

Иллюстрация возможностей доплеровского метеорологического радиолокатора на примере ДМРЛ-С Белгород

Доплеровский метеорологический радиолокатор с двойной поляризацией ДМРЛ-С предназначен для обеспечения метеорологической информацией об облачности, осадках и связанных с ними явлениях погоды прогностических органов Росгидромета, АМЦ, АМСГ и Центров УВД гражданской авиации, а также других потребителей радиолокационной метеорологической информации.

Радиолокационные наблюдения на сети ДМРЛ-С проводятся синхронно по единому регламенту на всех радиолокаторах сети ДМРЛ Росгидромета.

Каждый десятиминутный цикл включает производство наблюдений в 2-х режимах: в режиме «Отражаемость» и в режиме «Скорость», в каждом режиме данные наблюдений записываются в т. н. «объёмный файл». Радиус зоны радиолокационного обзора в режиме «Отражаемость» составляет 250 км.

Радиолокационные наблюдения в режиме «Скорость» с высокой частотой повторения зондирующих импульсов ($PRF \sim 1$ кГц) обеспечивают более точное измерение доплеровских характеристик (радиальной скорости V , ширины спектра W), однако при этом сокращается дальность зондирования с 250 до 125 км.

В каждом обзоре радиолокатор последовательно проводит азимутальное круговое сканирование атмосферы на нескольких углах места антенны в диапазоне от 0 до 90°. В результате, в каждом режиме наблюдений р/л данные записываются в выходном «объёмном файле», в котором в сферической СК последовательно, для каждого элемента конического сечения, сохраняются координаты – дальность, азимут и угол места, а также измеренные р/л характеристики радиоэха. [1]

Анализ ливневых осадков. Ливневые осадки. Осадки большой интенсивности, но мало продолжительные, выпадающие из кучево-дождевых облаков как в капельно-жидком, так и в твердом (снег, мокрый снег, крупа, град) виде. Характеризуются быстрым нарастанием интенсивности в начале выпадения, резкими ее колебаниями, резким прекращением, быстрыми изменениями облачности; сопровождаются усилениями ветра с порывами и шквалами, нередко (но не всегда) грозowymi явлениями. Наблюдаются в неустойчивых воздушных массах, холодных (особенно в тылу циклона) или местных (над сушей летом), при прохождении холодных фронтов, летом над сушей также и в связи с теплыми фронтами.[10]

Рассмотрим ситуацию 24 июля 2019 9:00 UTC над Белгородской областью (рис. 1 а, б). Очевидно, что при столкновении теплого фронта с холодной воздушной массой, в котором произошло быстрое развитие конвективных явлений образовалась кучево-дождевая облачность мощностью 11.7 км. Причём в 8:00 не было никакой облачности, и за 2 часа образовался грозовой очаг с умеренным градом (рис.2).

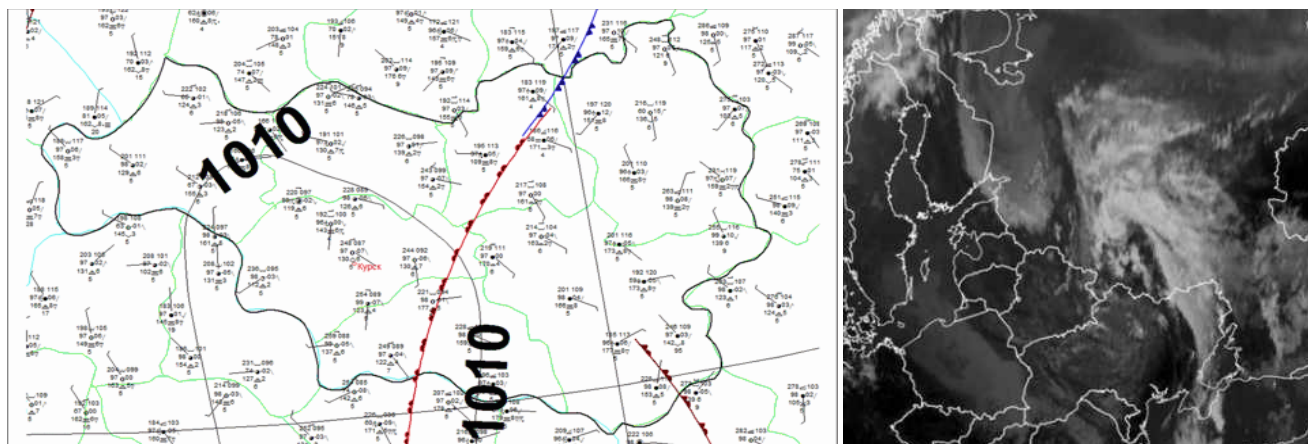


Рисунок 1. 24 июля 2019 9:00 UTC Белгородская область
а) приземная карта с отмеченными фронтами; б) инфракрасный снимок

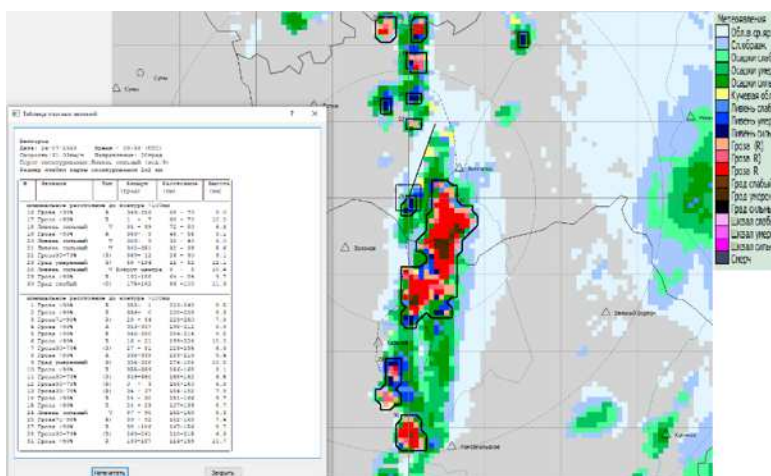


Рисунок 2. Карта метеоявлений с таблицей опасных явлений 24 июля 2019 9:50 UTC. Номер рассматриваемой зоны 23.

На рисунках 3 представлены вертикальные разрезы облачности по отражаемости. На этих разрезах видно, что облачность сильно развита конвективно и с высотой отражаемость уменьшается равномерно.

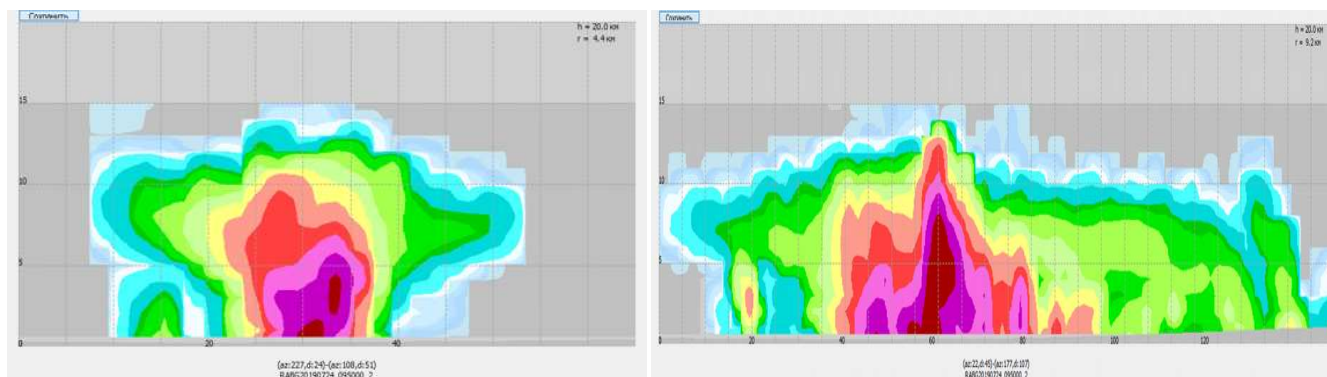


Рисунок 3. а) Поперечный разрез



Карта Вертикальной интегральной водности – массы жидкой воды на единицу площади в вертикальном столбе по данным о фактическом изменении отражаемости. Согласно [2], величина VIL может быть хорошим показателем для идентификации гроз и града. Исследования, проведённые в 2017-19 г.г. в ФГБУ «ЦАО» показали, что нижний порог значения VIL для явления «град» в большинстве случаев составляет 12 кг/м². [1]

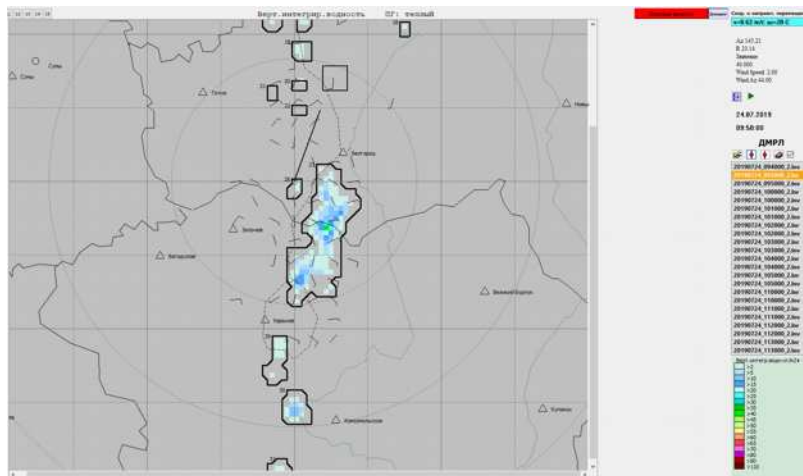


Рисунок 4. Карта вертикальной интегральной водности. В заданной точке VIL=40 кг/ м²

Возможность одновременного излучения и принятия сигнала на вертикальной и горизонтальной поляризации позволяет измерять средние значения радиолокационной отражаемости Zdr, определённой по вертикальному dV и горизонтальному dH размерам частиц.

Величина Zdr позволяет судить о форме и, следовательно, о фазовом составе гидрометеоров. Положительная величина Zdr означает горизонтальную ориентацию рассеивателей, отрицательная – вертикальную. Для капель дождя характерно умеренное увеличение Zdr с одновременным ростом ZH, для града - Zdr ~ 0 при больших значениях Z: Z>48 dBZ. [1]

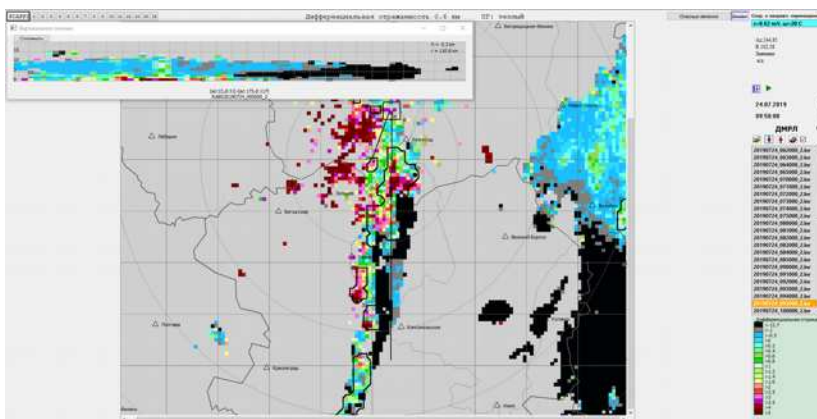


Рисунок 5. Карта дифференциальной отражаемости на 0.6 км с вертикальным разрезом.

“Голубой” зоне на разрезе соответствует значение Zdr~0, именно из этой зоны выпадают осадки в виде града. “Чёрной” зоной отмечена часть облачности развивающаяся конвективно.

Обложные осадки (обложной дождь, обложной снег). Длительные, достаточно равномерной интенсивности осадки в виде дождя или снега, одновременно выпадающие на значительной площади. Выпадают из слоисто-дождевых и высоко-слоистых облаков. [10] Особенность обложных осадков - «яркая полоса». Надёжным признаком тёплого фронта с зоной обложных осадков является наличие полосы таяния («яркой полосы») – зоны повышенной (на 5÷10 dBZ) отражаемости на вертикальном профиле Z толщиной порядка 300 м, располагающейся немного ниже уровня нулевой изотермы.[1] Для определения уровня нулевой изотермы каждые 12 часов на ДМРЛ поступает информация аэрологического зондирования с ближайшей аэрологической станции. Для ДМРЛ-С Белгород ближайшая станция Харьков.

«Яркая полоса» возникает в районе нулевой изотермы при переходе частиц осадков из твёрдой в жидкую фазу, при этом сначала происходит слипание отдельных снежинок в присутствии капель воды в снежные хлопья, которые имеют существенно больший размер по сравнению со снежинками и дождевыми каплями. По мере падения они обводняются - покрываются жидкой плёнкой - и воспринимаются радиолокатором как большие капли воды (у капель р/л отражаемость больше ~ в 5 раз, чем у ледяных сфер того же размера) – в результате Z резко возрастает. При дальнейшем падении происходит таяние и разделение обводнённых твёрдых частиц на отдельные дождевые капли существенно меньших размеров – в результате Z падает. Так формируется высотный максимум отражаемости Z - «яркая полоса». [1]

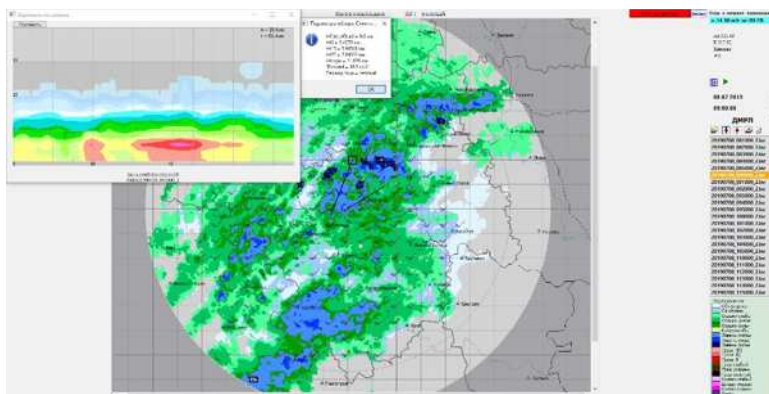


Рисунок 6. 8 июля 2019 9:00 UTC заметна яркая полоса на высоте 2.2-3.6 км.
По параметрам обзора высота нулевой изотермы – 3.43км.

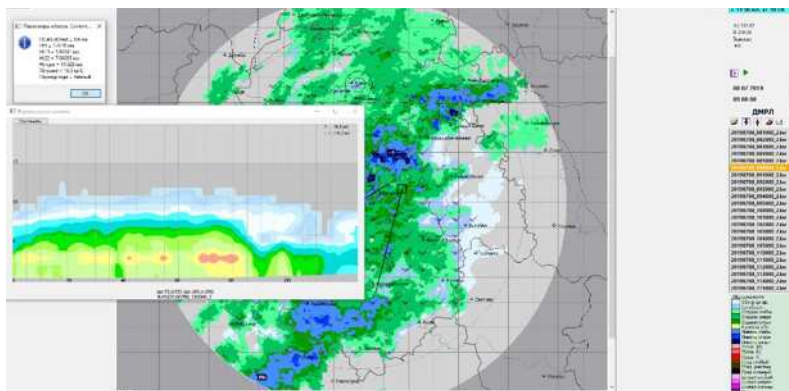


Рисунок 7. 8 июля 2019 9:00 UTC заметна яркая полоса на высоте 3.0-3.2 км.

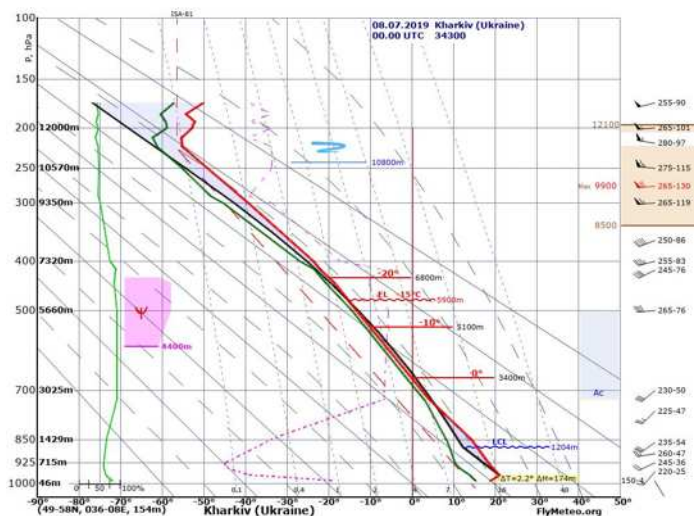


Рисунок 8. Аэрологическая таблица за 8 июля 00:00 UTC, станция Харьков.

Анализ сумм осадков. Карты накопленных сумм осадков за прошедший период могут использоваться для ориентировочной оценки ожидаемого количества осадков. Этот вид информации позволяет оценить количество выпавших осадков за периоды 1, 3, 6, 12, 24 ч в радиусе 100 км от места установки радиолокатора. Анализ сравнения радиолокационных накопленных сумм осадков с данными наземной наблюдательной сети показывает, что погрешность количественной оценки среднесуточного слоя выпавших осадков по данным ДМРЛ может превышать 50%. Данные о количестве сильных осадков, полученных от ДМРЛ, имеют зачастую значительно заниженные значения.[1]

Таблица 1.
Сравнение данных по ДМРЛ с данными по МС

МС/Агро	Готня	Белгород	ДМРЛ	Готня Inv	Готня Inr	Белгород Inv	Белгород Inr	Δ Готня Inv	Δ Готня Inr	Δ Белгород Inv	Δ Белгород Inr
1											
2											
3											
4											
5											
6	1.1	2.7		2.106	1.924	3.308	3.788	1.006	0.824	0.608	1.088
7		1.4		0.22	0.22	1.924	2.106	0.22	0.22	0.524	0.706
8	9.2	28.2		11.712	12.253	14.03	16.065	2.512	3.053	-14.17	-12.135
9	2.4	0.4		2.204	2.889	0.302	0.316	-0.196	0.489	-0.098	-0.084
10	5.7	1.2		3.023	3.621	1.84	2.523	-2.677	-2.079	0.64	1.323
11		1				0.651	1.023	0	0	-0.349	0.023
12								0	0	0	0
13								0	0	0	0
14								0	0	0	0
15	0.5			0.893	0.713			0.393	0.213	0	0
16	2.9			4.146	5.436			1.246	2.536	0	0
17		1				4.338	3.788	0	0	3.338	2.788
18								0	0	0	0
19								0	0	0	0
20								0	0	0	0
21								0	0	0	0
22								0	0	0	0
23	3.7	2.5		2.762	2.64	2.523	3.788	-0.938	-1.06	0.023	1.288
24		1.3				6.512	10.228	0	0	5.212	8.928
25								0	0	0	0
26		4				1.171	1.282	0	0	-2.829	-2.718
27								0	0	0	0
28								0	0	0	0
29		0.9				5.196	4.338	0	0	4.296	3.438
30								0	0	0	0
31	3.1	5.5		5.196	5.436	4.338	5.436	2.096	2.336	-1.162	-0.064
	28.6	50.1		32.262	35.132	46.133	54.681	3.662	6.532	-3.967	4.581
			Correl	0.866844	0.869464	0.854057712	0.813638337				

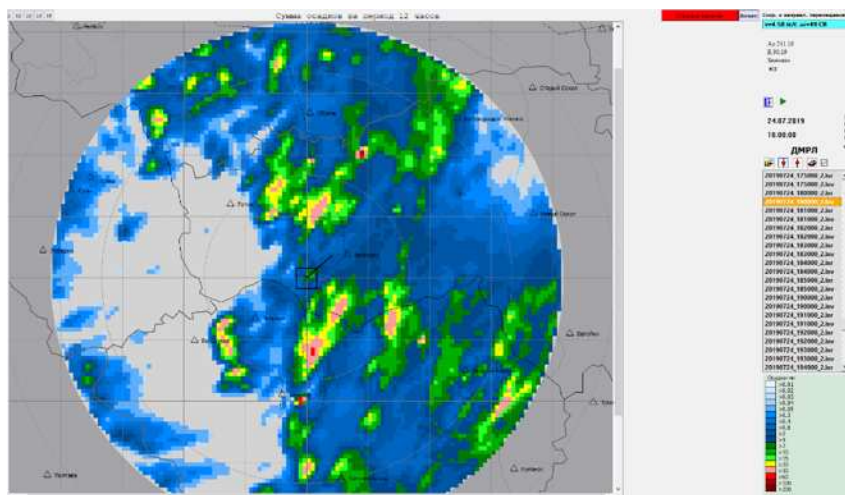


Рисунок 9. Карта сумм осадков за 24 июля за день по ДМРЛ.

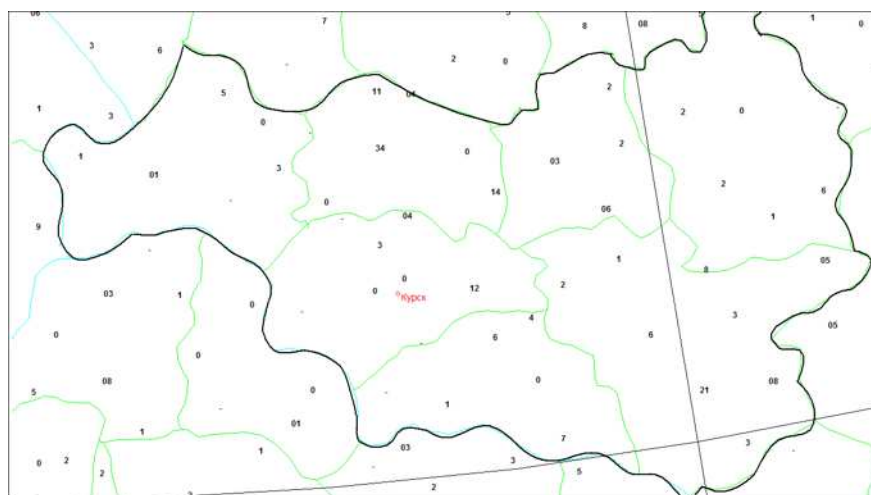


Рисунок 10. Карта сумм осадков за 24 июля за день по МС.

Были взяты ряды наблюдений со станций Белгородской области за июль 2019 года, выведена разница и взята корреляция по данным с МС и ДМРЛ.

Статистика, показала, что данные по осадкам по ДМРЛ неточны. Они дают лишь примерное представление о количестве осадков в определенных точках. Но полезное свойство заключается в том, что в тех местах, где происходили опасные явления может не быть метеостанции и хотя бы приблизительная оценка количества осадков по ДМРЛ может быть крайне полезна при анализе метеорологических явлений. Корреляция составила от 0.814 до 0.869. ДМРЛ не нуждается в изменении поправки на измерения сумм осадков, что и подтверждается в [11].

Анализ радиальных скоростей с помощью ДМРЛ. Радиальные скорости в приземном слое. Эффект Доплера — изменение частоты и, соответственно, длины волны излучения, воспринимаемой наблюдателем (приёмником), вследствие движения источника излучения относительно наблюдателя (приёмника). Причина эффекта Доплера заключается в том, что, когда источник волн движется в направлении наблюдателя, каждый последующий гребень волны выходит из положения, более близкого к наблюдателю, чем гребень предыдущей волны. Таким образом, каждой последующей волне необходимо немного меньше времени, чтобы добраться до наблюдателя, чем предыдущей волне. Следовательно, время между приходом последовательных гребней волн на наблюдателя сокращается, вызывая увеличение частоты. [7]

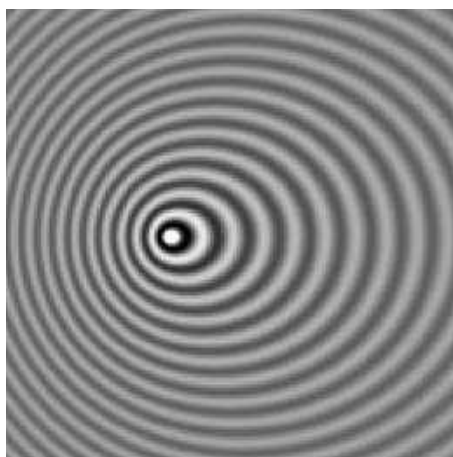


Рисунок 11. Иллюстрация эффекта Доплера

Радиальную скорость можно просматривать на любом из уровней от 1 до 15 км. В ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» используется цветовая палитра, в которой диапазон отрицательных значений V_r (в направлении на радиолокатор) отображается в зелёных, а положительных значений V_r (в направлении от радиолокатора) – в фиолетово-красных тонах цветовой гаммы. Эти зоны разделяет линия нулевых значений скоростей V_r белого цвета. В окрестности этой линии направление движения гидрометеоров перпендикулярно направлению распространения радиолокационного луча. С помощью области нулевых значений скоростей V_r можно определить среднее направление движения совокупности гидрометеоров. Для этого необходимо через область максимальных скоростей провести прямую, перпендикулярную линии нулевых скоростей, которая и укажет направление движения потока гидрометеоров в облаке.[1] Стрелками на рисунках 12, 13 и 16 изображены примерные направления движения гидрометеоров на данных уровнях.

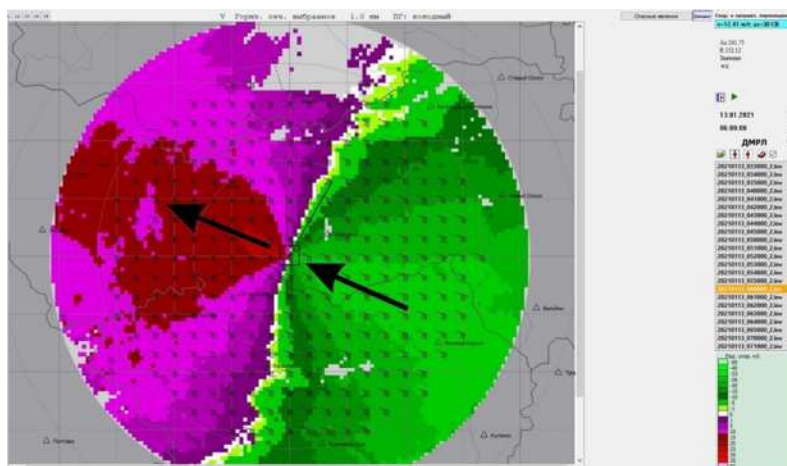


Рисунок 12. Карта радиальной доплеровской скорости на высоте 1 км в 6:00 UTC 13 января 2021 г.

Очевидно, что на уровне 1 км ветер имеет направление СЗЗ.

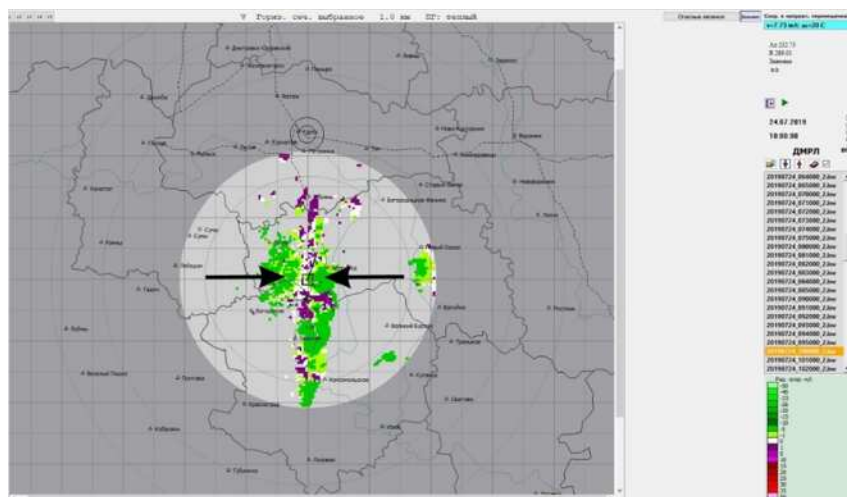


Рисунок 13. Карта радиальной доплеровской скорости на высоте 1 км в 10:00 UTC 24 июля 2019г.

На данном примере видно столкновение воздушных масс прямо над ДМРЛ, где и произошло развитие конвективных явлений, рассмотренных в первой главе.

Вертикальный и горизонтальный сдвиг ветра, турбулентность. Сдвиг ветра измеряется в м/с на 30 м высоты по вертикали (вертикальный сдвиг, Sv) и в м/с на 600 м по горизонтальной дальности (горизонтальный сдвиг, Sg) [8]. Наиболее общим определением сдвига ветра является следующее: “изменение скорости и/или направления ветра в пространстве, включая восходящие и нисходящие потоки воздуха» [9]. Важность сдвига ветра для авиации заключается в его воздействии на лётные характеристики воздушных судов (ВС) и, как следствие, в потенциально неблагоприятном влиянии на безопасность полётов, особенно при взлёте и посадке ВС. [1]

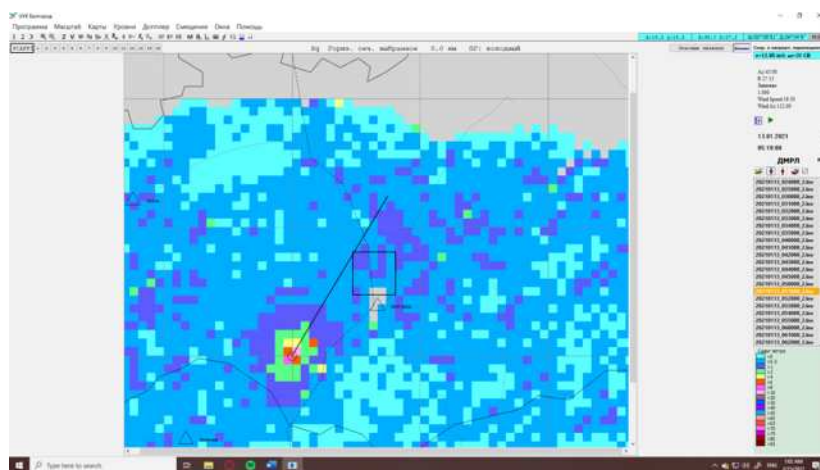


Рисунок 14. Карта горизонтального сдвига ветра на уровне ~200м в 5:10 UTC 13 января 2021 г.

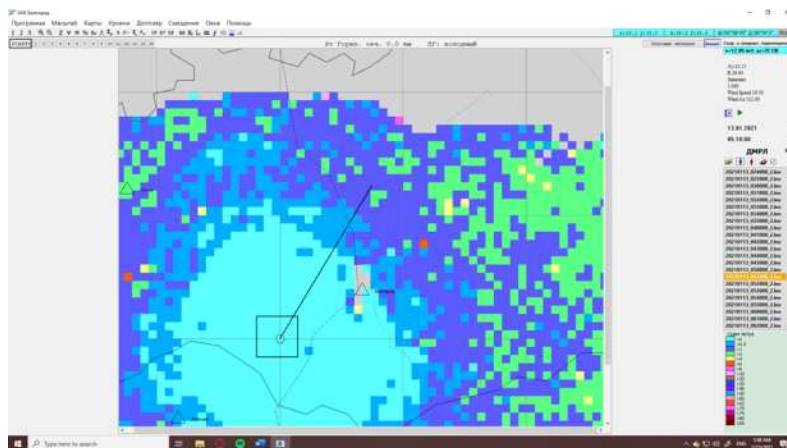


Рисунок 15. Карта вертикального сдвига ветра на уровне ~200м в 5:10 UTC 13 января 2021 г. Значения вертикального и горизонтального сдвига ветра над аэропортом Белгород равняются 1, что является характеристикой слабого сдвига ветра.

Струйные течения на разных высотах. С помощью вторичных продуктов ДМРЛ появляется возможность рассмотреть зоны струйных течений на разных высотах, что может быть полезно для авиации, так как можно точно определить зоны течений. Для сравнения, была взята аэрологическая станция Курск (расстояние 144 км), так как на станции Харьков измерения в 12:00 UTC не проводятся.

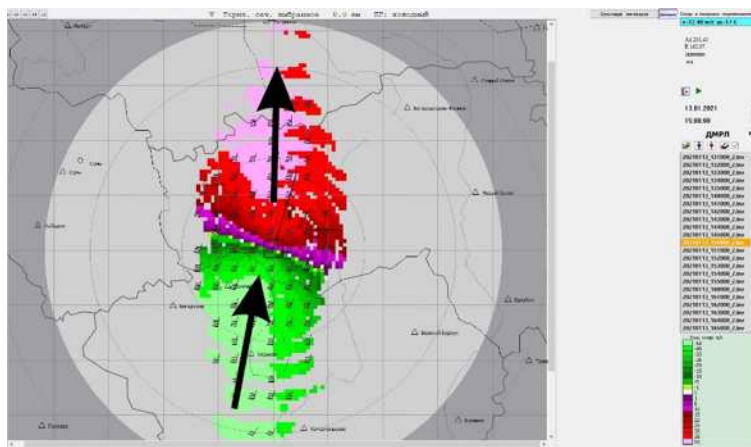


Рисунок 16. Карта радиальной доплеровской скорости на высоте 8 км в 13 января 15:00 UTC.

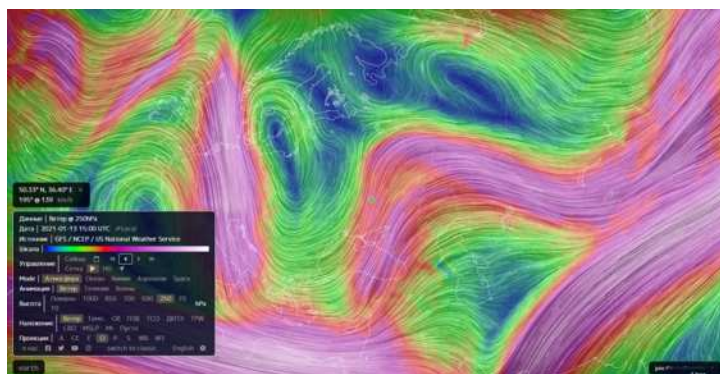


Рисунок 17. Модель скорости ветра на высоте 250 гПа 13 января 15:00 UTC.

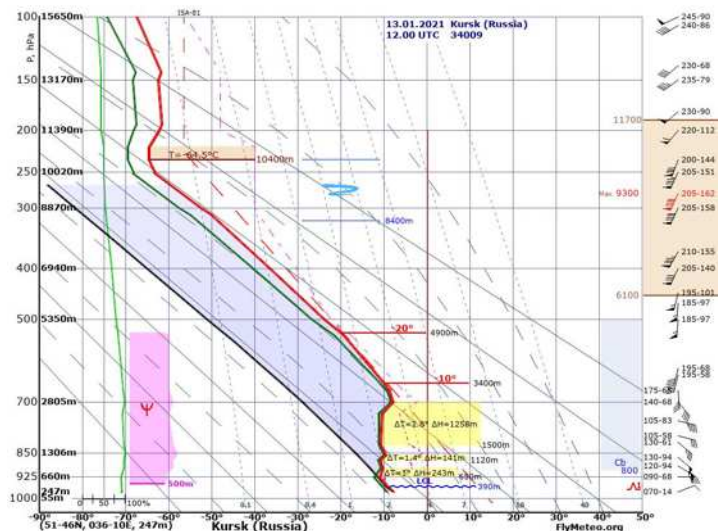


Рисунок 18. Аэрологическая таблица за 13 января 12:00 UTC, станция Курск.

Заключение. Данные о ливневых и обложных осадках могут быть полезны при прогнозе с небольшой заблаговременностью (до 6 часов). При пост-анализе метеорологических явлений радиолокационные данные являются основным источником, так как позволяют определить точное расположение облачности в определенный момент времени, понять причину образования, стадию развития, её состав и характер выпадения осадков. Без ДМРЛ это является сложнейшей задачей, так как большинство из тех характеристик, которые будут необходимы при анализе, невозможно рассчитать без использования радиолокационного метода зондирования атмосферы. У метеорологических радиолокаторов есть проблемы с расчётом сумм осадков. За время эксплуатации большинство из них были решены, но проблемы, связанные с ослаблением радиолуча в осадках и подсчёта сумм осадков, остаются комплексными проблемами, над которыми ведутся работы. Анализ радиальных скоростей по ДМРЛ преимущественно используется в авиационном прогнозе. Пилотам самолётов необходимо знать о сдвигах ветра при взлёте и посадке, а данные о струйных течениях помогут грамотно проложить маршрут и сэкономить, как время для пассажиров, так и уменьшить издержки для авиакомпании. Сеть ДМРЛ в России только недавно начала развиваться, но её преимущества уже очевидны. В недалёком будущем планируется покрыть большую часть Сибири и улучшить техническое обслуживание уже рабочих локаторов.

Список литературы

1. Методические Указания по использованию информации ДМРЛ-С в синоптической практике третья редакция. Росгидромет 2019г
2. Lahiff, C.T., Vertically integrated liquid density and its associated hail size range across the burlington, vermont county warning area, Eastern Region Technical Attachment, No. 2005-01, National Weather Service, NOAA, Dep. of Commerce. 20 pp., Bohemia, NY.
3. Данные с метеостанций и карты предоставлены ФГБУ «Центрально-Черноземное УГМС» г. Курск
4. Данные с метеостанций и ДМРЛ-С предоставлены Белгородский ЦГМС - филиал ФГБУ «Центрально-Черноземное УГМС»
5. <https://www.wetterzentrale.de>
6. <https://earth.nullschool.net/>
7. https://ru.wikipedia.org/wiki/Эффект_Доплера
8. Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации, Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации, ИКАО, Издание 19, 2016г., 218с.

9. Руководство по сдвигу ветра на малых высотах, ИКАО, Doc/9817-AN/449. Издание первое, 2005 г., 258 с.

10. <https://meteoinfo.ru>

11. Методическое письмо об итогах работы сети ДМРЛ Росгидромета в 2019г.