

Исследование конвективных процессов с использованием расчетов потенциального вихря и спиральности

Ю.И. Юсупов

2024

Потенциальный вихрь

$$PV = \frac{\vec{\zeta} \cdot \nabla \theta}{\rho} = \frac{(\Omega + 2\omega) \cdot \nabla \theta}{\rho} = \frac{1}{\rho} \cdot \left[(\Omega_x + 0) \frac{\partial \theta}{\partial x} + (\Omega_y + 2\omega_y) \frac{\partial \theta}{\partial x} + (\Omega_z + 2\omega_z) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] \approx \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \left(-\frac{\partial u}{\partial z} + 2\omega \cos \varphi \right) \frac{\partial \theta}{\partial y} + \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) + 2\omega \sin \varphi \right] \frac{\partial \theta}{\partial z} \right\} \approx \frac{1}{\rho} \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) + 2\omega \sin \varphi \right] \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{1}{\rho} (\Omega_z + f) \frac{\partial \theta}{\partial z} = -g (\Omega_z + f) \frac{\partial \theta}{\partial p}$$

- В синоптическом масштабе используется только вертикальная составляющая потенциального вихря, поскольку горизонтальные составляющие на два порядка меньше вертикальной.
- Образование положительной аномалии потенциального вихря в средней и верхней тропосфере всегда сопровождается затокм холодного стратосферного воздуха и вызывает изменения в стратификации температуры таким образом, что уменьшается статическая устойчивость в приземном слое атмосферы, уменьшается энергия противодействия конвекции (CIN) и увеличивается доступная потенциальная энергия конвекции (CAPE).

Спиральность

Для оценки характеристик вращения воздуха в тропосфере вокруг горизонтальных осей (в вертикальных плоскостях), используется спиральность:

$$H = \vec{V} \cdot \text{rot} \vec{V}$$

$$H = u \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) + w \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right);$$

$$H = -|\vec{V}|^2 \frac{\partial \alpha}{\partial z}, \quad \alpha = \alpha(z), \tan \alpha = \frac{v}{u}, |\vec{V}|^2 = u^2 + v^2.$$

Спиральность полностью определяется кинетической энергией движения и изменениями угла вектора ветра с высотой.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial z} < 0, H > 0, \quad \frac{\partial \alpha}{\partial z} > 0, H < 0.$$

$$H = - \left(u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) = -\vec{V} \cdot \nabla \theta.$$

Спиральность в потоке синоптического масштаба зависит от адвекции температуры. Если происходит адвекция теплого воздуха, спиральность будет положительной, при адвекции холодного воздуха – отрицательной.

Курганский М. В. , 1993

Zhemin T, Rongsheng W., 1994

Спиральность

В метеослужбах США, Канады и др. для оценки и прогноза интенсивности конвективных штормов используется функция SREH (относительная спиральность шторма), которая позволяет количественно оценить вращение в поднимающемся воздушном потоке в конвективной ячейке. Если такое вращение обнаруживается, то велика вероятность, что конвективная ячейка превратится в суперячейку со всеми ее опасными явлениями (ливни, грозы, град, шквал, смерч).

$$SREH = \int_0^h [(\vec{v} - \vec{c}) \cdot \omega_h] dz,$$

где $\vec{v}$ – вектор ветра, $\vec{c}$ – вектор передвижения шторма, ω_h - горизонтальная составляющая вихря скорости ветра, h – высота над уровнем поверхности земли (обычно 2 или 3 км).

$SREH > 150 \text{ м}^2/\text{с}^2$ - возникновение сильных и разрушительных конвективных явлений.

$SREH > 300 \text{ м}^2/\text{с}^2$ - вероятность возникновения смерчей.

Конвективный шторм 20 июня 2024 г.

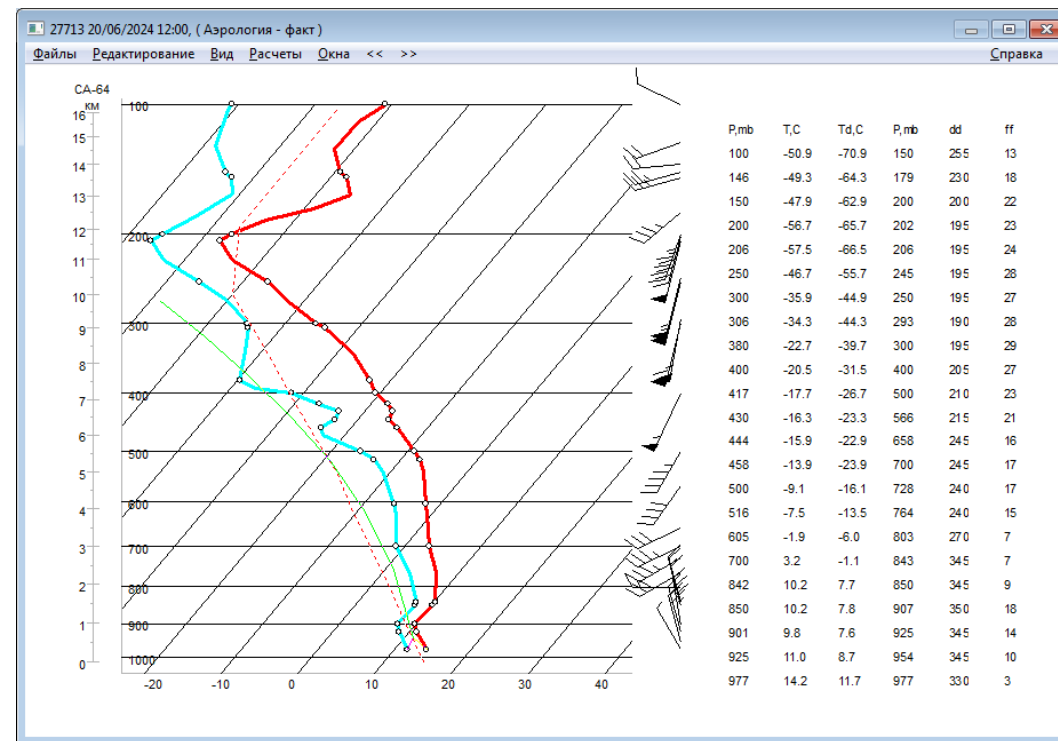
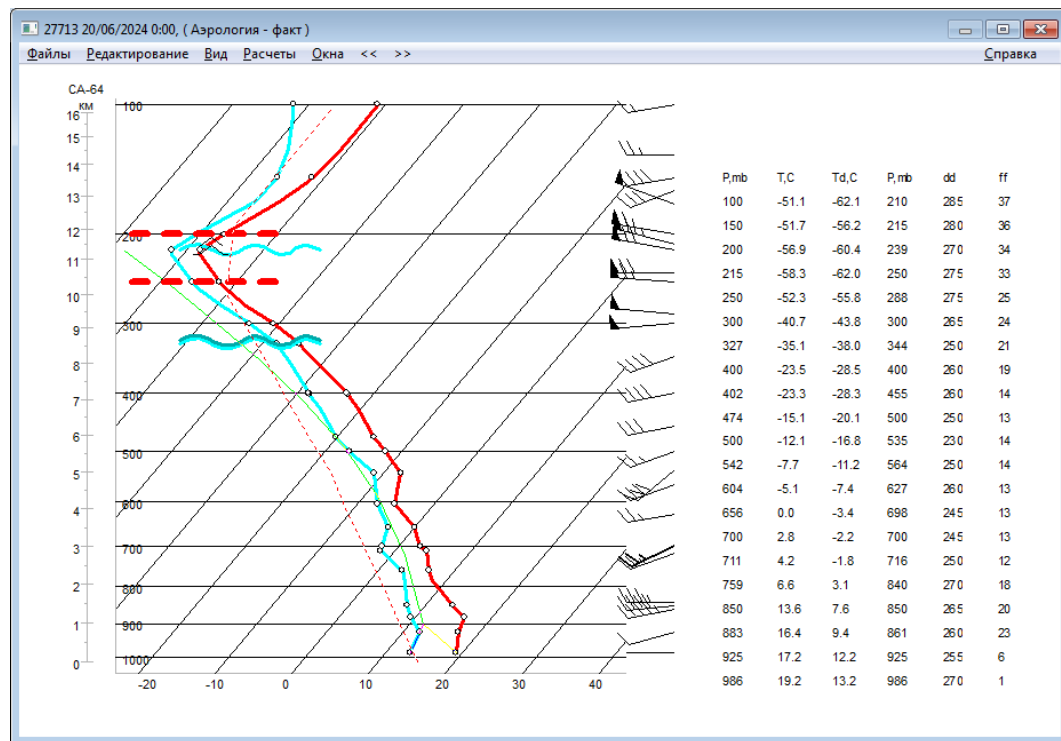
20 июня 2024 г. в Москве и области было зафиксировано особо опасное метеорологическое явление - конвективный шторм с сильными осадками, разрушительными шквалами и смерчами, приведшее к гибели 2 человек и многочисленным разрушениям как в столице, так и в её окрестностях. За сутки выпало около 40 мм осадков, порывы ветра достигали 25 м/с. Температура в Москве по данным метеорологической станции 27612 упала на 11,5°C за 3 часа (с 24,9°C в 10:00 ВСВ до 13,4 в 13:00 ВСВ), давление на уровне станции за 12 часов упало на 12,9 гПа.

Глубокая влажная конвекция была реализована благодаря сильному вынуждению из-за быстро перемещающегося фронта (скорость 50 – 60 км/ч). В среднем сдвиг ветра в слое 0 – 6 км составил около 25 м/с.

Используемые данные:

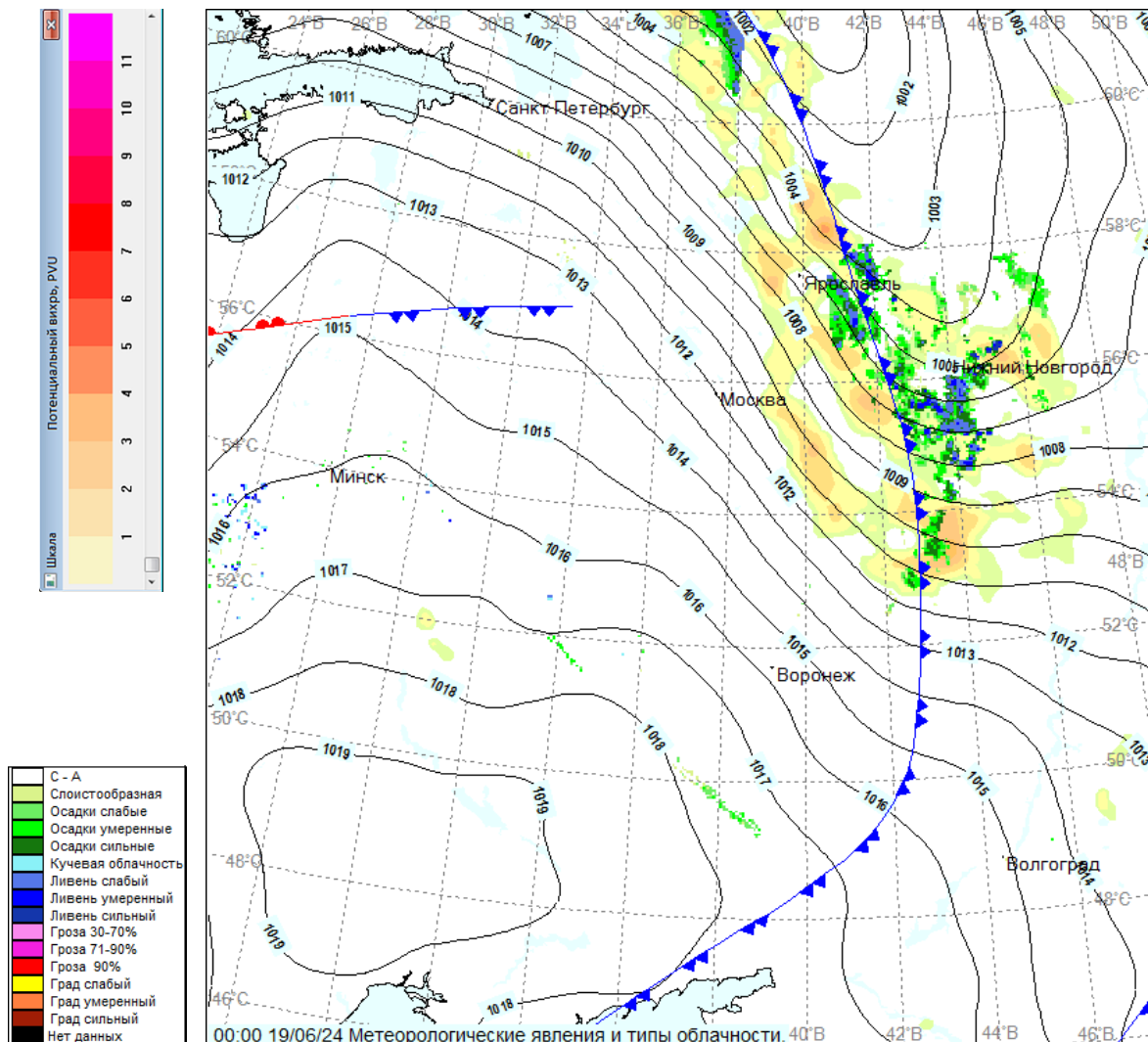
- GFS (Вашингтон) с пространственным разрешением 0.5°.
- WRF-ARW 6x6 км, с усвоением информации МРЛ, грозопеленгации, метеостанций сети Росгидромета.

Конвективный шторм 20 июня 2024 г.

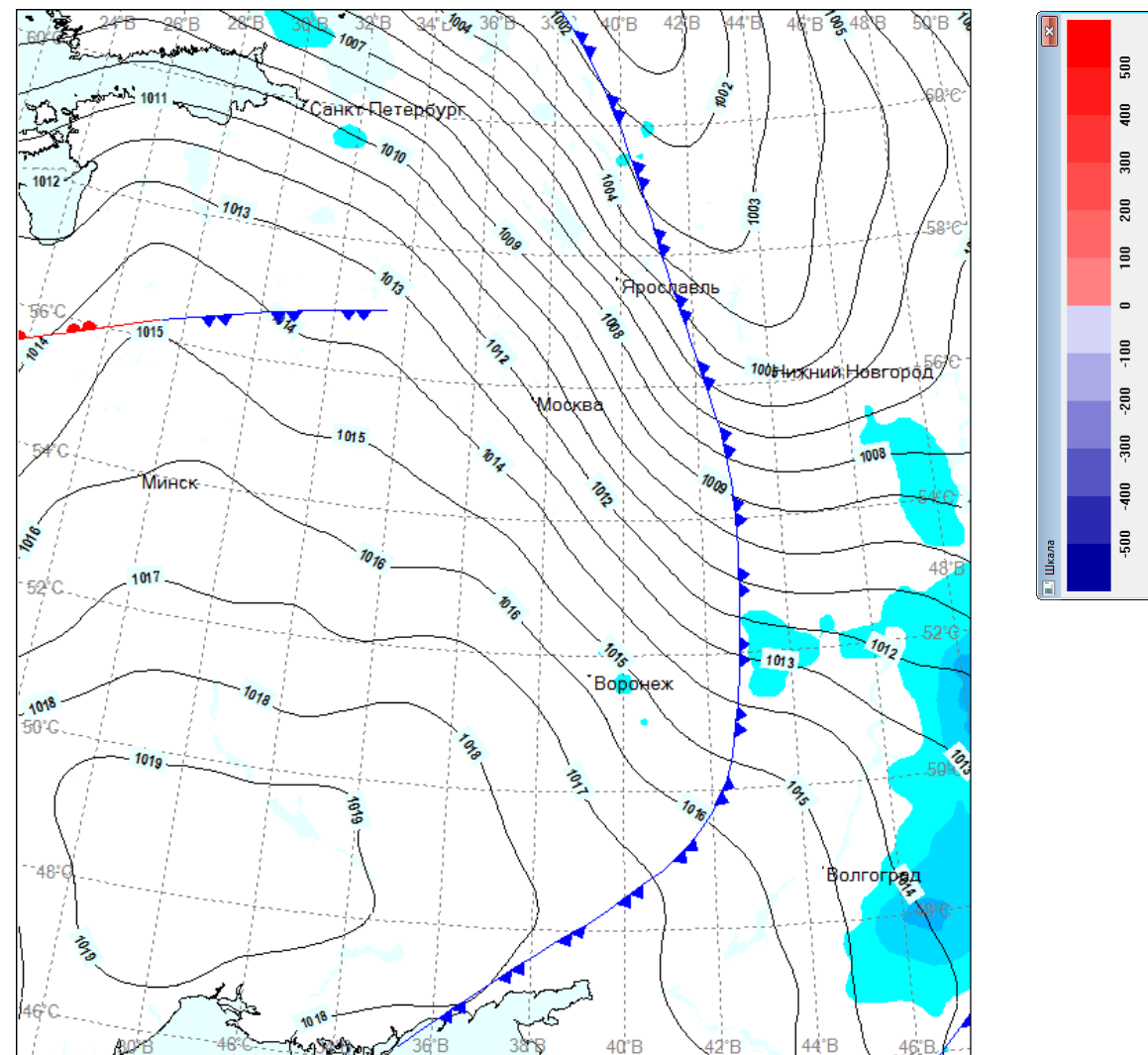


Данные радиозондирования по данным станции 27713 (Долгопрудный) за 20.06.2024 0 ч и 12:00 ч ВСВ

19.06.2024 г. 00 ч. ВСВ

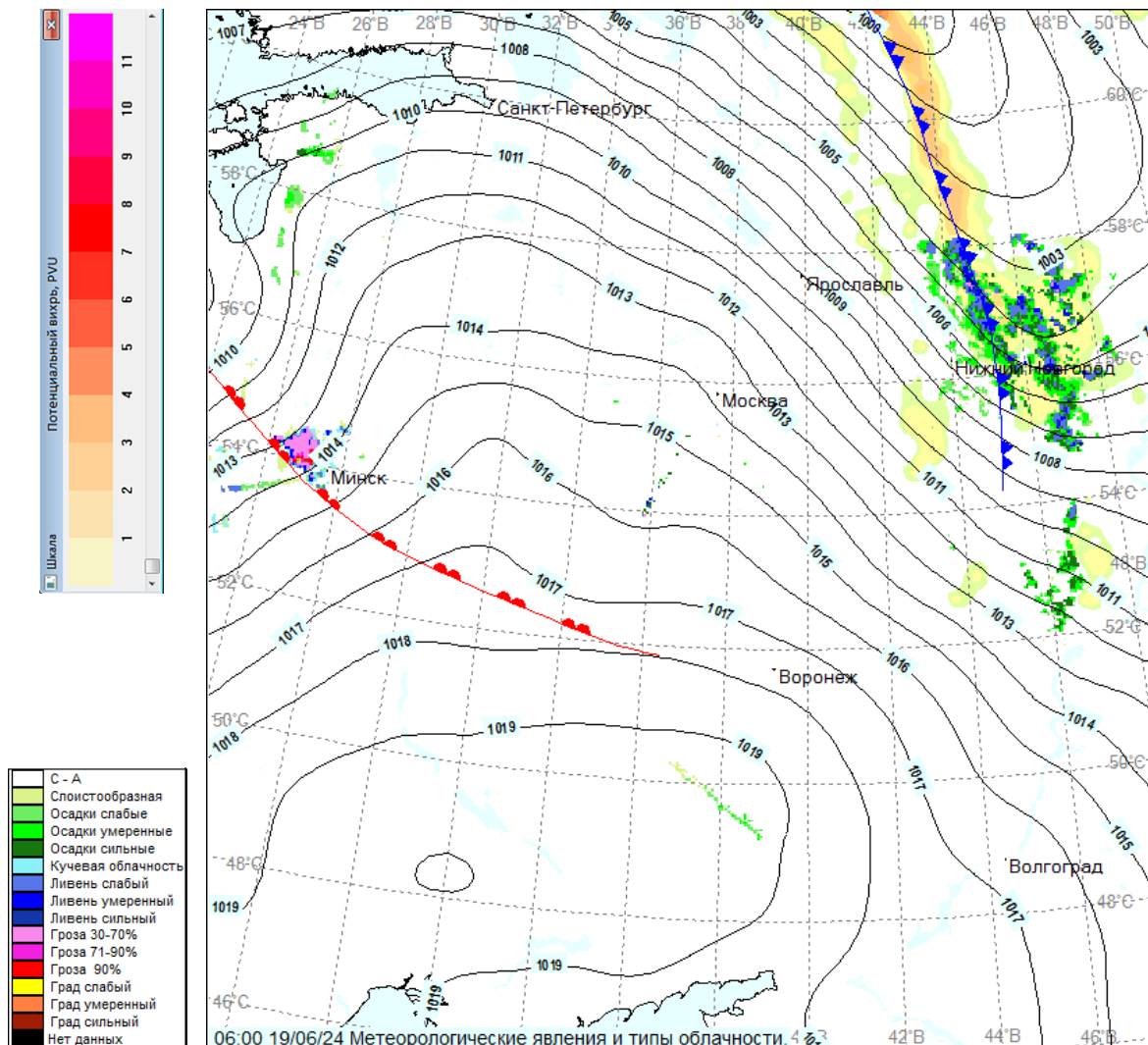


Потенциальный вихрь 700 гПа, $10^{-6} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ Ккг}^{-1}$

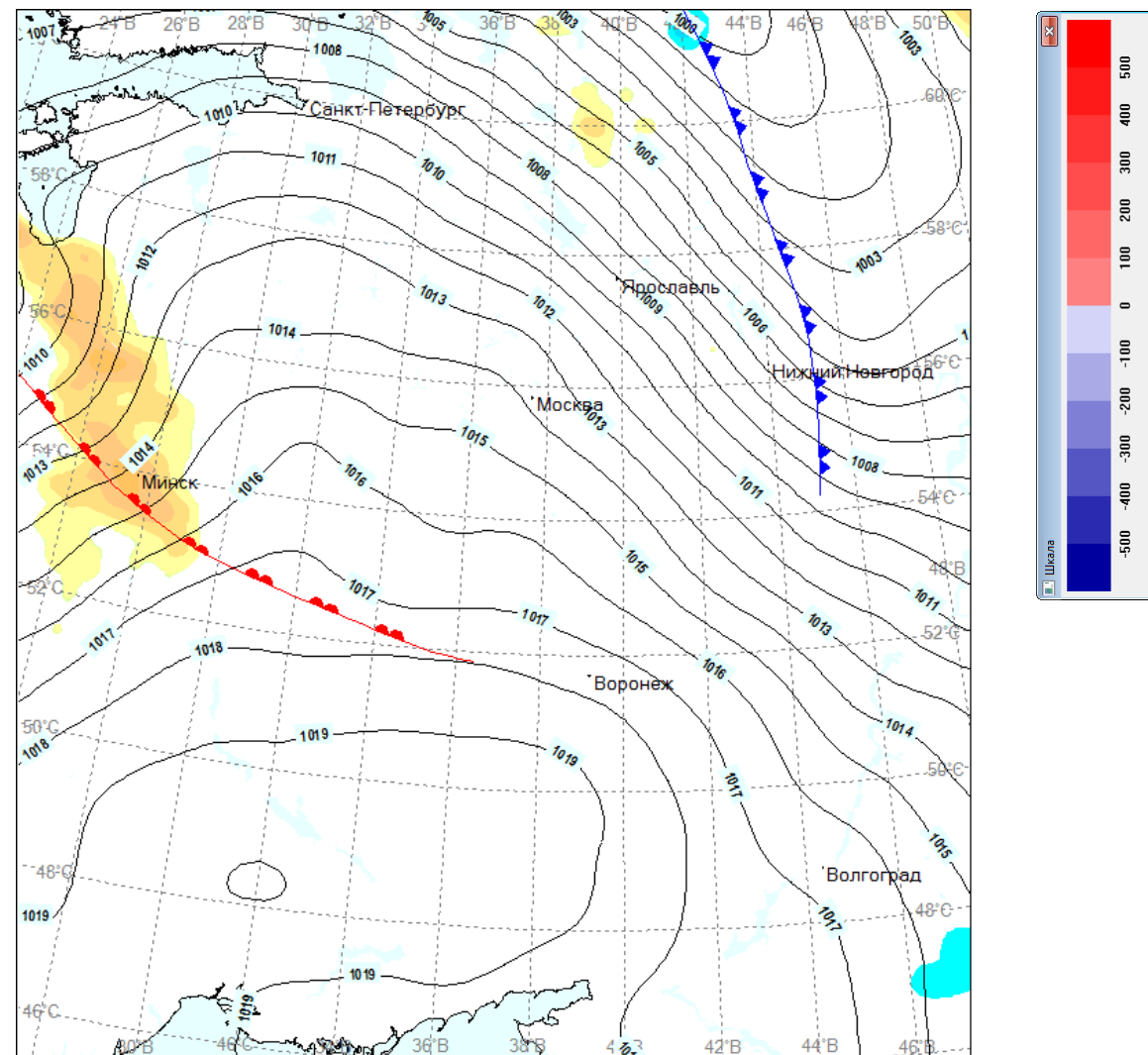


Спиральность 0-3 км, $\text{м}^2/\text{с}^2$

19.06.2024 г. 06 ч. ВСВ

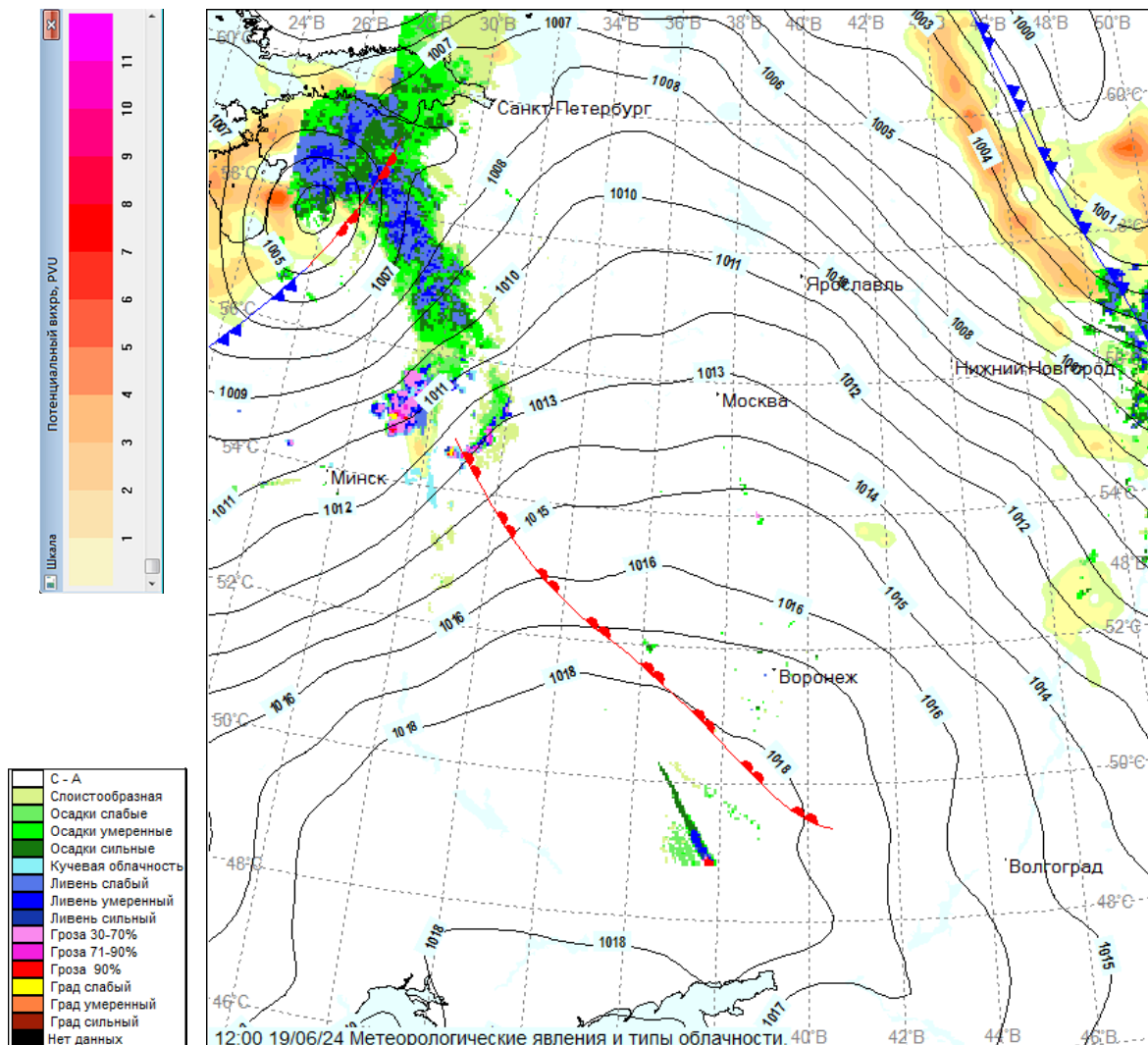


Потенциальный вихрь 700 гПа, $10^{-6} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ К кг}^{-1}$

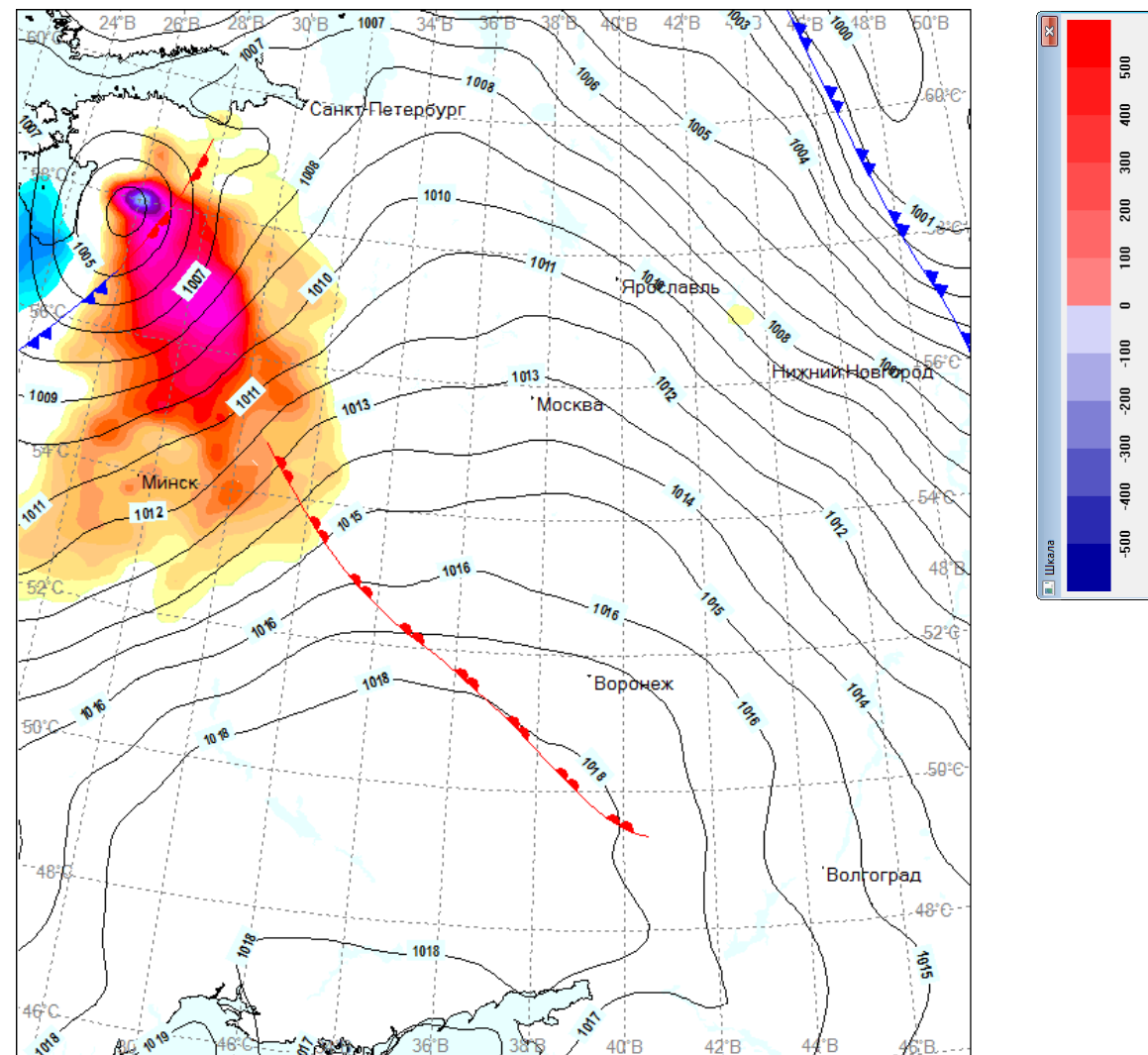


Спиральность 0-3 км, $\text{м}^2/\text{с}^2$

19.06.2024 г. 12ч. ВСВ

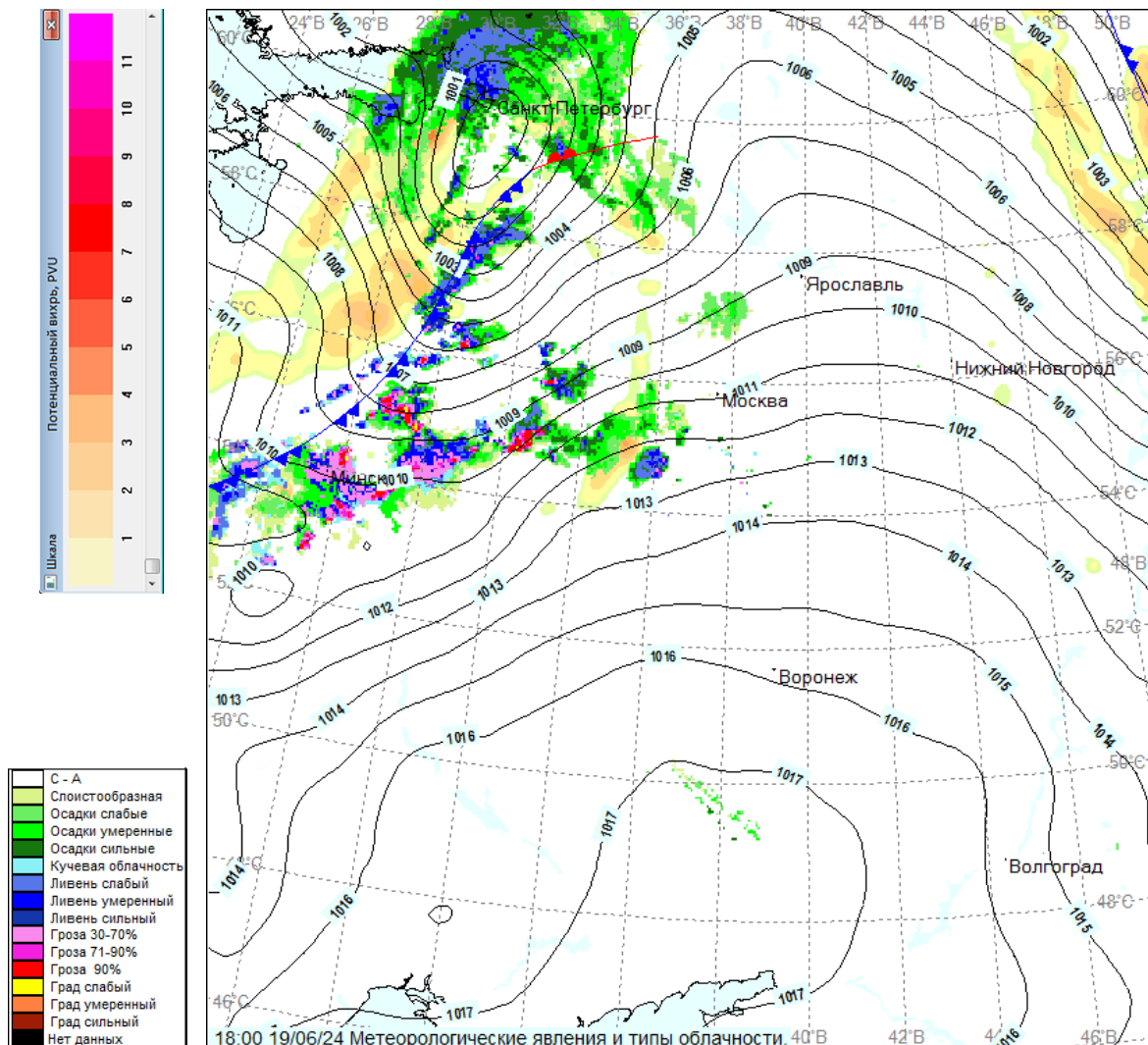


Потенциальный вихрь 700 гПа, $10^{-6} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ Ккг}^{-1}$

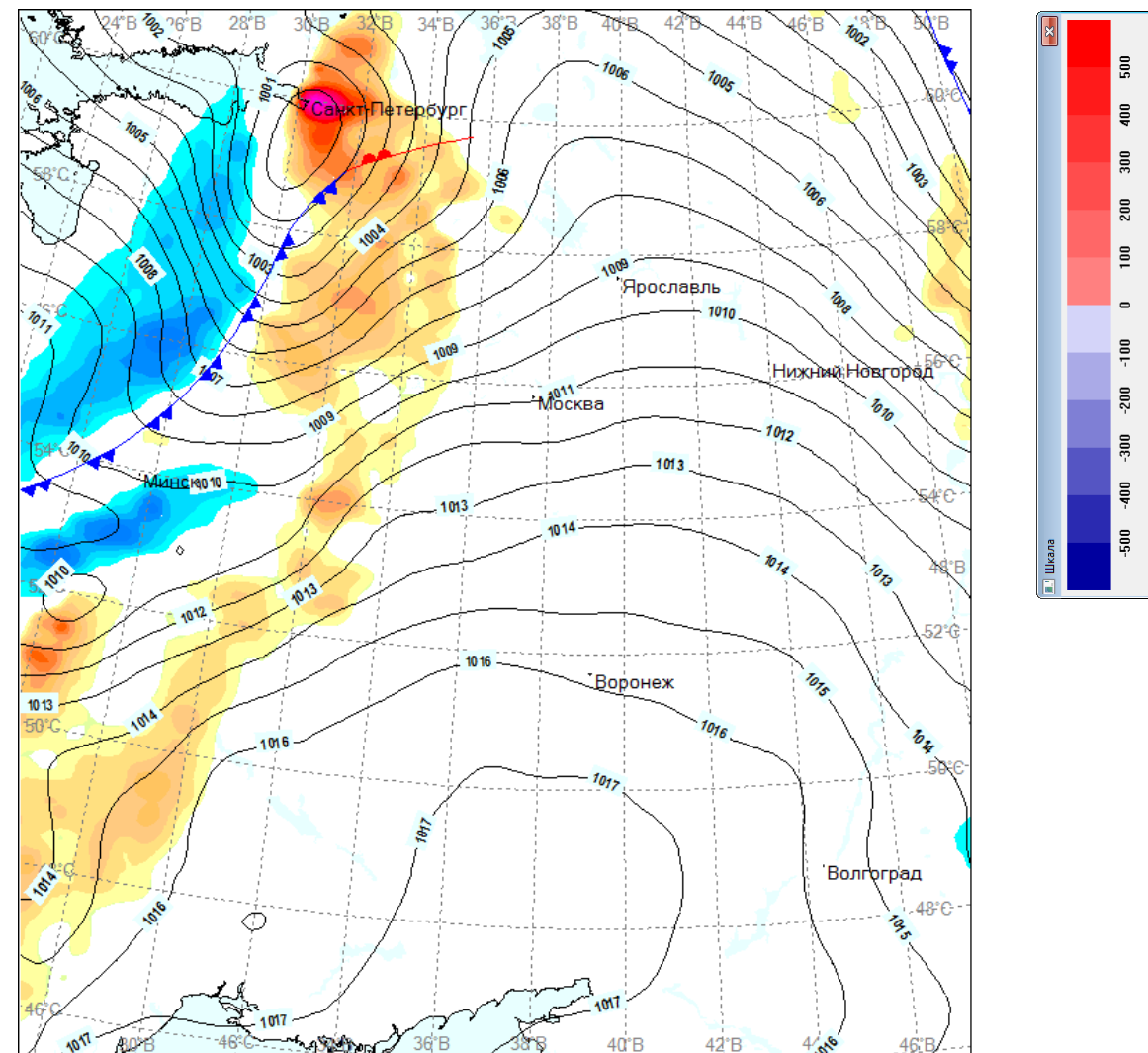


Спиральность 0-3 км, $\text{м}^2/\text{с}^2$

19.06.2024 г. 18ч. ВСВ

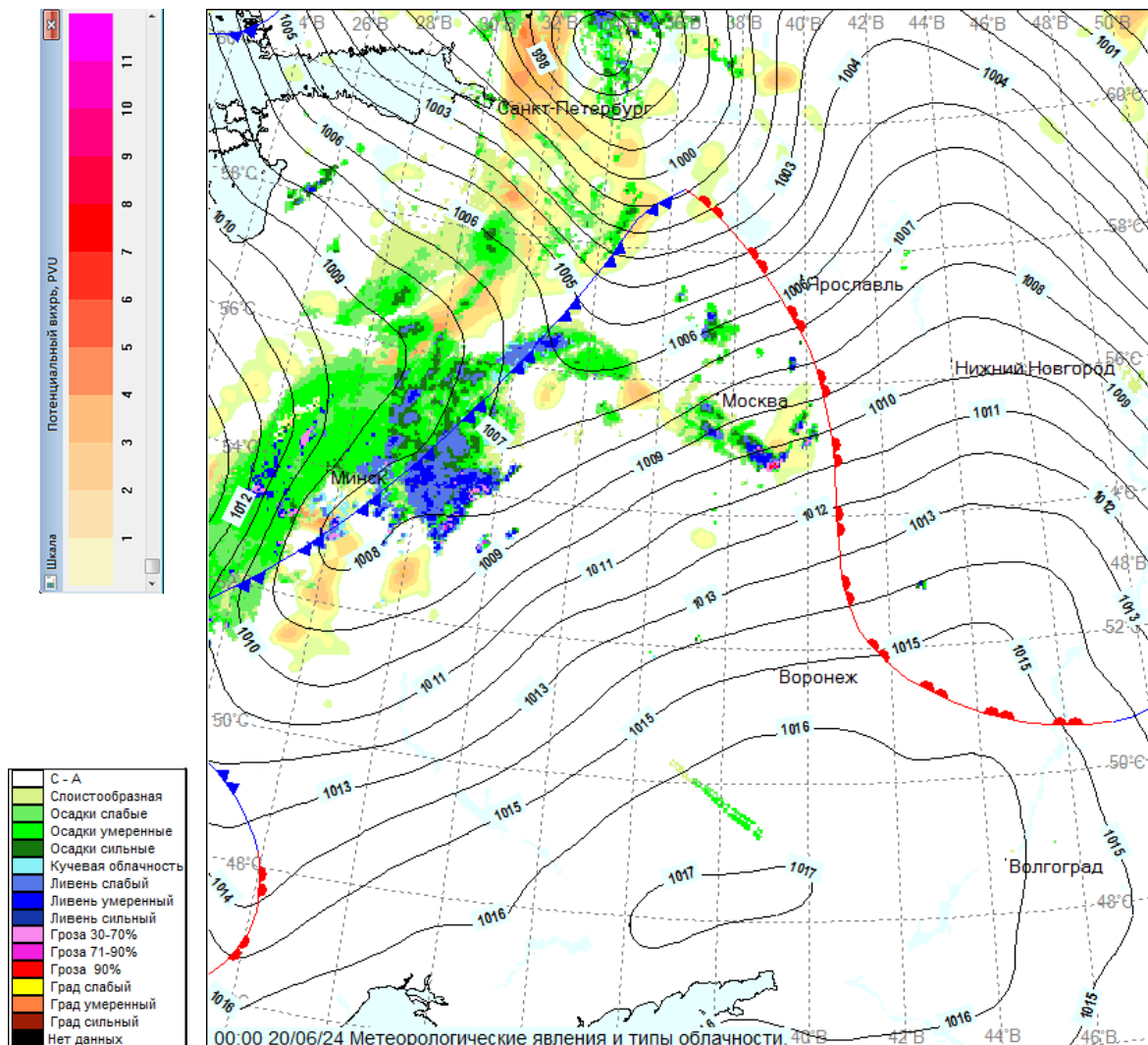


Потенциальный вихрь 700 гПа, $10^{-6} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ Ккг}^{-1}$

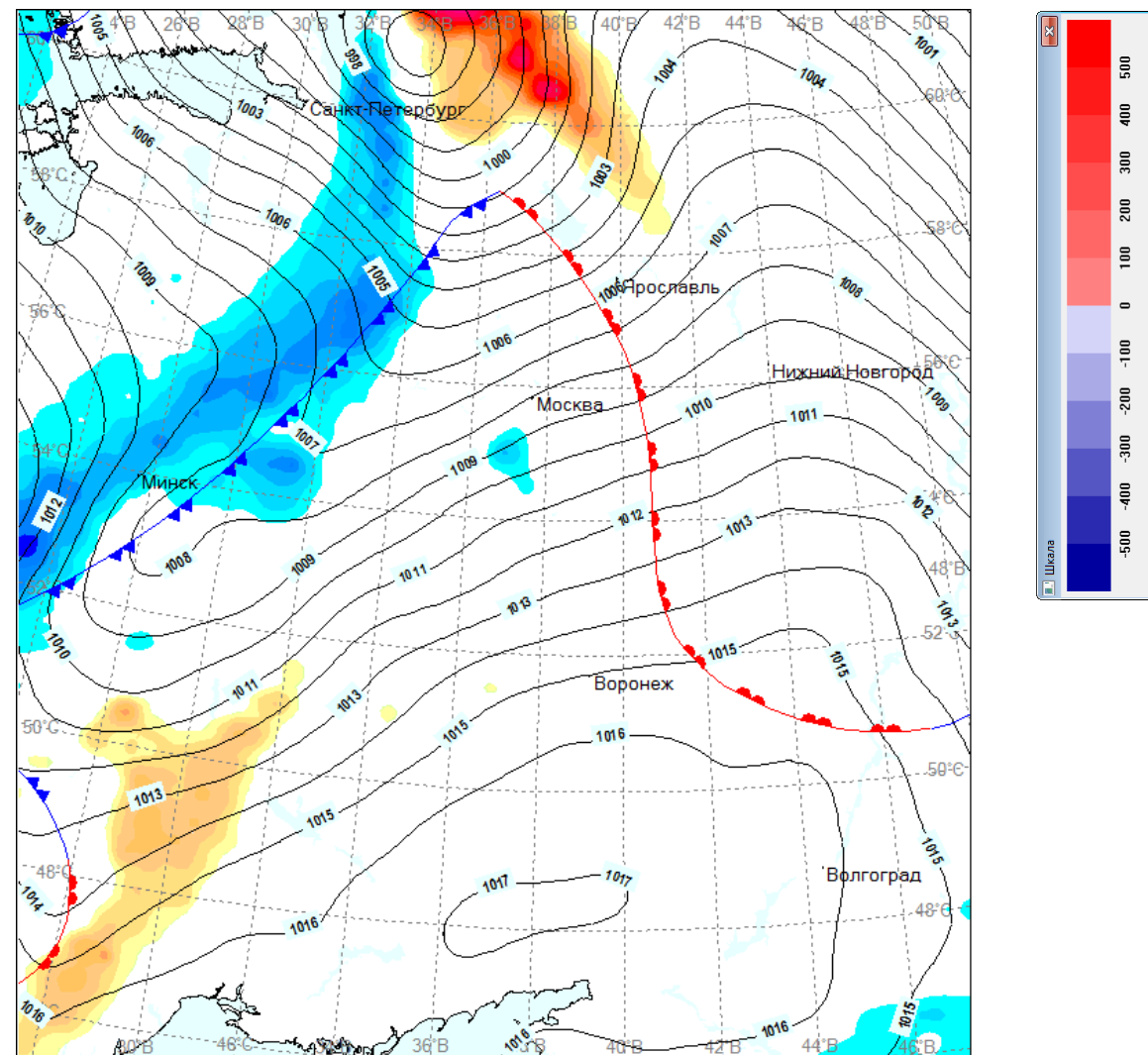


Спиральность 0-3 км, $\text{м}^2/\text{с}^2$

20.06.2024 г. 00ч. ВСВ

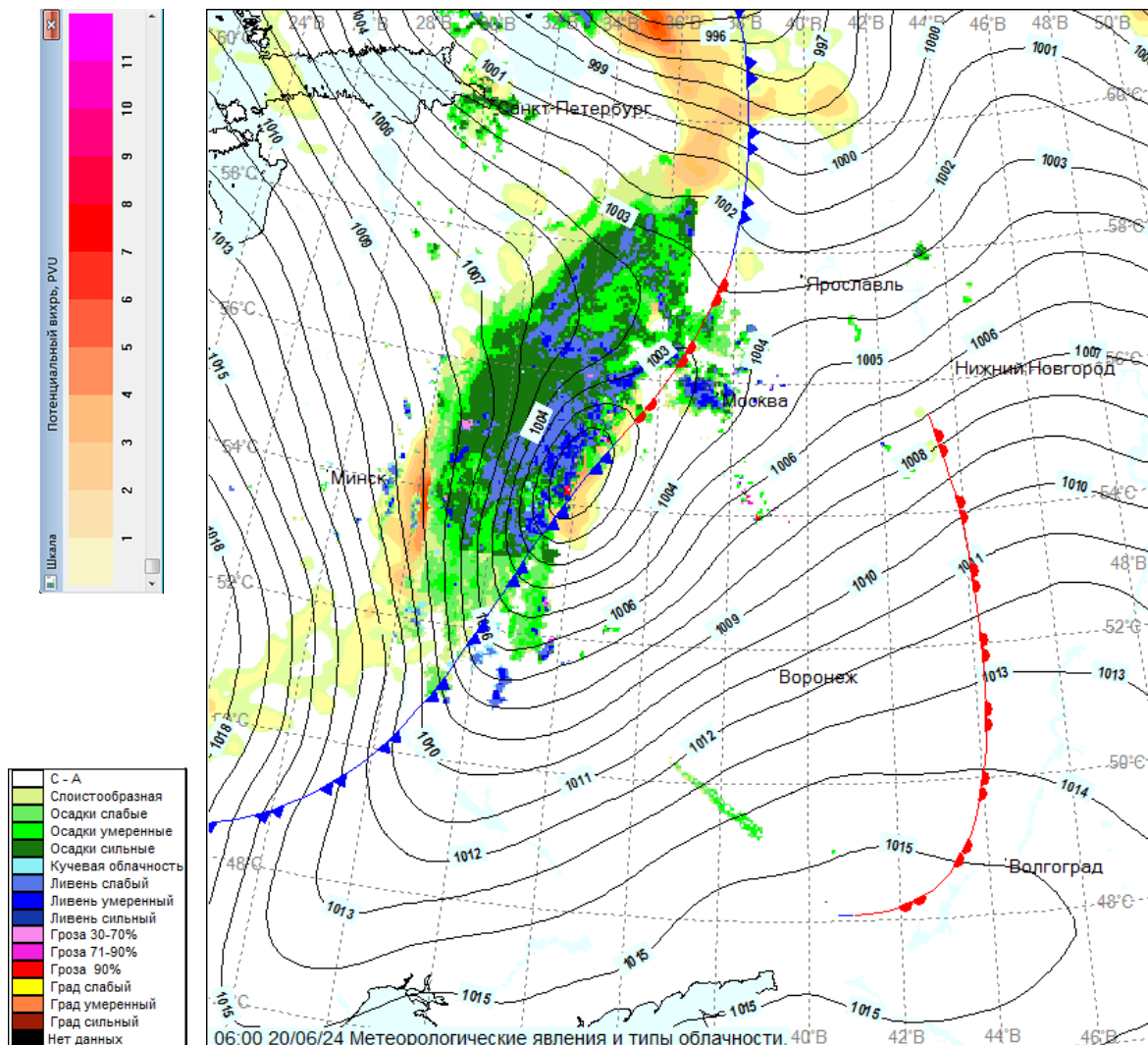


Потенциальный вихрь 700 гПа, $10^{-6} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ Ккг}^{-1}$

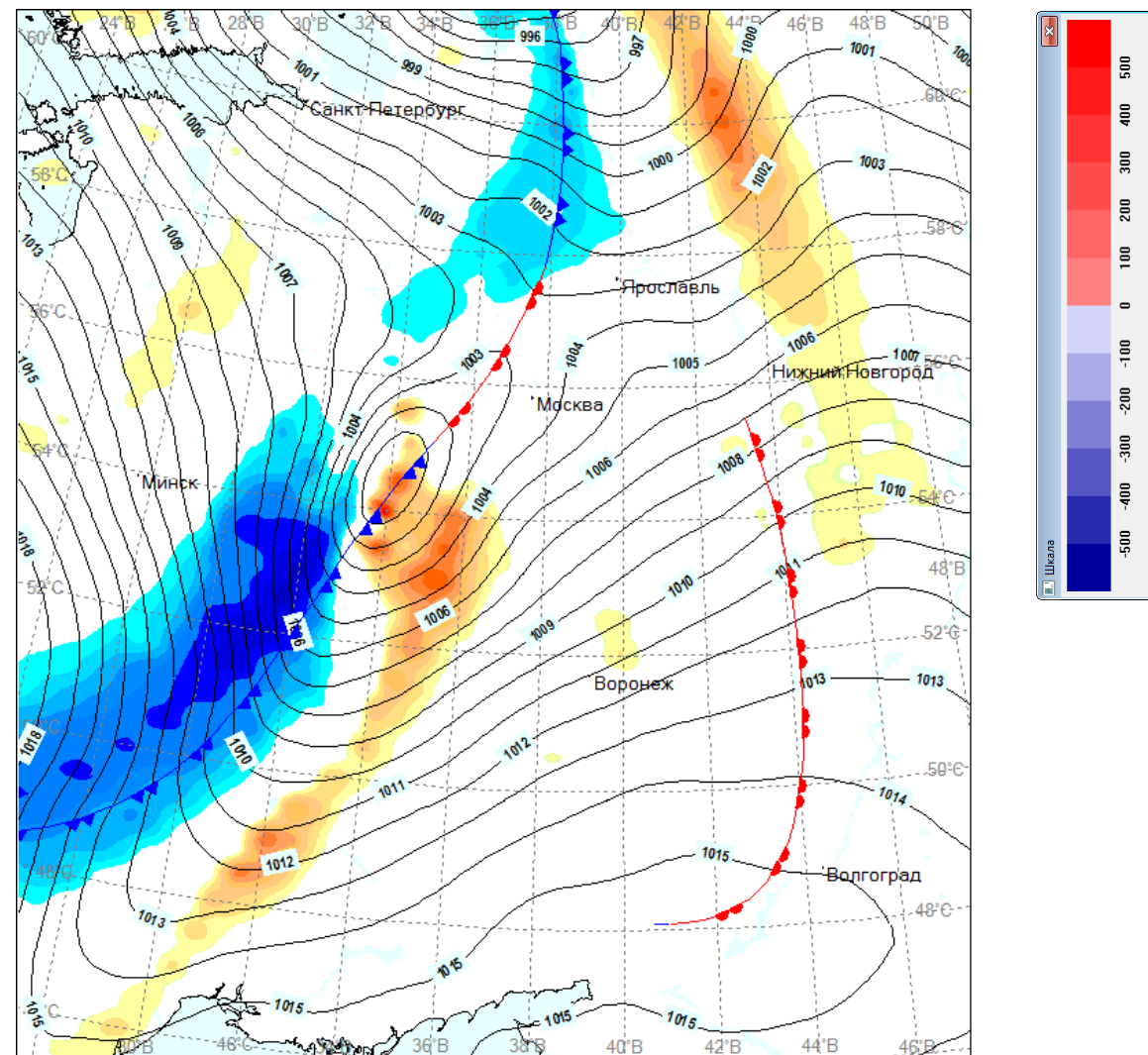


Спиральность 0-3 км, $\text{м}^2/\text{с}^2$

20.06.2024 г. 06ч. ВСВ

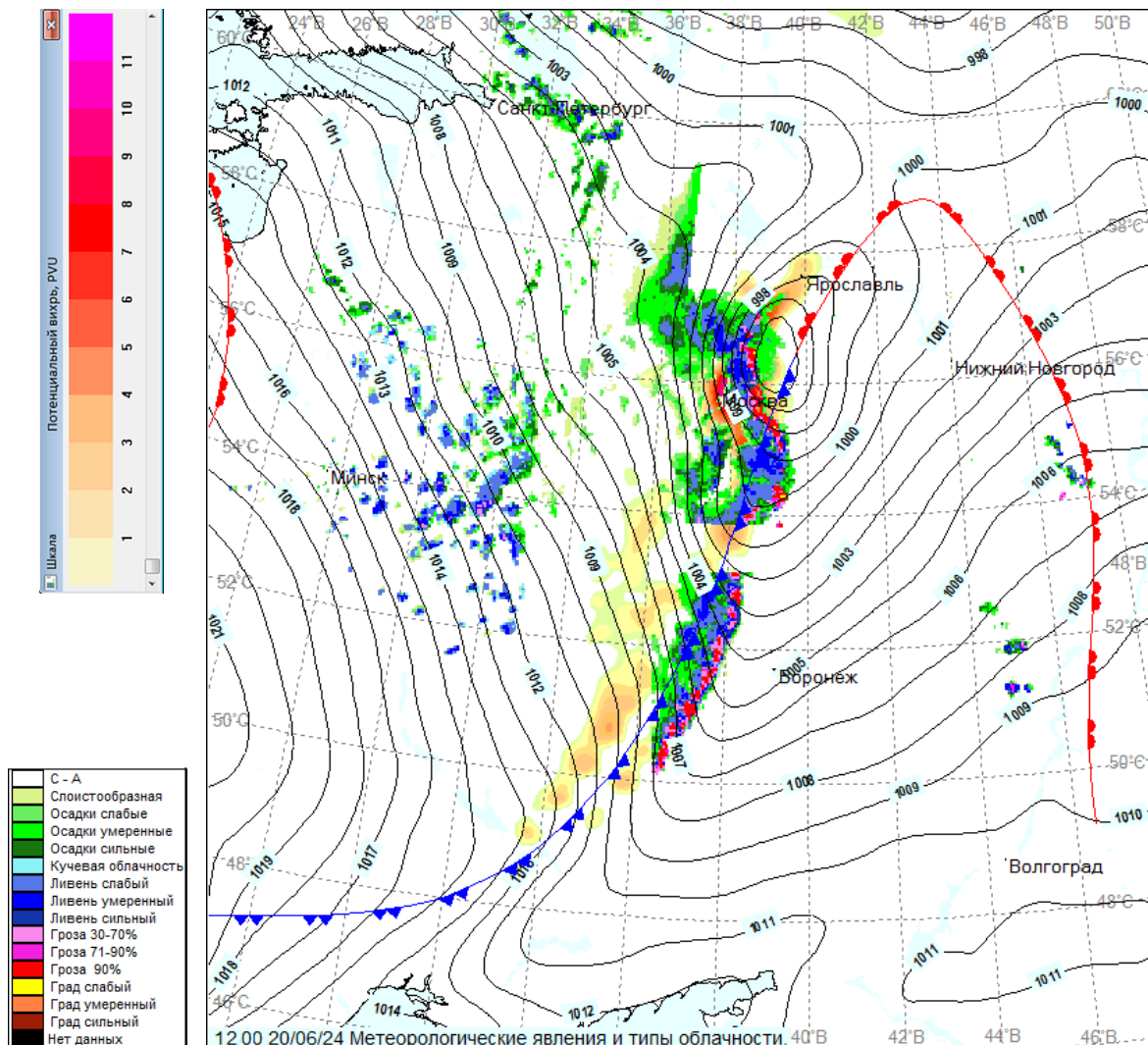


Потенциальный вихрь 700 гПа, $10^{-6} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ Ккг}^{-1}$

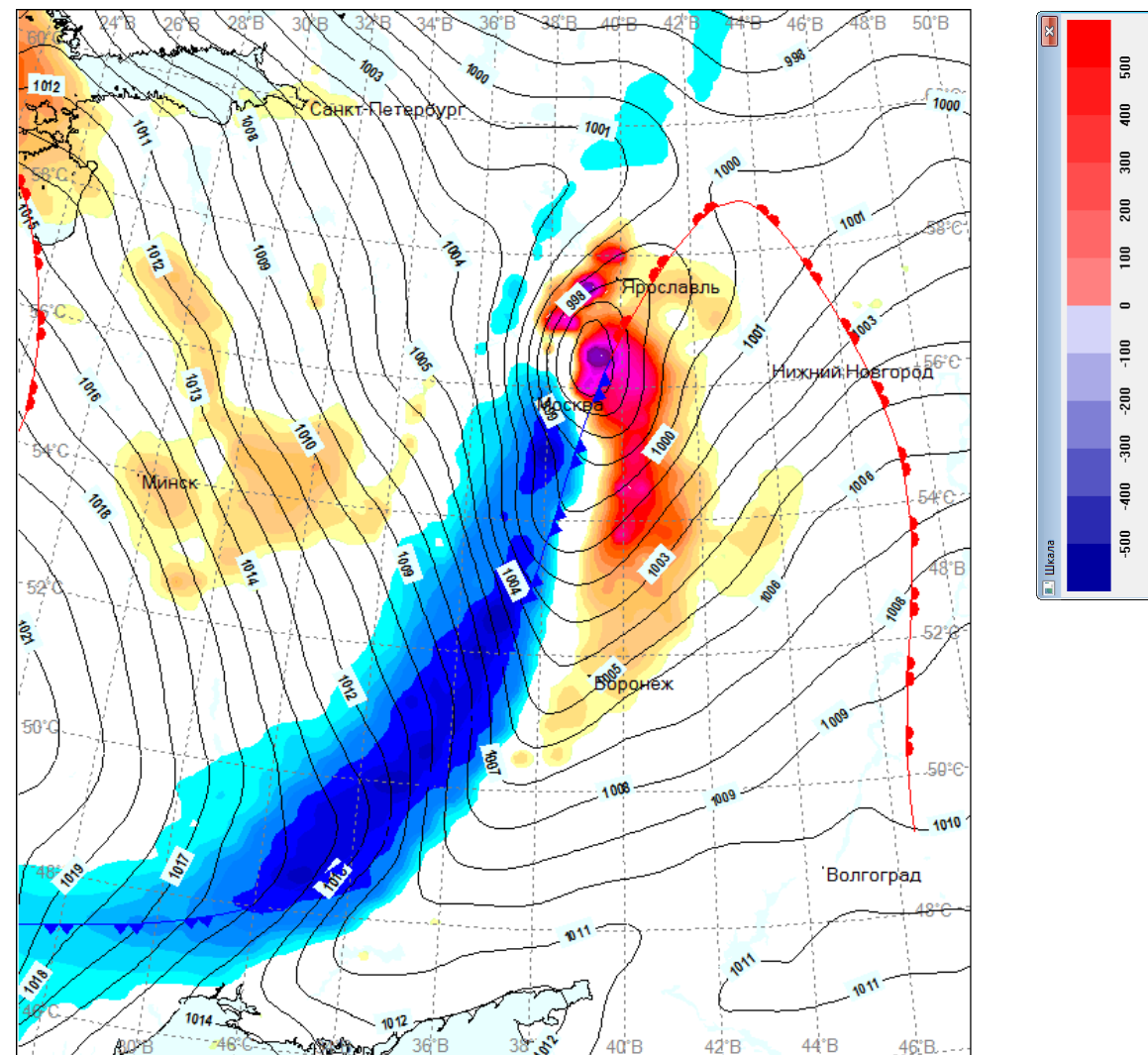


Спиральность 0-3 км, $\text{м}^2/\text{с}^2$

20.06.2024 г. 12ч. ВСВ

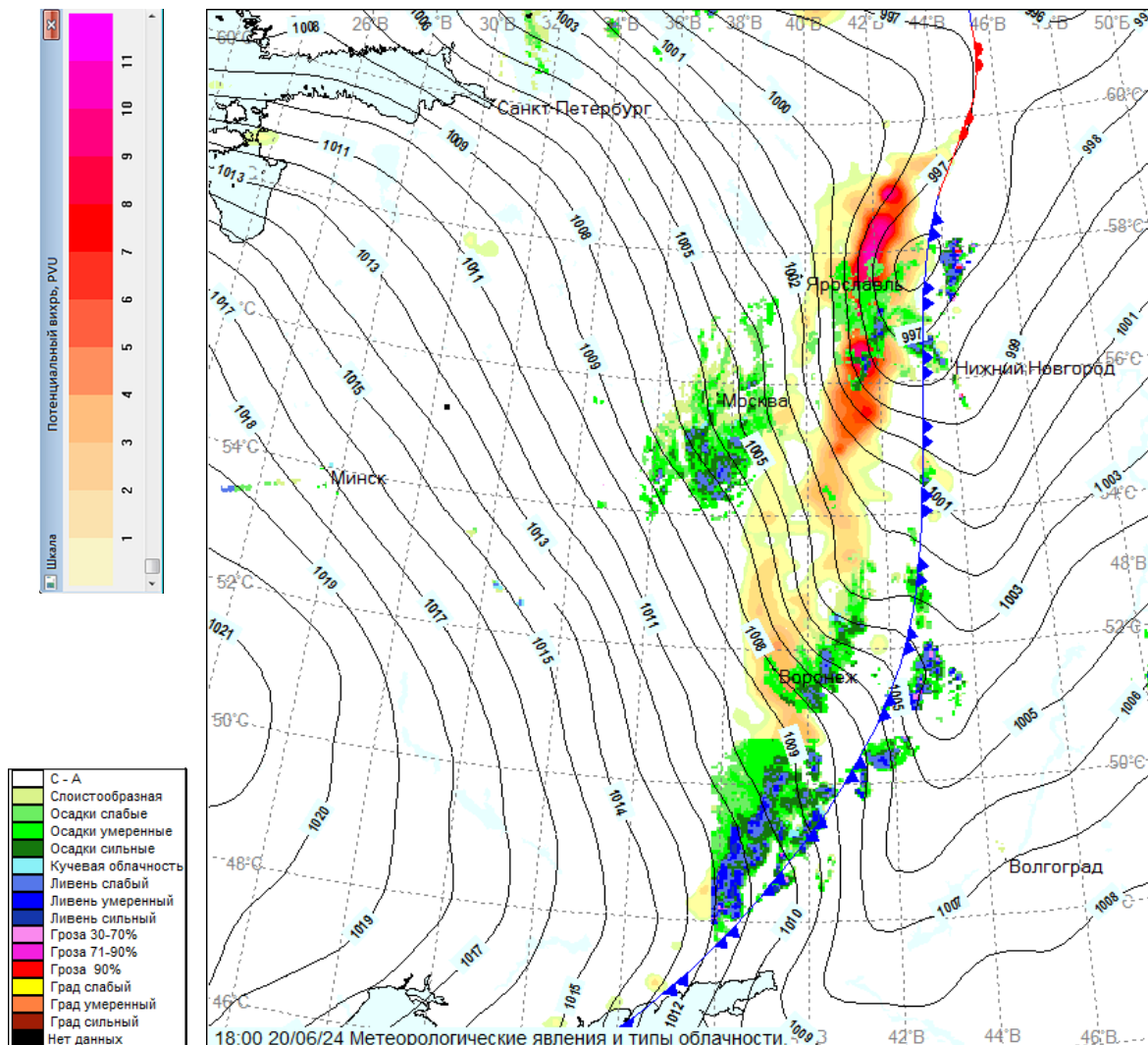


Потенциальный вихрь 700 гПа, $10^{-6} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ Ккг}^{-1}$

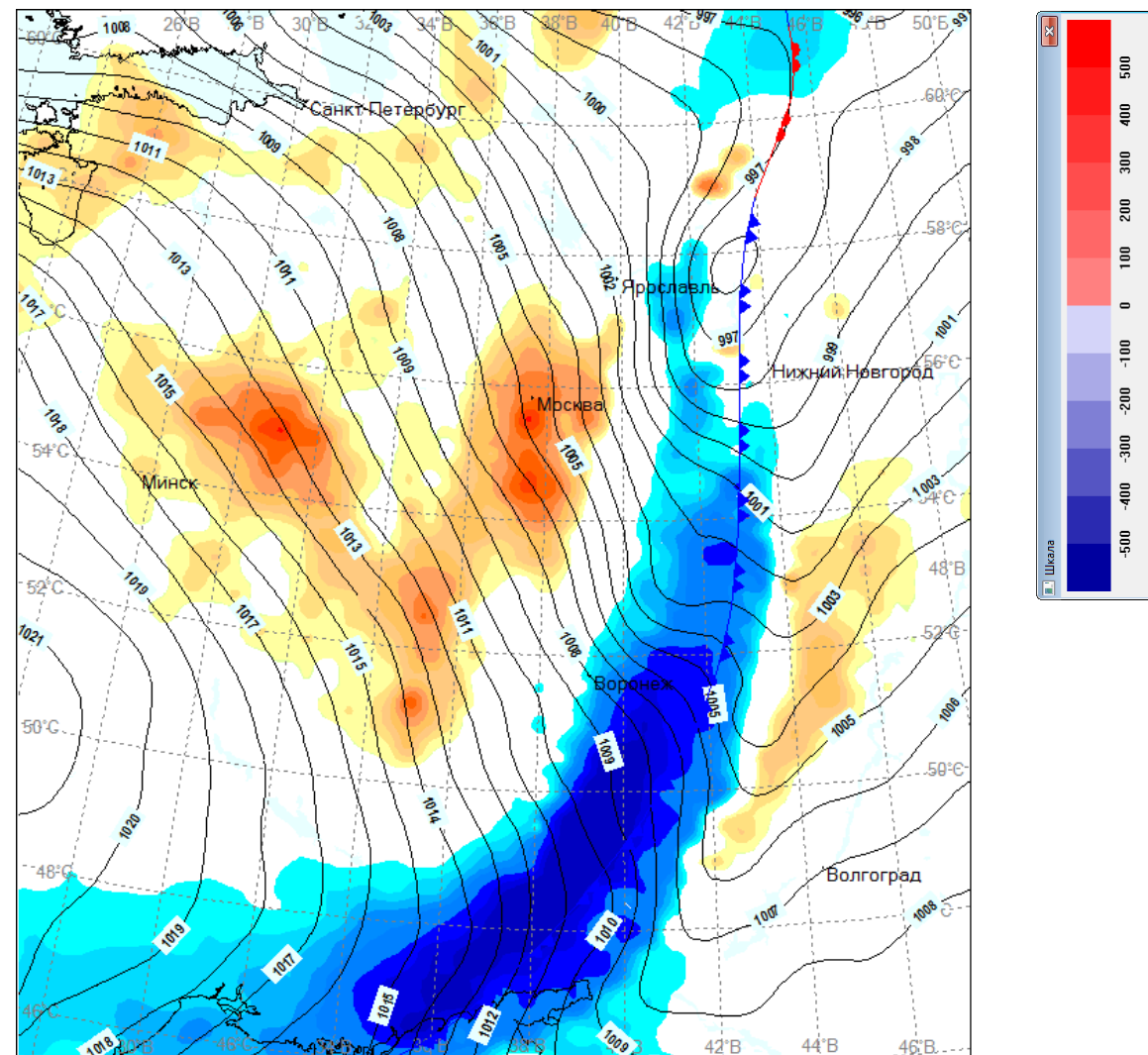


Спиральность 0-3 км, $\text{м}^2/\text{с}^2$

20.06.2024 г. 18ч. ВСВ

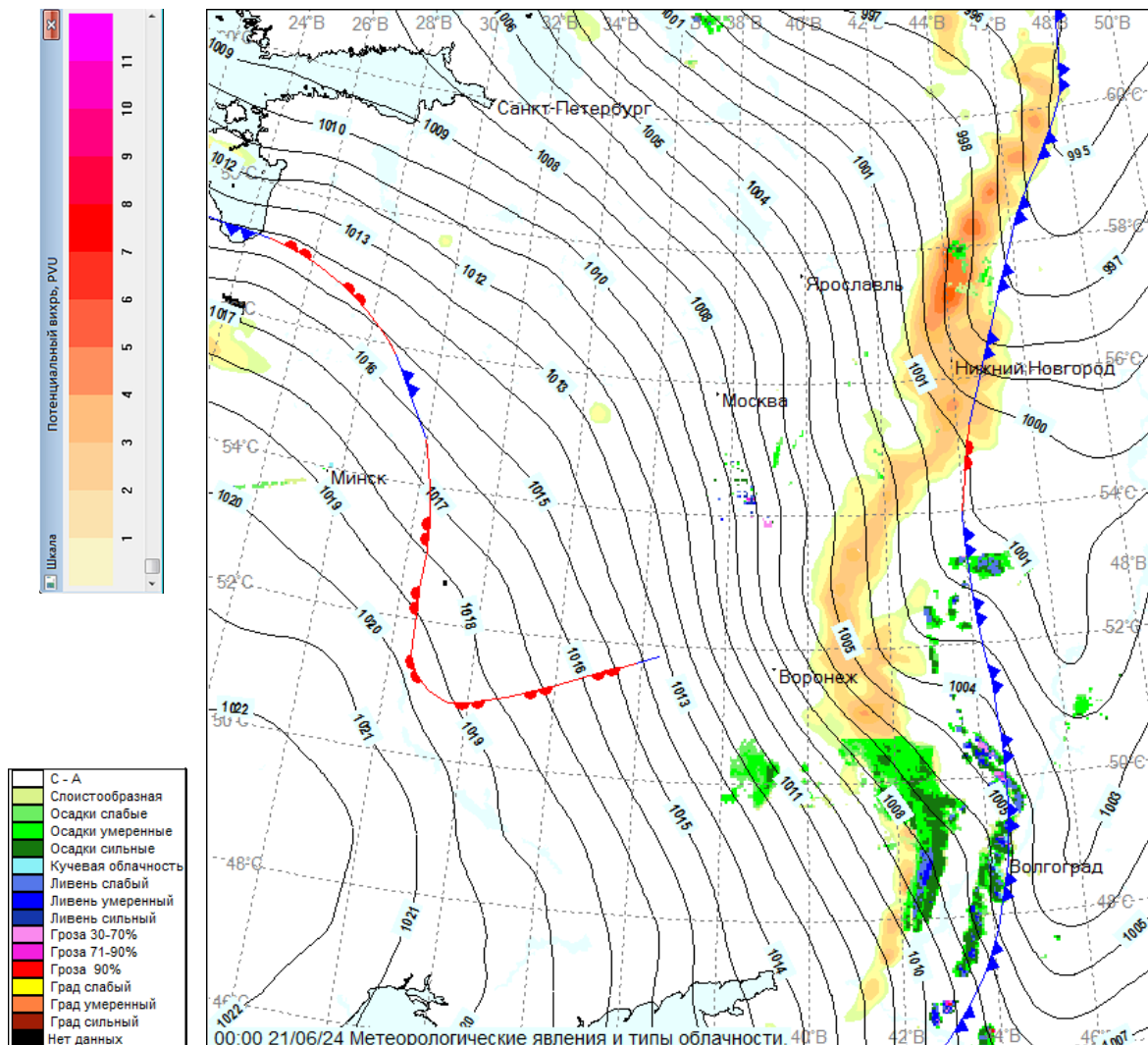


Потенциальный вихрь 700 гПа, $10^{-6} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ Ккг}^{-1}$

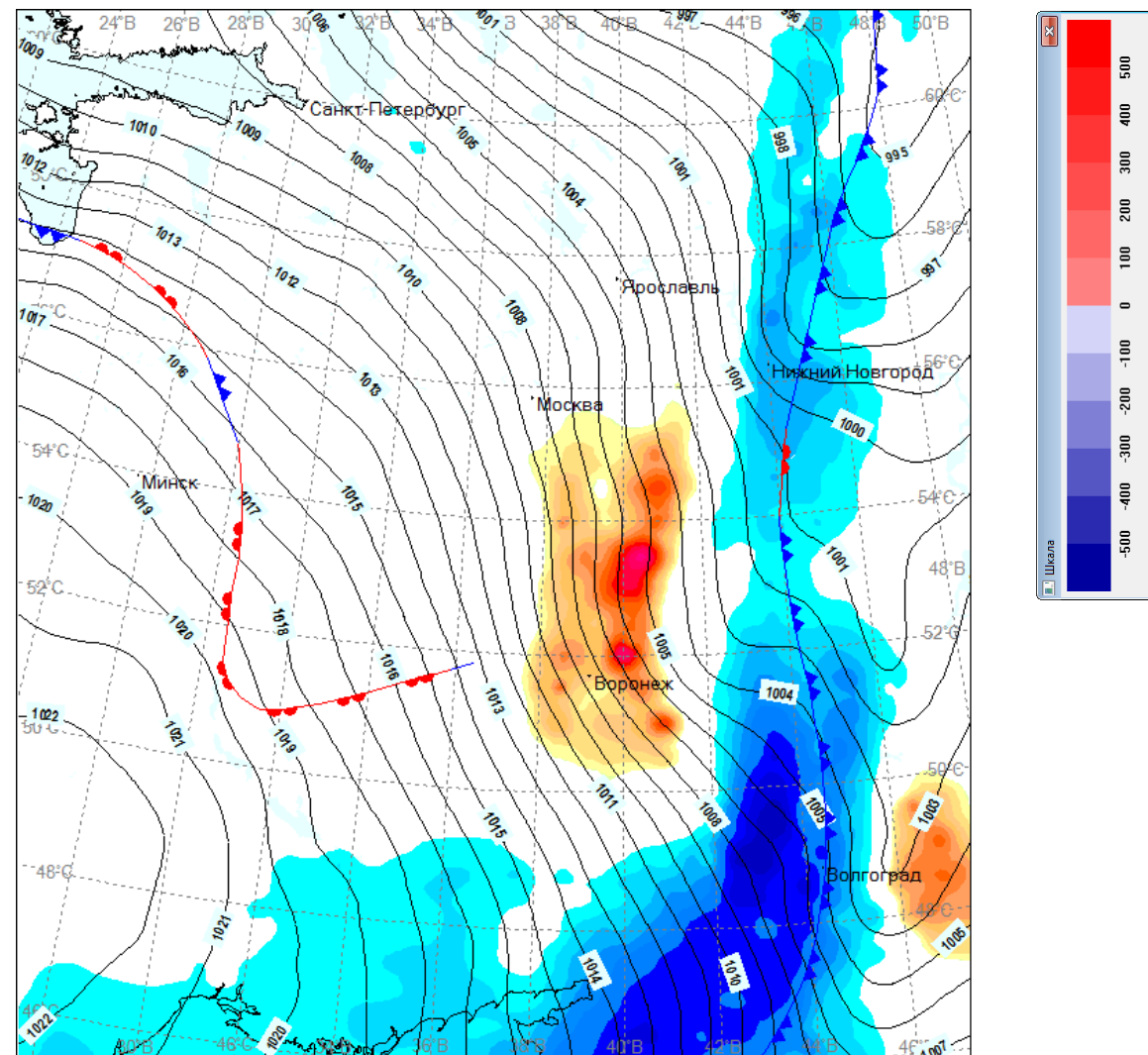


Спиральность 0-3 км, $\text{м}^2/\text{с}^2$

21.06.2024 г. 00ч. ВСВ



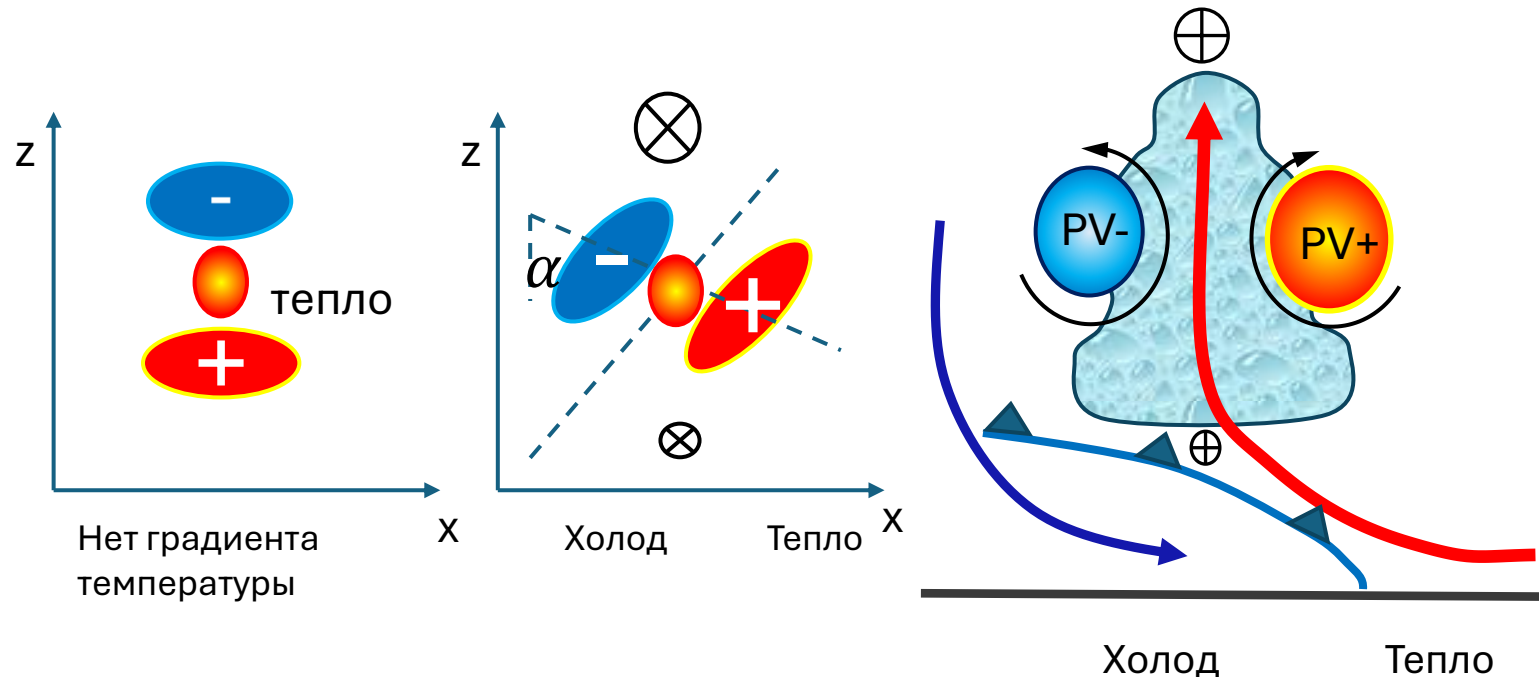
Потенциальный вихрь 700 гПа, $10^{-6} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ Ккг}^{-1}$



Спиральность 0-3 км, $\text{м}^2/\text{с}^2$

Мезомасштабный потенциальный вихрь

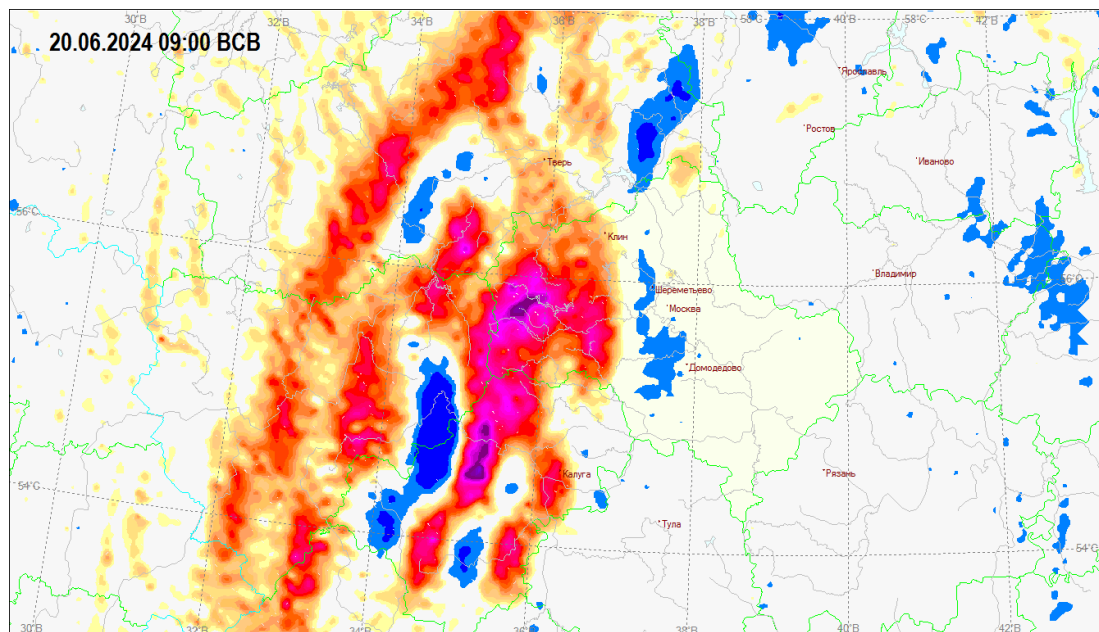
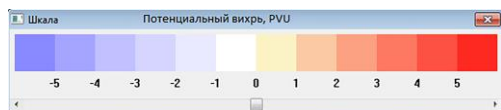
- При отсутствии сдвига ветра и горизонтального градиента температуры (в баротропной атмосфере), в условиях развития конвекции, диполи располагаются вертикально (положительный ниже области максимального нагрева – выделения скрытой теплоты конденсации, отрицательный – выше).
- При горизонтальном температурном градиенте, то есть в бароклинной зоне и при сдвиге ветра – диполи располагаются горизонтально, вблизи конвективного восходящего потока. Угол наклона оси, соединяющей положительный и отрицательный максимумы диполя:



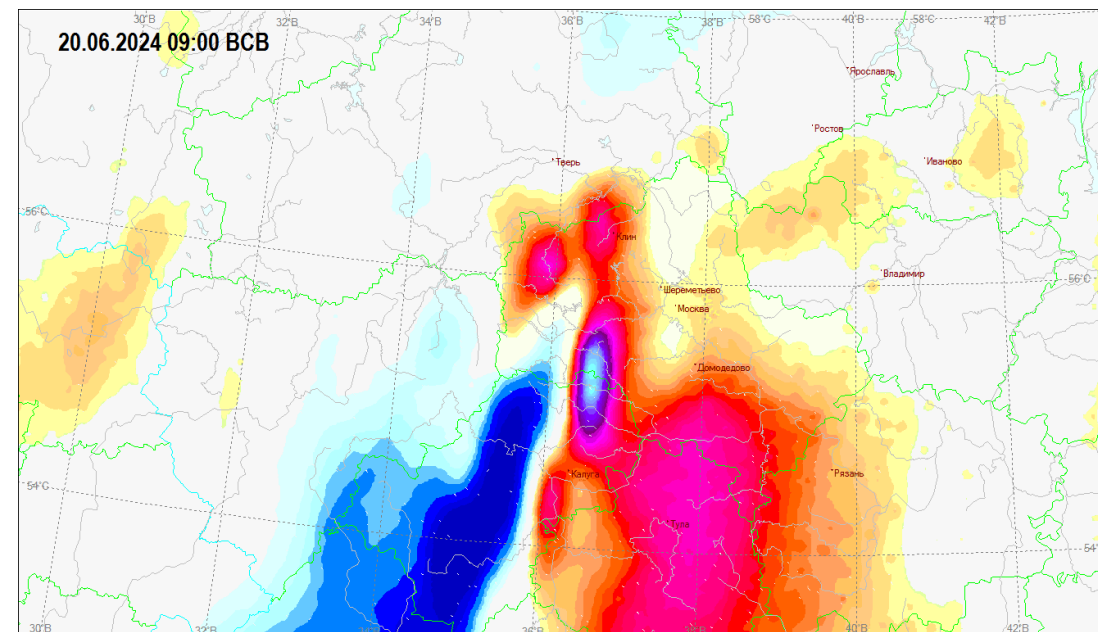
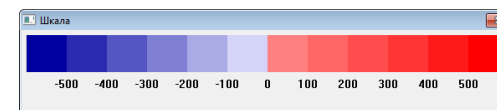
$$\alpha = \arctan \left(\frac{\Lambda}{f} \right),$$

Λ - сдвиг ветра

21.06.2024 г. 9-17 ч. ВСВ



Потенциальный вихрь на пов. 700 гПа

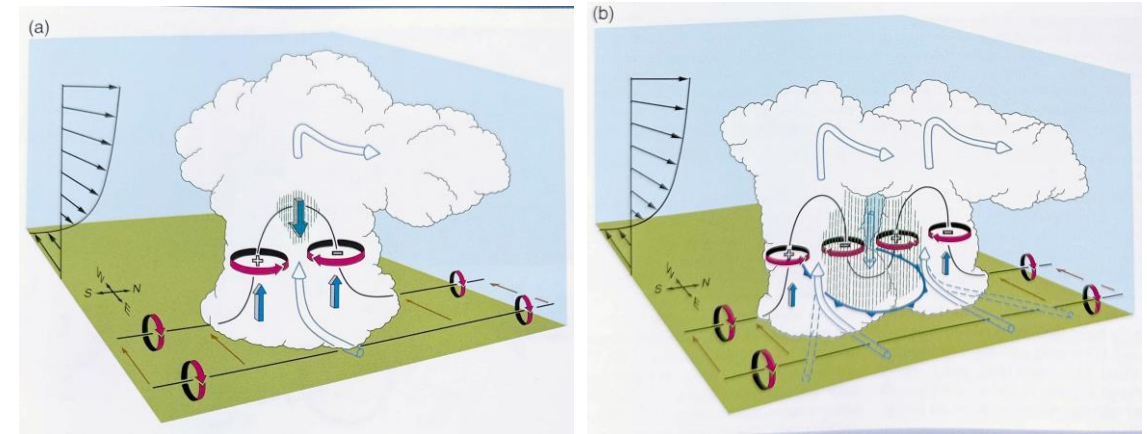


Интегральная спиральность 0 – 3 км

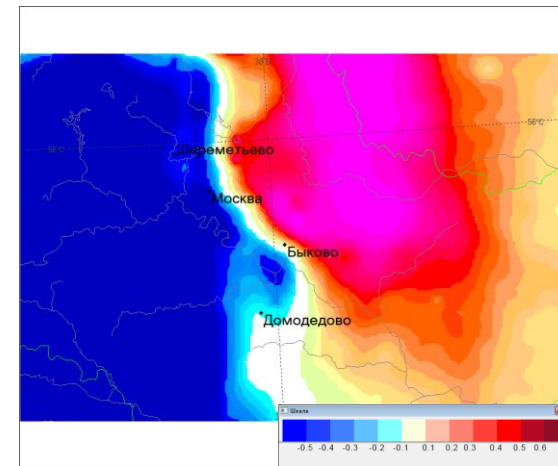
Конвективный шторм

- Потенциальный вихрь в масштабе мезо-γ (2 – 20 км) при глубокой влажной конвекции представляет из себя пары (диполи) положительных и отрицательных аномалий потенциального вихря в тропосфере. При сдвиге ветра в горизонтальном потоке и в присутствии горизонтального градиента температуры (в бароклинной зоне) диполи разворачиваются в горизонтальную плоскость.
- Спиральность является важным критерием образования и развития конвективных штормов.
- Высокая спиральность помогает поддерживать энергию конвективной ячейки на зрелой стадии шторма и приводит к длительному жизненному циклу конвективной ячейки.

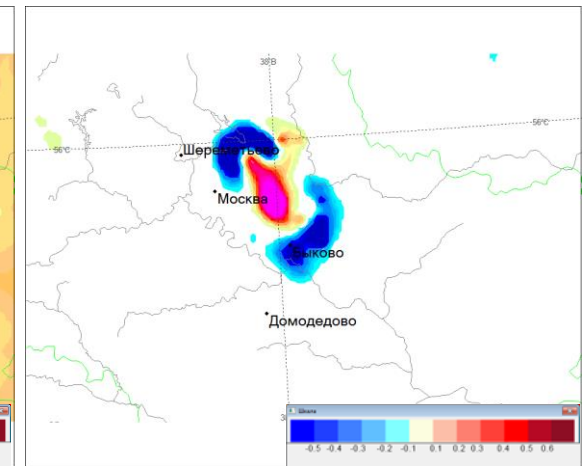
Markowski, Richardson, 2011



Adapted from Klemp, 1987



Спиральность (м/с²) по горизонтальным составляющим завихренности (700 гПа) 20.06.2024 г. 12:00 ВСВ.

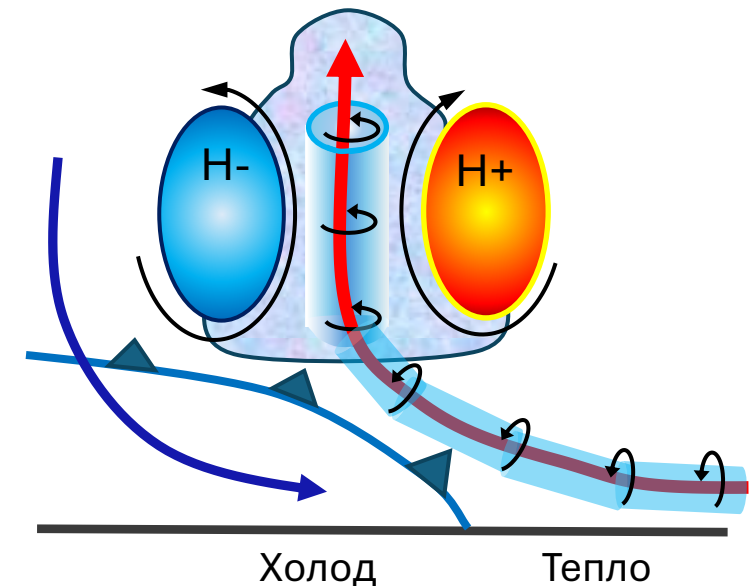
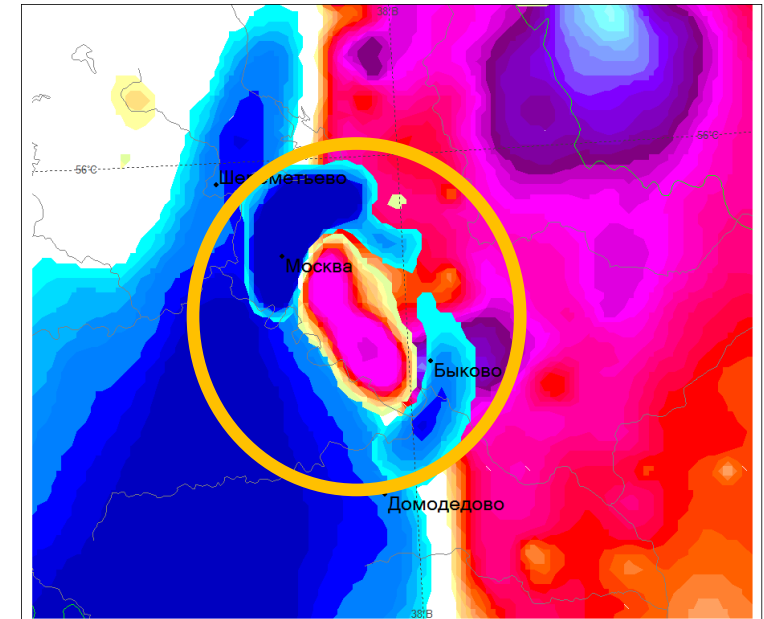


Спиральность (м/с²) по вертикальной составляющей завихренности (700 гПа) 20.06.2024 г. 12:00 ВСВ.

Конвективный шторм

- Связь между потенциальным вихрем и спиральностью особенно проявляется, когда совершается переход от синоптического масштаба к мезомасштабным атмосферным процессам.
- Спонтанное усиление спиральности происходит благодаря бароклинности и структурной неоднородности атмосферы. Наиболее эффективно это проявляется при необратимых термодинамических процессах во влажной атмосфере, сопровождающихся выпадением осадков.
- Возникает положительная обратная связь, когда начальные значения спиральности способствуют диабатической трансформации поля PV , в свою очередь PV служит источником спиральности.
- В зоне активных фронтов спиральность имеет такую же дипольную структуру, как и мезомасштабный потенциальный вихрь.

Курганский М.В., 2014



Алгоритм прогноза опасных явлений

- Градиент спиральности будет максимальным на линии холодного фронта - между максимальными по абсолютной величине положительными и отрицательными значениями интегральной спиральности).

$$M = \nabla H,$$

Макоско А.А., Максименков Л.О., 2019

где ∇H – градиент интегральной спиральности в слое 0-3 км.

- Градиент мезомасштабного потенциального вихря максимален между диполями.

$$\psi = \nabla PV,$$

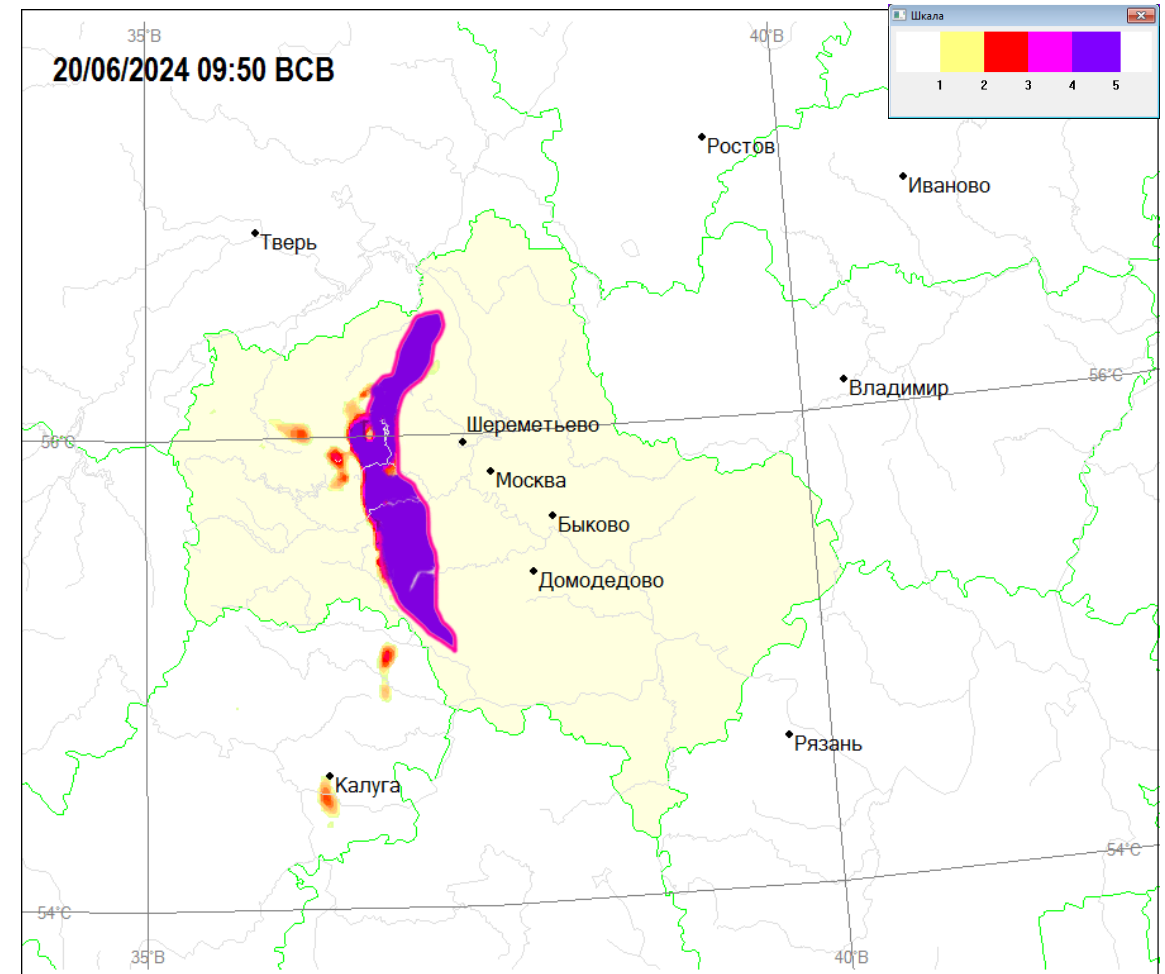
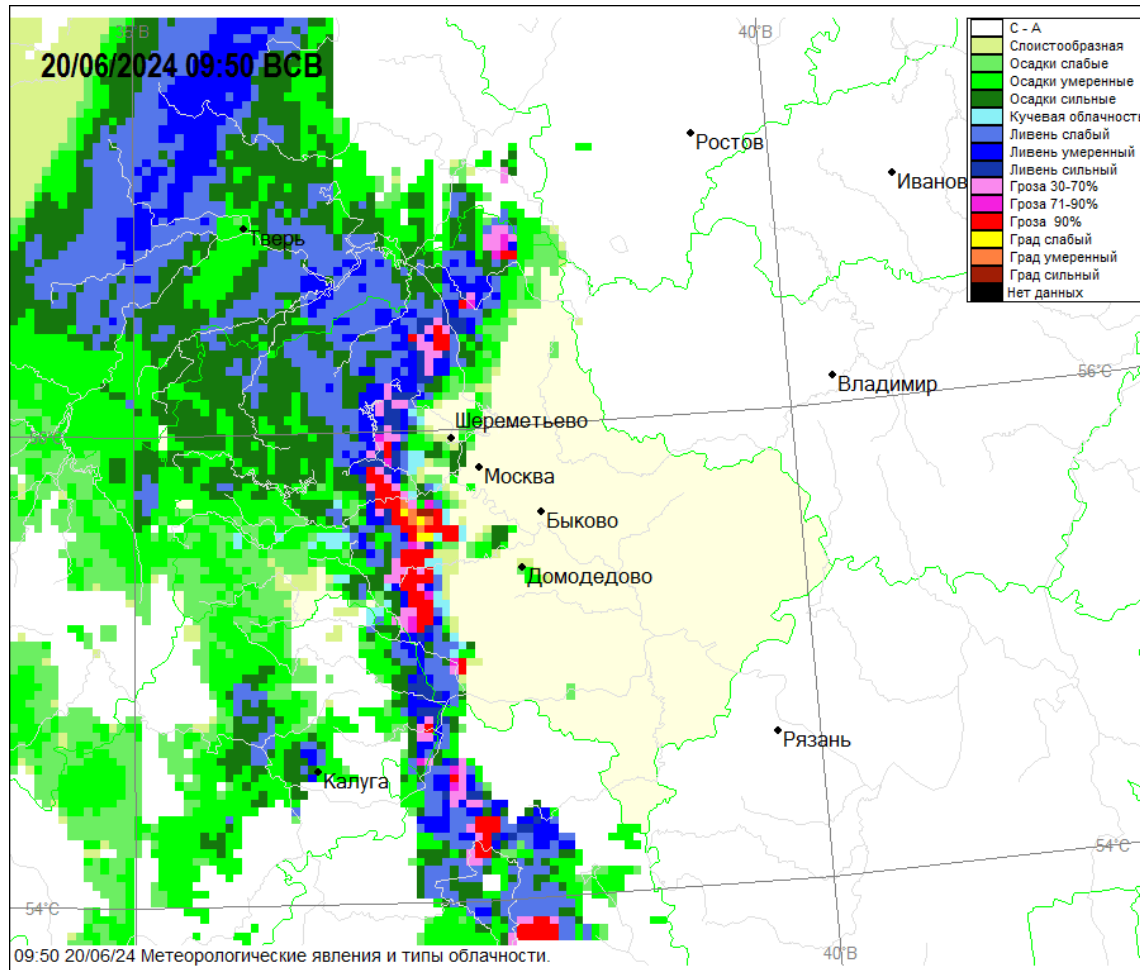
Юсупов Ю.И., 2020

где ∇PV – градиент мезомасштабного потенциального вихря.

- Предлагается формула для определения опасных конвективных явлений:

$$HPV = M\psi = \nabla H \nabla PV.$$

20.06.2024 г. 10-12 ч. ВСВ



Статистическая обработка

Прогн.	Заблаг. (час)	Порог	Оправдываемость					Пирси- Обухова	Багрова -Хайдке	Обухова
			Общая	Наличия	Отсутств ия	Предуп. наличия	Предуп. Отсут.			
∇Н	3 - 6	$0.54 \cdot 10^{-2}$ м/с ²	0,69	0,36	0,86	0,58	0,72	0,29	0,24	-0,13
∇PV	3 - 6	$0.82 \cdot 10^{-9}$ мК/кг с	0,62	0,28	0,82	0,51	0,64	0,15	0,12	-0,42
∇PV ∇Н	3 - 6	$0.34 \cdot 10^{-10}$ м ² К/с ³ кг	0,79	0,52	0,91	0,69	0,81	0,51	0,45	0,26

Прогн.	Радар		Сумма
	Конв.	Без	
Конв	n11	n12	n10
Без	n21	n22	n20
Сумма	n01	n02	n00

$T = \frac{n_{11}}{n_{01}} - \frac{n_{12}}{n_{02}}$ - критерий Пирси – Обухова.

$H = \frac{U - U_0}{1 - U_0}$ - критерий Багрова – Хайдке, $U = \frac{n_{11} + n_{22}}{n_{00}}$; $U_0 = \frac{n_{01}n_{02} + n_{02}n_{20}}{n_{00}^2}$.

$Q = 1 - \frac{n_{12}}{n_{01}} - \frac{n_{21}}{n_{02}}$ - критерий точности Обухова.

Заключение

1. Образование аномалии крупномасштабного потенциального вихря в средней тропосфере может служить признаком инициации и развития конвекции.
2. Образование мезомасштабных горизонтально ориентированных диполей потенциального вихря в средней тропосфере является необходимым и достаточным условием существования активной конвекции.
3. В зоне активных фронтов спиральность имеет дипольную структуру.
4. Использование предложенной функции HPV и сравнение полученных результатов с информацией МРЛ, позволяет сделать вывод о целесообразности применения этой функции для краткосрочного (до 12 час) прогноза зон активной конвекции с точки зрения возникновения и развития шквалов, сильных осадков и гроз.

Литература:

1. Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Курганский М.В., Каллистратова М.А. Спиральность и турбулентность в атмосферном пограничном слое. //Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021, Т. 57. № 1, С. 34-52.
2. Копров Б. М., Копров В.М., Курганский М.В., Чхетиани О.Г. Спиральность и потенциальный вихрь в приземной турбулентности. //Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015, Т. 51. № 6, С 637-647.
3. Курганский М. В. Введение в крупномасштабную динамику атмосферы. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1993 г., – 168 с.
4. Курганский, М. В. (2014). Связь между спиральностью и потенциальным вихрем в сжимаемой вращающейся жидкости. //ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА, 2014, С. 122-133.
5. Макоско А.А, Максименков Л.О. Новый прогностический индикатор неблагоприятных и опасных явлений погоды-градиент интегральной спиральности поля скорости атмосферных движений.// Проблемы анализа риска. 2019, Т. 16 № 2, С. 50-57.
6. Юсупов Ю. И. Исследование структуры тропосферного потенциального вихря в масштабе мезо-γ при глубокой влажной конвекции с помощью модели WRF-ARW // Процессы в геосредах. – 2020. – №. 4 (26). – С. 983 - 988.
7. Holton J. R. An Introduction to Dynamic Meteorology. Fourth edition. – Elsevier Academic Press, 2004, pp. 290 - 304.
8. Markowski P., Richardson Y. Mesoscale meteorology in midlatitudes. – John Wiley & Sons, 2011.
9. Russell A., Vaughan G. and Norton E. G. Large-scale potential vorticity anomalies and deep convection. //Q. J. R. Meteorol. Soc., 2012, vol. 138, -pp. 1627 - 1639.
10. Zhemin T, Rongsheng W. Helicity dynamics of atmospheric flow. //Advances in atmospheric sciences. 1994 Jun; Vol.11 No. 2, - P. 175-188.