж	ЮВ	135	315	10
	Самара	ЮВ	135	315	10
	Саратов	ЮВ	135	315	10
28.07.2024	Волгоград	ЮЮВ	157,5	337,5	10

	Воронеж	ВЮВ	112,5	292,5	10
	Самара	ЮВ	135	315	10
	Саратов	ВЮВ	112,5	292,5	10
06.08.2024	Воронеж	ЮЮЗ	202,5	22,5	10
	Казань	ВЮВ	112,5	292,5	10
	Москва	Ю	180	0	10
	НН	ЮВ	135	315	10
07.08.2024	Архангельск	ЮЮЗ	202,5	22,5	10
	Петрозаводск	ЮЮЗ	202,5	22,5	10
09.08.2024	Волгоград	ЮВ	135	315	10
	Смоленск	ЮЮВ	157,5	337,5	10
10.08.2024	Волгоград	ЮВ	135	315	10
	Воронеж	ЮВ	135	315	10
	Пермь	ЗСЗ	292,5	112,5	10
	Ростов	ВЮВ	112,5	292,5	10
	Саратов	ЮВ	135	315	15
11.08.2024	Пермь	ЗСЗ	292,5	112,5	10
14.08.2024	Петрозаводск	ЮЮВ	157,5	337,5	10
25.08.2024	Волгоград	ЮЮЗ	202,5	22,5	10
	Казань	Ю	180	0	10
30.08.2024	Волгоград	З	270	90	10
	Воронеж	ЮЗ	225	45	10
	Казань	Ю	180	0	10
	Москва	ЮЮЗ	202,5	22,5	10
	Саратов	ЗЮЗ	247,5	67,5	10
	Смоленск	З	270	90	10
31.08.2024	Воронеж	З	270	90	15
	Казань	ЮЮЗ	202,5	22,5	10
	Москва	СЗ	315	135	10
	Самара	ЮЗ	225	45	10
01.09.2024	Воронеж	ЗСЗ	292,5	112,5	10
	Казань	ЗСЗ	292,5	112,5	10
	Самара	ЗЮЗ	247,5	67,5	10
	Саратов	З	270	90	10
07.09.2024	Волгоград	ЗЮЗ	247,5	67,5	10
	Воронеж	ЮЗ	225	45	10
	Казань	Ю	180	0	10
	Петрозаводск	СВ	45	225	10
08.09.2024	Воронеж	З	270	90	10
	Казань	ЮЮЗ	202,5	22,5	10
	Москва	ЗЮЗ	247,5	67,5	10
	НН	ЮЮЗ	202,5	22,5	10
	Пермь	ЮВ	135	315	10
	Смоленск	СЗ	315	135	5

Приложение 3

Дата	Город	Реальный ветер		Суммарное движение		Насекомые		Скорость насекомых
		Vx	Vy	Wx	Wy	Ux	Uy	
29.06.2024	Архангельск	4,0	5,0	7,1	7,1	3,1	2,1	3,7
	Волгоград	6,1	-9,0	-5,7	-13,9	-11,8	-4,8	12,8
	Воронеж	0,7	-2,9	3,8	-9,2	3,1	-6,3	7,1
	Казань	0,9	-7,4	-5,7	-13,9	-6,7	-6,4	9,3
	Махачкала	4,4	-1,9	10,6	-10,6	6,2	-8,7	10,7
	Москва	2,5	-0,7	9,2	-3,8	6,7	-3,2	7,4
	Пермь	-2,4	-9,5	-10,6	-10,6	-8,2	-1,1	8,3
	Ростов	-5,7	-1,3	-9,2	-3,8	-3,6	-2,5	4,4
	Самара	1,3	-10,6	0,0	-15,0	-1,3	-4,4	4,6
	Саратов	-1,6	-8,2	0,0	-15,0	1,6	-6,8	6,9
	Смоленск	1,4	2,6	3,8	9,2	2,4	6,6	7,0
30.06.2024	Казань	4,5	-1,4	9,2	-3,8	4,7	-2,5	5,3
	НН	1,7	1,2	10,0	0,0	8,3	-1,2	8,3
	Пермь	0,0	-6,0	10,6	-10,6	10,6	-4,6	11,6
	Самара	1,4	-9,0	5,7	-13,9	4,3	-4,9	6,5
	Саратов	2,9	-5,2	7,1	-7,1	4,2	-1,8	4,5
	Смоленск	3,6	-0,1	7,1	7,1	3,5	7,2	8,0
01.07.2024	Самара	2,9	-5,9	7,1	-7,1	4,2	-1,1	4,3
03.07.2024	Волгоград	-2,7	5,3	-7,1	7,1	-4,4	1,8	4,8
	Воронеж	2,6	2,7	3,8	9,2	1,3	6,6	6,7
	Казань	2,0	2,9	7,1	7,1	5,1	4,2	6,6
	НН	2,5	2,9	5,7	13,9	3,2	11,0	11,5
	Пермь	5,8	-1,6	9,2	3,8	3,4	5,4	6,4
	Самара	-4,1	-1,8	-9,2	-3,8	-5,1	-2,0	5,5
04.07.2024	Волгоград	-3,5	1,5	-10,6	10,6	-7,1	9,1	11,6
	Казань	-0,1	4,0	-3,8	9,2	-3,7	5,2	6,4
	Пермь	4,9	0,9	9,2	-3,8	4,3	-4,7	6,4
	Петрозаводск	-2,1	0,8	-5,7	13,9	-3,7	13,1	13,6
	Самара	-4,7	2,8	-10,6	10,6	-5,9	7,8	9,8
10.07.2024	Москва	-0,7	-3,6	-7,1	-7,1	-6,4	-3,4	7,3
	НН	0,9	-5,4	-3,8	-9,2	-4,7	-3,8	6,0
	Самара	0,7	-8,5	-10,6	-10,6	-11,3	-2,1	11,5
	Смоленск	-2,7	-3,6	-7,1	-7,1	-4,4	-3,5	5,6
14.07.2024	Мурманск	2,6	4,4	10,6	10,6	8,0	6,2	10,1
	Самара	0,0	-4,9	-5,7	-13,9	-5,7	-9,0	10,6
15.07.2024	Волгоград	-4,1	-2,9	-7,1	-7,1	-3,0	-4,2	5,1
	Казань	1,6	-3,6	-7,1	-7,1	-8,7	-3,4	9,4

	Саратов	3,3	-0,6	-7,1	-7,1	-10,4	-6,4	12,2
	Смоленск	0,0	-2,0	-3,8	-9,2	-3,8	-7,2	8,2
	СПб	10,6	-1,3	9,2	-3,8	-1,4	-2,5	2,9
16.07.2024	Казань	-4,2	-3,7	-7,1	-7,1	-2,9	-3,3	4,4
	Москва	2,5	-4,3	-9,2	-3,8	-11,7	0,5	11,7
	Мурманск	-2,0	-2,4	-7,1	7,1	-5,1	9,5	10,8
	НН	-2,9	0,6	-3,8	-9,2	-0,9	-9,9	9,9
	Пермь	-4,0	-2,9	-7,1	-7,1	-3,0	-4,1	5,1
	Смоленск	-2,2	1,3	7,1	7,1	9,2	5,8	10,9
17.07.2024	Архангельск	6,6	-6,1	7,1	-7,1	0,4	-1,0	1,1
	Волгоград	-1,7	-2,5	-3,5	-3,5	-1,8	-1,1	2,1
	Воронеж	2,1	-3,9	-7,1	-7,1	-9,1	-3,2	9,7
	Петрозаводск	3,1	-0,5	9,2	-3,8	6,2	-3,3	7,0
	Самара	-3,4	-2,1	-4,6	-1,9	-1,2	0,2	1,2
	Саратов	-3,0	-0,3	-3,8	-9,2	-0,8	-9,0	9,0
18.07.2024	Воронеж	1,2	-4,2	9,2	-3,8	8,1	0,4	8,1
	Саратов	-2,4	-4,9	7,1	-7,1	9,5	-2,1	9,7
19.07.2024	Архангельск	-6,5	-2,2	-10,6	-10,6	-4,1	-8,4	9,3
	Волгоград	1,8	-3,1	3,5	-3,5	1,7	-0,4	1,8
	Воронеж	6,7	-5,8	3,5	-3,5	-3,2	2,3	3,9
	Казань	2,5	-0,8	-4,6	-1,9	-7,1	-1,1	7,2
	Самара	-0,5	-2,9	-9,2	-3,8	-8,7	-1,0	8,8
25.07.2024	Волгоград	2,5	-6,1	7,1	-7,1	4,6	-1,0	4,7
	Петрозаводск	-4,3	-0,4	-7,1	-7,1	-2,8	-6,7	7,3
	Самара	1,3	-10,3	0,0	-15,0	-1,3	-4,7	4,9
	Смоленск	-1,5	-0,2	-3,8	-9,2	-2,3	-9,1	9,4
	СПб	-4,3	-2,1	-7,1	-7,1	-2,8	-5,0	5,7
27.07.2024	Волгоград	-3,8	-1,4	3,8	-9,2	7,6	-7,9	10,9
	Воронеж	2,3	-1,8	7,1	-7,1	4,8	-5,3	7,1
	Самара	1,5	-6,8	7,1	-7,1	5,6	-0,2	5,6
	Саратов	3,1	-1,7	7,1	-7,1	4,0	-5,4	6,7
28.07.2024	Волгоград	3,5	-3,8	3,8	-9,2	0,3	-5,4	5,4
	Воронеж	5,7	-2,9	9,2	-3,8	3,5	-0,9	3,7
	Самара	4,9	-4,9	7,1	-7,1	2,2	-2,2	3,1
	Саратов	5,9	-3,0	9,2	-3,8	3,4	-0,8	3,5
06.08.2024	Воронеж	0,2	-3,2	-3,8	-9,2	-4,0	-6,0	7,3
	Казань	2,4	-1,7	9,2	-3,8	6,8	-2,1	7,1
	Москва	0,4	-3,5	0,0	-10,0	-0,4	-6,5	6,5
	НН	3,9	-3,0	7,1	-7,1	3,2	-4,1	5,2
07.08.2024	Архангельск	-2,6	-2,0	-3,8	-9,2	-1,2	-7,2	7,3
	Петрозаводск	-3,9	-4,4	-3,8	-9,2	0,0	-4,9	4,9

09.08.2024	Волгоград	8,1	-0,3	7,1	-7,1	-1,0	-6,8	6,9
	Смоленск	3,2	-1,5	3,8	-9,2	0,7	-7,8	7,8
10.08.2024	Волгоград	4,9	-4,4	7,1	-7,1	2,2	-2,7	3,4
	Воронеж	0,7	-2,4	7,1	-7,1	6,4	-4,7	7,9
	Пермь	-2,8	2,3	-9,2	3,8	-6,4	1,6	6,6
	Ростов	2,6	-1,0	9,2	-3,8	6,6	-2,8	7,2
	Саратов	5,6	-4,2	10,6	-10,6	5,0	-6,4	8,1
11.08.2024	Пермь	-6,4	0,9	-9,2	3,8	-2,8	2,9	4,0
14.08.2024	Петрозаводск	1,7	-5,1	3,8	-9,2	2,2	-4,1	4,6
25.08.2024	Волгоград	-5,1	-2,1	-3,8	-9,2	1,3	-7,1	7,3
	Казань	1,2	-4,9	0,0	-10,0	-1,2	-5,1	5,3
30.08.2024	Волгоград	-5,5	0,5	-10,0	0,0	-4,5	-0,5	4,5
	Воронеж	-5,9	-1,2	-7,1	-7,1	-1,2	-5,8	6,0
	Казань	-0,9	-3,9	0,0	-10,0	0,9	-6,1	6,2
	Москва	-1,5	-1,4	-3,8	-9,2	-2,4	-7,9	8,2
	Саратов	-2,7	-1,6	-9,2	-3,8	-6,6	-2,3	6,9
	Смоленск	-3,0	0,4	-10,0	0,0	-7,0	-0,4	7,0
31.08.2024	Воронеж	-5,6	2,0	-15,0	0,0	-9,4	-2,0	9,6
	Казань	-1,6	-1,4	-3,8	-9,2	-2,2	-7,9	8,2
	Москва	0,0	4,5	-7,1	7,1	-7,1	2,6	7,5
	Самара	-2,3	-7,4	-7,1	-7,1	-4,8	0,3	4,8
01.09.2024	Воронеж	-5,4	-0,2	-9,2	3,8	-3,8	4,1	5,6
	Казань	0,9	-1,8	-9,2	3,8	-10,1	5,6	11,6
	Самара	-4,0	-2,0	-9,2	-3,8	-5,2	-1,8	5,5
	Саратов	-5,0	-2,5	-10,0	0,0	-5,0	2,5	5,6
07.09.2024	Волгоград	-9,3	1,4	-9,2	-3,8	0,1	-5,2	5,2
	Воронеж	-4,9	-0,7	-7,1	-7,1	-2,2	-6,4	6,8
	Казань	1,4	-3,6	0,0	-10,0	-1,4	-6,4	6,5
	Петрозаводск	6,6	1,9	7,1	7,1	0,5	5,2	5,2
08.09.2024	Воронеж	-2,7	1,3	-10,0	0,0	-7,3	-1,3	7,4
	Казань	1,2	-2,1	-3,8	-9,2	-5,0	-7,1	8,7
	Москва	-0,6	1,0	-9,2	-3,8	-8,6	-4,9	9,9
	НН	0,9	-0,5	-3,8	-9,2	-4,7	-8,7	9,9
	Пермь	2,6	-2,7	7,1	-7,1	4,5	-4,4	6,3
	Смоленск	-2,2	4,1	-3,5	3,5	-1,3	-0,6	1,5

Дата	Город	Направление ветра на минимальной высоте,°	Направление ветра на 1 км,°	Поворот ветра,°
29.06.2024	Архангельск	200	226	26
	Волгоград	350	332	18
	Воронеж	360	346	14
	Казань	15,0	360	15
	Махачкала	120,0	327	153
	Москва	290,0	73	143
	Пермь	345,0	6	21
	Ростов	85,0	70,0	15
	Самара	355,0	75,0	80
	Саратов	350	349,0	1
	Смоленск	200	214,0	14
30.06.2024	Казань	270,0	307	37
	НН	185,0	308	123
	Пермь	340	348	8
	Самара	325,0	348,0	23
	Саратов	340	4,0	24
	Смоленск	270	275,0	5
01.07.2024	Самара	355,0	346,0	9
03.07.2024	Волгоград	130	126	4
	Воронеж	180	186	6
	Казань	185	223	38
	НН	250,0	211	39
	Пермь	300	233	67
	Самара	75	56,0	19
04.07.2024	Волгоград	130	105	25
	Казань	165	184	19
	Пермь	255	250	5
	Петрозаводск	70,0	205,0	135
	Самара	110	136,0	26
10.07.2024	Москва	15,0	4	11
	НН	330,0	355	25
	Самара	330	38,0	68
	Смоленск	20	41,0	21
14.07.2024	Мурманск	200,00	245,0	45
	Самара	325	8,0	43
15.07.2024	Волгоград	60,0	44	16
	Казань	295	13	78
	Саратов	40	124,0	84
	Смоленск	360	351,0	9
	СПб	250	276,0	26
16.07.2024	Казань	30	40	10
	Москва	320,0	340	20
	Мурманск	20,00	63,0	43
	НН	130,0	88	42

	Пермь	45	44	1
	Смоленск	110	152,0	42
17.07.2024	Архангельск	340	318	22
	Волгоград	360,0	37	37
	Воронеж	360	324	36
	Петрозаводск	290,0	264,0	26
	Самара	20	90,0	70
	Саратов	170	37,0	133
18.07.2024	Воронеж	315	329	14
	Саратов	340	340,0	0
19.07.2024	Архангельск	90	88	2
	Волгоград	310	326	16
	Воронеж	335	334	1
	Казань	265	324	59
	Самара	10	341,0	29
21.07.2024	Волгоград	270	306	36
	Воронеж	315	308	7
	Саратов	320	280,0	40
25.07.2024	Волгоград	0,0	234	126
	Петрозаводск	110,0	35,0	75
	Самара	335	2,0	27
	Смоленск	90	70,0	20
	СПб	50	66,0	16
27.07.2024	Волгоград	70	75	5
	Воронеж	45	300	105
	Самара	320	332,0	12
	Саратов	310	276,0	34
28.07.2024	Волгоград	360	324	36
	Воронеж	270	281	11
	Самара	330	296,0	34
	Саратов	310	298,0	12
06.08.2024	Воронеж	360	12	12
	Казань	315	277	38
	Москва	0,0	314	46
	НН	310	306	4
07.08.2024	Архангельск	90	39	51
	Петрозаводск	70,0	42,0	28
09.08.2024	Волгоград	230	291	61
	Смоленск	290	297,0	7
10.08.2024	Волгоград	280	335	55
	Воронеж	360	307	53
	Пермь	135	99	36
	Ростов	230,0	308,0	78
	Саратов	310	46,0	96
11.08.2024	Пермь	135	95	40
14.08.2024	Петрозаводск	315	348,0	33
25.08.2024	Волгоград	70	66	4
	Казань	340	359	19
30.08.2024	Волгоград	110	85	25
	Воронеж	90	88	2

	Казань	290	343	53
	Москва	25,0	36	11
	Саратов	40	96,0	56
	Смоленск	135	102,0	33
31.08.2024	Воронеж	90,0	99	9
	Казань	45	360	45
	Москва	0,0	193	167
	Самара	60	17,0	43
01.09.2024	Воронеж	135,0	104	31
	Казань	50	283	127
	Самара	20	93,0	73
	Саратов	50	5,0	45
07.09.2024	Волгоград	110	88	22
	Воронеж	45,0	77	32
	Казань	345	355	10
	Петрозаводск	225,0	239,0	14
08.09.2024	Воронеж	90,0	70	20
	Казань	305	8	63
	Москва	360	118	118
	НН	300	317	17
	Пермь	290	320	30
	Смоленск	160	140,0	20