

## НАБЛЮДЕНИЕ МЕЗОЦИКЛОНА МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМ РАДИОЛОКАТОРОМ

*Д.А. Денисенков, В.Ю. Жуков, Г.Г. Шукин*

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, dimasden@yandex.ru

На примере наблюдения редких для климата России явлений суперячейки и мезоциклона показаны потенциальные возможности современного многопараметрического метеорологического радиолокатора. Рассматриваются новые методы распознавания суперячейки и мезоциклона, основанные на анализе спектральных и поляризационных характеристик радиолокационного сигнала. Приводится пример обнаружения суперячейки радиолокатором ДМРЛ-С.

*Ключевые слова:* радиометеорология, опасные явления погоды, метеорологическая радиолокация, суперячейка, мезоциклон.

## MESOCYCLONE OBSERVATION BY MULTI-PARAMETER METEOROLOGICAL RADAR

*D.A. Denisenkov, V.Y. Zhukov, G.G. Shchukin*

Mozhaisky Military Aerospace Academy, St. Petersburg, Russia

The article deals in detail with the case of observation of a cloud array characterized by a large (15 km) height of the upper boundary of cloud cover and the presence of areas with radar reflectivity of more than 60 dBZ by the DMRL-S meteorological radar installed in Valday (Novgorod region). Integrated application of the estimates of all measured parameters makes it possible to identify in this array the area where a rare weather phenomenon - a supercell - develops. The fact of formation of the hail area of large size is ascertained. It leads to the effect of depolarization attenuation - negative values of differential reflectivity of the echo signal of the meteorological targets.

The coordinates of vertical flows are determined by analyzing data on the cross-correlation coefficient of polarization constituents of received signal. Then the obtained result is compared with the one obtained by means of estimations of the average radial velocity of particles, their much coincidence being shown. At an altitude of 5 km, areas with sharp local speed changes are observed, indicating the existence of strong vortices. Sequential analysis of the data obtained during the whole time of existence of the supercell leads to identification of a zone 5 km in diameter with a "jump" of magnitude radial velocity of particles in a layer 1 km high at a distance of 100 km. The scale of this zone, its location and the magnitudes of the parameters of the signal received from it indicate the formation of another rare weather phenomenon in it - the mesocyclone.

*Keywords:* radio meteorology, hazardous weather phenomena, meteorological radar, supercell, mesocyclone.

---

**For citation:** *Denisenkov D.A., Zhukov V.Y., Shchukin G.G.* Mesocyclone Observation by Multi-Parameter Meteorological Radar. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 58: 9—19. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-9-19

---

## Введение

В течение последних десяти лет в России разворачивается сеть метеорологических радиолокаторов. Основным техническим средством для нее является отечественное изделие ДМРЛ-С. Набор его опций позволяет оценивать как традиционно измеряемую радиолокационную отражаемость метеоцели, так и спектральные [1] и поляризационные характеристики принимаемого сигнала [2]. В результате этого открываются широкие возможности в плане распознавания опасных явлений погоды, недоступных применяемым ранее некогерентным метеорологическим радиолокаторам типа МРЛ-5 [3]. Хорошей иллюстрацией сказанному может служить случай наблюдения такого опасного явления, распознавание которого требует применения всех «новых» измеряемых параметров [4]. Оптимальным с этой точки зрения объектом наблюдения можно считать мезоциклон — сложное образование, связанное с грозовыми облаками, мощными конвективными потоками и вихрями. В настоящей работе рассматривается случай наблюдения этого редкого природного явления с помощью радиолокатора ДМРЛ-С.

### Отличительные особенности мезоциклона

Мезоциклон — это воздушный вихрь, отличающийся от более известного смерча большими масштабами, меньшей скоростью вращения, а также большей (несколько десятков минут) продолжительностью жизни [5]. Возникает он на одной из стадий развития мощного грозового облака, называемого суперячейкой [6], структурная схема которой приведена на рис. 1 [7].

По сравнению с обычной конвективной ячейкой для нее характерны большая высота верхней границы облака (около 15 км) и более высокая скорость вертикальных воздушных потоков, наличие осадков в виде дождя и града, а также более длительный (несколько часов) период существования.

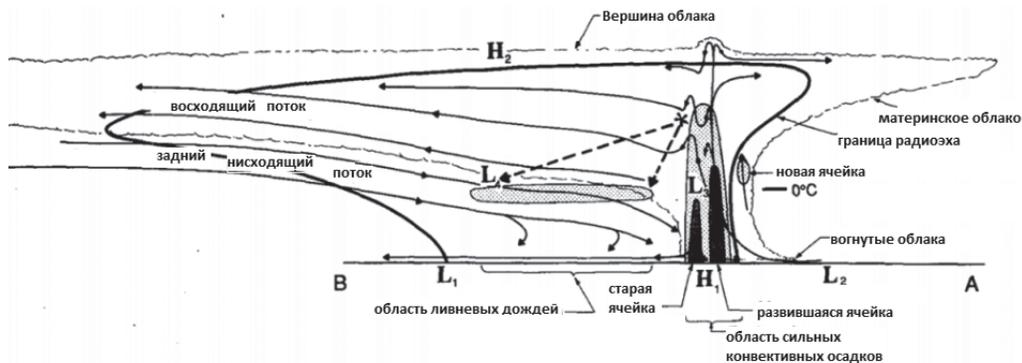


Рис. 1. Структурная схема суперячейки.

Fig. 1. Supercell structural diagram.

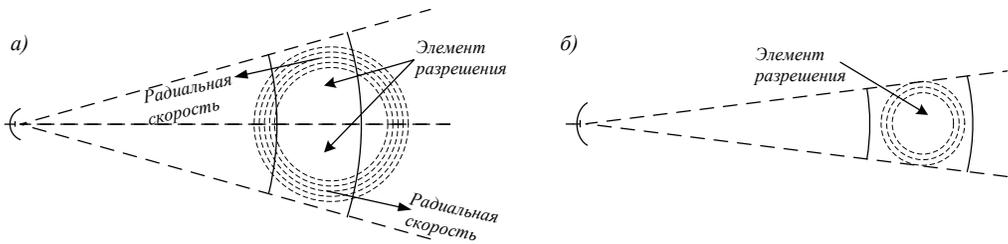


Рис. 2. Схема наблюдения смерча на малой (а) и большой (б) дальности.

Fig. 2. Scheme of observation of a tornado at short (a) and long (b) distance.

### Методы распознавания мезоциклона

Для метеорологического радиолокатора мезоциклон и смерч являются наиболее трудными для распознавания явлениями. В эпоху некогерентных метеорадаров разрабатывались различные методики по их обнаружению (например, по появлению характерного «крюка» на карте радиолокационной отражаемости), но каких-либо практически значимых результатов они не давали.

На современном этапе для этих целей используются средняя частота и ширина спектра отраженного сигнала [8]. При достаточно малой дальности, когда линейный размер элемента разрешения радиолокатора не превосходит внешний радиус зоны вращения воздуха, характерными признаками их существования являются резкое изменение величины доплеровского сдвига частоты сигнала, принимаемого от двух смежных по азимуту разрешаемых объемов [9] (рис. 2 а). На больших расстояниях остается только локальное уширение спектра сигнала (рис. 2 б), которое может вызываться целым набором других опасных явлений, таких как сдвиг ветра, вертикальные потоки, повышенная турбулентность, в результате чего обнаружение рассматриваемого явления существенно затрудняется. Следовательно, мезоциклон в силу его больших, чем у смерча, размеров, имеет больше шансов быть обнаруженным.

Однако и это является достаточно трудной задачей в случае отсутствия программы автоматического поиска смерча в программе вторичной обработки метеорологической информации, как это имело место во время описываемого события. Поэтому вместо того, чтобы исследовать все наблюдаемое поле облачности на предмет рассмотренного выше «скачка» значений радиальной скорости, авторы применяли следующую методику:

- 1) распознавалась суперячейка;
- 2) в локальной зоне ее существования искались признаки мезоциклона или смерча.

### Пример наблюдения мезоциклона

Суперячейка — редкое явление, особенно в условиях климата центра России. Единственный случай его наблюдения в зоне ответственности радиолокатора, установленного в г. Валдае Новгородской области (другими данными авторы не

располагали), представился 27 июня 2013 г. На рис. 3 приведены карта радиолокационной отражаемости и вертикальный разрез, положение которого на карте отмечено черной линией. Из данных, приведенных на рисунке, следует, что восточнее г. Валдая образовалась мощная облачная система протяженностью примерно 100 км с участками, радиолокационная отражаемость которых превышала 60 дБZ. Вертикальный разрез показывает существование в ней двух конвективных ячеек большого размера на разных стадиях развития: левая уже диссипирует, правая находится в стадии зрелости. Обе ячейки опасны с точки зрения градообразования. В принципе, это все, что может сообщить о наблюдаемом объекте некогерентный радиолокатор.

Более детальную информацию о том, что происходит в наблюдаемом метеобъекте, дает представленная на рис. 4 карта дифференциальной отражаемости (отношения мощности сигнала, принятого по каналу горизонтальной линейной поляризации волны, к мощности сигнала в канале вертикальной поляризации). На карте хорошо просматриваются отмеченные голубым и синим цветом зоны отрицательных значений указанного параметра. Это случай деполяризационного ослабления, возникающего после прохождения электромагнитной волной участков с большими значениями радиолокационной и дифференциальной отражаемости. Такое возможно только при выпадении града в момент его таяния, когда частицы покрываются слоем воды и приобретают на время свойства капли (большую отражательную способность и эллиптическую форму).

В этом случае в излученной волне нарушается равенство мощности горизонтально и вертикально поляризованных составляющих (первая становится меньше второй). В результате расположенные за рассматриваемой зоной частицы, одинаково отражающие обе поляризационные составляющие, формируют сигнал с отрицательной дифференциальной отражаемостью, совершенно не характерной для метеорологических целей.

Таким образом, карта вертикального разреза, представленная на рис. 4, свидетельствует о том, что из левой ячейки идут осадки в виде града (это следует из существования зоны отрицательных значений параметра в нижней ее части на дальности более 20 км), а в правой ячейке сформировалась область тающего града на высоте до 7 км (дальность более 60 км). Это подтверждается картой коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих сигнала (рис. 5), на которой указанные области отмечаются пониженным значением параметра, что характерно для тающих ледяных частиц [10].

Размеры конвективного образования, величина радиолокационной отражаемости и формирование града дают основание предположить, что наблюдается суперячейка. Для подтверждения этого предположения необходимо убедиться в существовании в ней мощных восходящих и нисходящих потоков. Непосредственно измерить скорость или даже направление вертикального движения частиц на дальности исследуемой цели (100 км) практически невозможно из-за малых углов места антенны, под которыми наблюдается суперячейка. Тем не менее можно получить косвенное подтверждение ее существования путем анализа карты коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих. Оно основано на

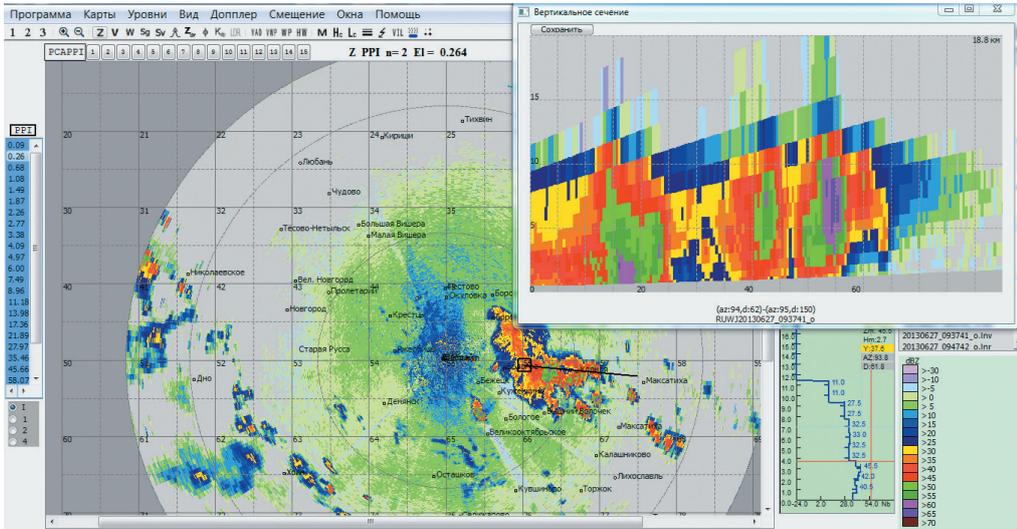


Рис. 3. Карта радиолокационной отражаемости (горизонтальный и вертикальный разрезы), полученная в 9 ч 37 мин 27 июня 2013 г.

Fig. 3. Radar reflectivity map (horizontal and vertical sections) obtained at 9:37 a.m., June 27, 2013.

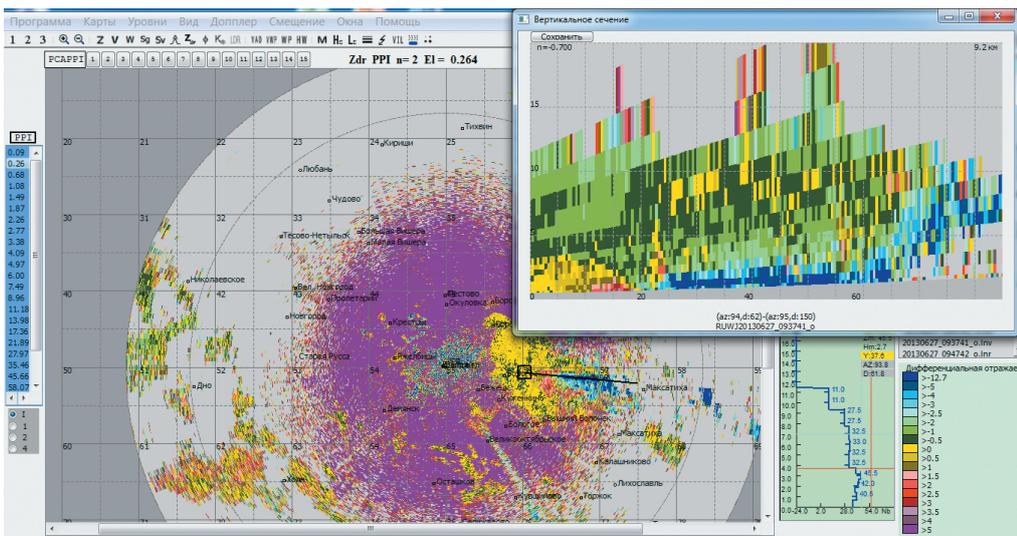


Рис. 4. Карта дифференциальной отражаемости (горизонтальный и вертикальный разрезы), полученная в 9 ч 37 мин 27 июня 2013 г.

Fig. 4. Map of differential reflectance (horizontal and vertical cuts), obtained at 9:37 a.m., June 27, 2013.

том, что в однородном облаке на указанной карте хорошо просматривается зона таяния частиц в виде горизонтальной полосы пониженных (менее 0,95) значений параметра [11]. Характерный для этого случая вертикальный разрез приведен на рис. 6.

Если же в облаке существует вертикальный поток, данная полоса либо прогибается вниз, если он нисходящий, либо вообще пропадает в зоне восходящего движения, внутри которой значение параметра определяется состоянием находящихся в ней частиц.

К сожалению, наблюдать указанные эффекты на картах, относящихся к рассматриваемому нами моменту времени (9 ч 37 мин), не представляется возможным из-за маскирования их явлением деполяризации ослабления. Поэтому переместимся по оси времени на один час назад, когда обнаруженный нами участок с противоположенным направлением ветра уже существовал, а размеров и количества градин было еще недостаточно для искажения значений дифференциальной отражаемости (рис. 7).

На вертикальном разрезе хорошо просматриваются зона нисходящего потока с центром на дальности 10 км, в которой зона таяния смещена вниз примерно на 1 км, и восходящий поток, заполненный тающим градом, в виде вертикального столба голубого цвета на дальности 15 км. Сказанное подтверждается картой радиальной скорости частиц (рис. 8). Из нее следует, что среднее по просматриваемому слою направление движения частиц — с юго-востока на северо-запад.

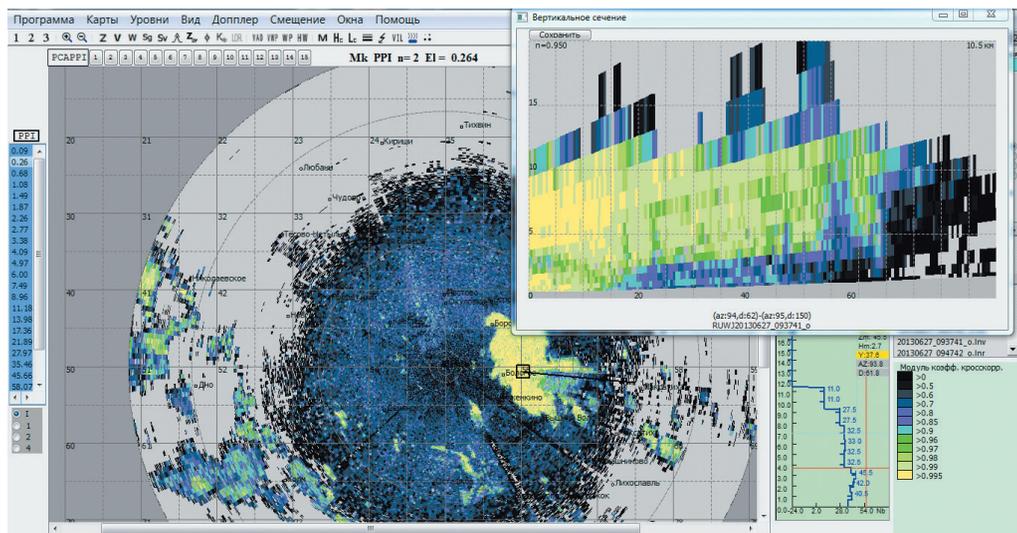


Рис. 5. Карта коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих сигнала (горизонтальный и вертикальный разрезы), полученная в 9 ч 37 мин 27 июня 2013 г.

Fig. 5. Map of the cross-correlation coefficient of polarization components of received signal (horizontal and vertical cuts), obtained at 9:37 a.m. June 27, 2013.

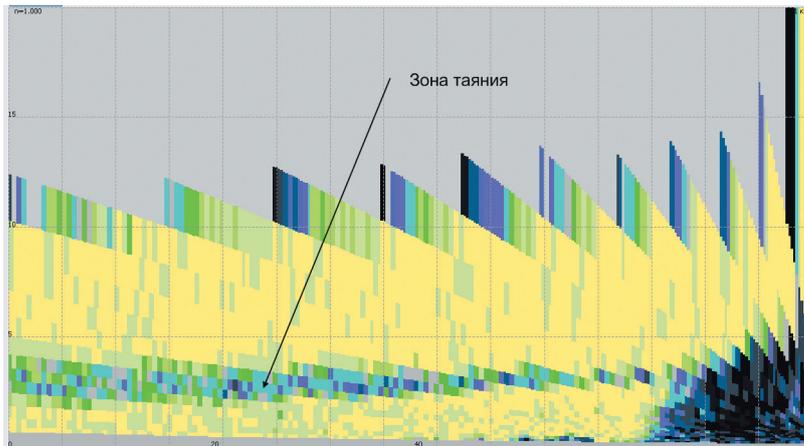


Рис. 6. Пример наблюдения зоны таяния частиц на карте коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих отражений.

Fig. 6. Example of observation of the melting zone of particles on the map of cross-correlation coefficient of polarization components of reflections.

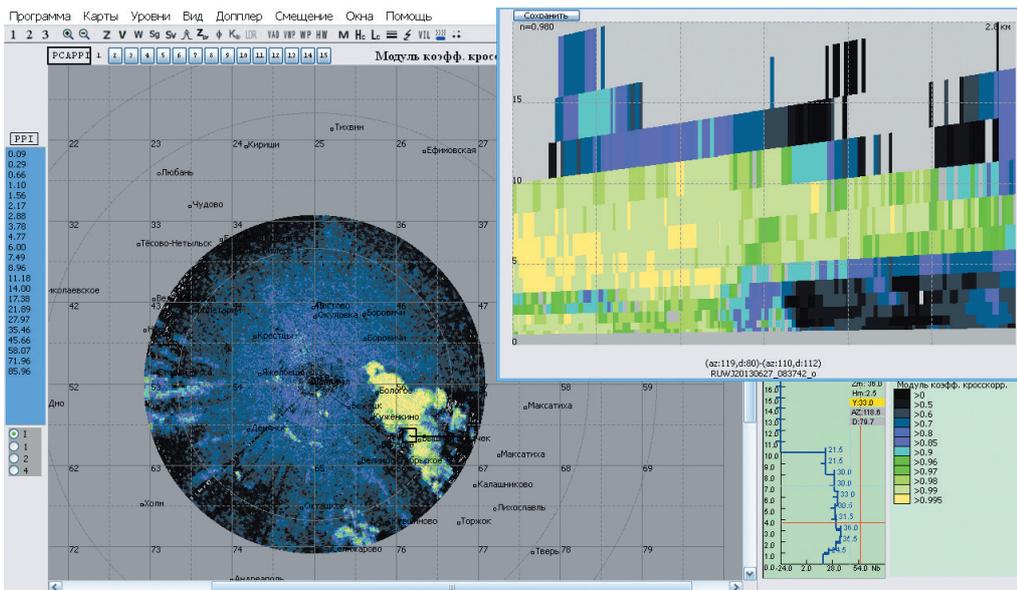


Рис. 7. Карта коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих сигнала (горизонтальный и вертикальный разрезы), полученная в 8 ч 37 мин 27 июня 2013 г.

Fig. 7. Map of the cross-correlation coefficient of polarization components of received signal (horizontal and vertical cuts), obtained at 8:37 a.m., June 27, 2013.

Однако внутри наблюдаемого нами облачного массива существует участок, где ветер направлен в противоположенную сторону (по нему проведен вертикальный разрез). Координаты его края, расположенного с наветренной стороны, совпадают с координатами предполагаемой суперячейки. Это говорит о том, что в ячейку интенсивно всасывается воздух, поступающий далее в восходящий поток, и скорость этого потока существенно больше той, что имеет место в обычных ячейках, в которых подобного участка не образуется.

Особенно интересен вертикальный разрез. На нем явно обозначен расположенный в приземном слое участок с частицами, движущимися в противоположенную направлению общего движения сторону. Заканчивается он именно в том месте, где мы перед этим идентифицировали восходящий поток. Кроме того, на высоте 5 км наблюдаются несколько элементов разрешения с изменяющейся в широких пределах (от  $-36,5$  до  $+10$  м/с) скоростью. Это указывает на существование здесь интенсивных вихрей. Скорее всего, это малая часть одного из потоков, указанных на рис. 1 и являющихся неотъемлемой частью суперячейки.

Рассматриваемый участок наблюдался на картах, относящихся к обзорам с 7 ч 17 мин до 11 ч 07 мин. Следовательно, время существования наблюдаемого явления можно считать равным примерно 4 ч.

По всем параметрам наблюдаемая нами цель — суперячейка. В непосредственной близости от нее искались признаки вихря — они были обнаружены в обзоре, проводившемся в 8 ч 57 мин (рис. 9), на котором наблюдается резкое изменение радиальной скорости частиц: от  $-30$  до  $+20$  м/с. Масштаб наблюдаемого явления позволяет уверенно констатировать обнаружение мезоциклона.

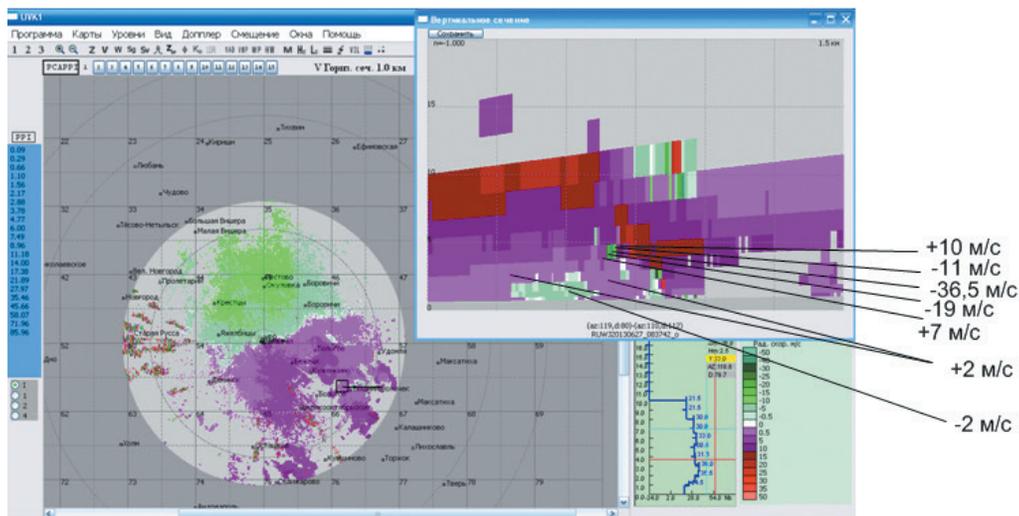


Рис. 8. Карта радиальной скорости частиц (горизонтальный и вертикальный разрезы), полученная в 8 ч 37 мин 27 июня 2013 г.

Fig. 8. A map of the radial velocities of particles (horizontal and vertical cuts) obtained at 8:37 a.m., June 27, 2013.

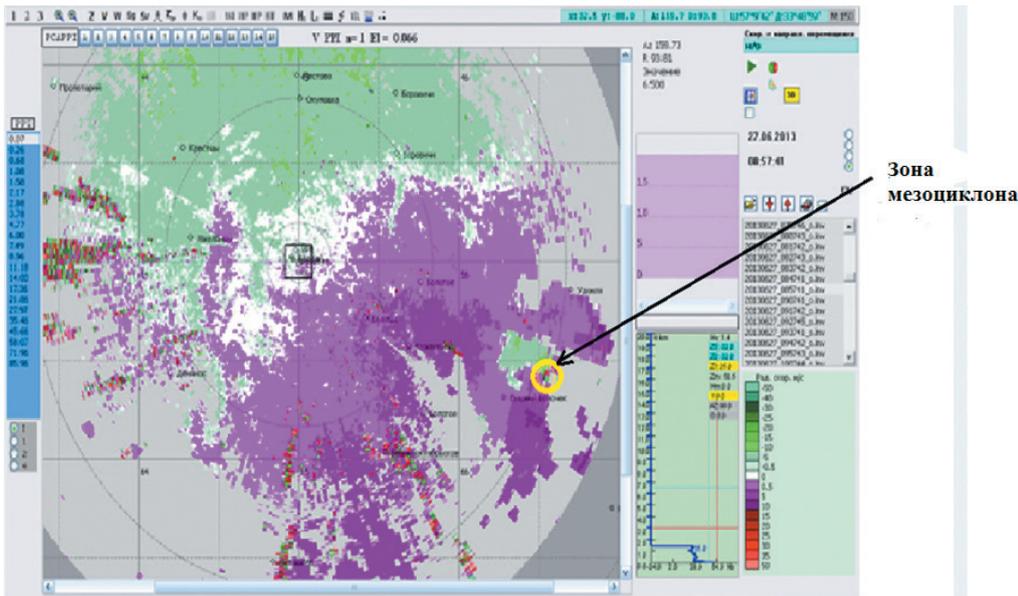


Рис. 9. Карта радиальной скорости частиц (горизонтальный разрез), полученная в 8 ч 57 мин 27 июня 2013 г.

Fig. 9. A map of the radial velocities of particles (horizontal cut) obtained at 8:57 a.m., June 27, 2013.

### Заключение

Впервые при помощи серийного доплеровского поляриметрического радиолокатора, произведенного в России, был обнаружен мезоциклон.

В настоящей работе на примере наблюдения за мощным облачным массивом показано, что применение всего арсенала возможностей современного метеорологического радиолокатора позволяет получать качественно новую по сравнению с предыдущим поколением данной техники информацию. Установлено, что оценки поляризационных параметров принимаемого сигнала позволяют однозначно распознавать наличие в облачной структуре града, определить его состояние (сухой или тающий) и положение вертикальных воздушных потоков. Все это значительно повышает вероятностные характеристики обнаружения опасных явлений погоды, и в частности суперячейки. Показано, как дальнейшее оценивание спектральных характеристик отражений в зоне суперячейки дает возможность обнаружить мезоциклон, что имеет большое значение для обеспечения безопасности населения.

### Список литературы

1. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Радиолокационные исследования поля ветра в атмосфере // Известия высших учебных заведений. Физика. 2016. Т. 59, № 12-2. С. 16—20.

2. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Шукин Г.Г. Распознавание сдвига ветра по данным метеорологического радиолокатора // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 109—118.
3. Жуков В.Ю., Шукин Г.Г. Состояние и перспективы сети доплеровских метеорологических радиолокаторов // Метеорология и гидрология. 2014. № 2. С. 92—100.
4. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Шукин Г.Г. Оптимизация условий наблюдения целей в современном метеорологическом радиолокаторе // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2019. № 1 (33). С. 27—35.
5. Bauer-Messmer B. Remote sensing of severe hailstorms / A dissertation submitted to the Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich, 1995. 130 p.
6. Интенсивные атмосферные вихри и их динамика / Под ред. И.И. Мохова, М.В. Курганского, О.Г. Чхетиани. М.: ГЕОС, 2018. 482 с.
7. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 512 с.
8. Готюр И.А., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В., Чернышев С.В., Шукин Г.Г. Доплеровский радиолокационный метод определения характеристик поля ветра и некоторые результаты // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 21. С. 66—75.
9. Doviak R.J., Melnikov V.M. Turbulence and Wind Shear in Layers of Large Doppler Spectrum Width in Stratiform Precipitation // J. Atm. Oceanic Techn. 2009. 26. P. 430—443.
10. Готюр И.А., Десяткин А.М., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В., Шукин Г.Г. Информационные возможности доплеровских метеорологических радиолокаторов с двойной поляризацией // Ученые записки РГГМУ. 2013. № 32. С. 66—82.
11. Kumjian M. et al. Weather applications of dual-polarization radars // J. Appl. Meteorol. and Climatol. 2008. No. 47. P. 1940—1961.

### References

1. Denisenkov D.A., Zhukov V.Y., Karavaev D.M., Shchukin G.G. Radar studies of wind field in the atmosphere. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Fizika. Russian Physics Journal*. 2016, 12-2 (59): 16—20. [In Russian].
2. Denisenkov D.A., Zhukov V.Y., Shchukin G.G. Wind shear detection from weather radar data. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2019, 44 (11): 782—789. doi: 10.3103/S1068373919110086.
3. Zhukov V.Y., Shchukin G.G. The state and prospects of the network of Doppler weather radars. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2014, 39 (2): 126—131. doi: 10.3103/S1068373914020095.
4. Denisenkov D.A., Zhukov V.Y., Shchukin G.G. Optimization of conditions for observation purposes in the advanced weather radar. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy*. Radio and telecommunications systems. 2019, 1 (33): 27—35. [In Russian].
5. Bauer-Messmer B. Remote sensing of severe hailstorms. Zurich. Swiss Federal Institute of Technology Zurich. 1995: 130.
6. Intense atmospheric vortices and it dynamics. Ed. by Mohov I.I., Kurganskiy M.V., Chetiani O.G. Moscow. GEOS. 2018: 482.
7. Doviak R.J., Zrnic D.S. Doppler radar and weather observations. London. Academic Press, Inc. 1992: 562.
8. Gotyur I.A., Zhukov V.Y., Kuleshov Y.V., Chernyshev S.V., Shchukin G.G. Doppler radar method of determining the characteristics of the wind field and some results. *Ushenye zapiski RSHU*. Proceedings of Russian State Hydrometeorology University. 2011, 21: 66—75. [In Russian].
9. Doviak R.J., Melnikov V.M., Turbulence and Wind Shear in Layers of Large Doppler Spectrum Width in Stratiform Precipitation. *Journal of atmospheric and oceanic technology*. 2009, 26: 430—443. doi: 10.1175/2008JTECHA1108.1.
10. Gotyur I.A., Deviatkin A.M., Zhukov V.Y., Kuleshov Y.V., Shchukin G.G. The information abilities of Doppler weather radars with dual polarization. *Ushenye zapiski RSHU*. Proceedings of Russian State Hydrometeorology University. 2013, 32: 66—82 [In Russian].
11. Ryzhkov A., Schuur T., Melnikov V., Zhang P., Zrnic D., Kumjian M. Weather applications of dual-polarization radars. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2008, 47: 1940—1961. doi: 10.1109/RADAR.2011.5960690.

*Статья поступила 05.02.2020  
Принята в печать 18.03.2020*

***Сведения об авторах***

*Денисенков Дмитрий Анатольевич*, канд. физ.-мат. наук, преподаватель кафедры технологий и средств геофизического обеспечения Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского Министерства обороны Российской Федерации, e-mail: dimasden@yandex.ru

*Жуков Владимир Юрьевич*, д-р физ.-мат. наук, старший преподаватель кафедры технологий и средств геофизического обеспечения Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского Министерства обороны Российской Федерации, e-mail: vuzhukov2002@list.ru

*Щукин Георгий Георгиевич*, д-р физ.-мат. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры технологий и средств геофизического обеспечения Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского Министерства обороны Российской Федерации, e-mail: ggshchukin@mail.ru

***Information about authors***

*Dmitriy Denisenkov*, PhD (Phys. and Math. Sci.), lecturer, Mozhaisky Military Space Academy

*Vladimir Zhukov*, Grand PhD (Phys. and Math. Sci.), senior lecturer, Mozhaisky Military Space Academy

*George Shchukin*, Grand PhD (Phys. and Math. Sci.), full Professor, professor, Mozhaisky Military Space Academy