



V Всероссийская конференция с международным участием  
Турбулентность, динамика атмосферы и климата  
Посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова  
19–21 ноября 2024 г. Москва



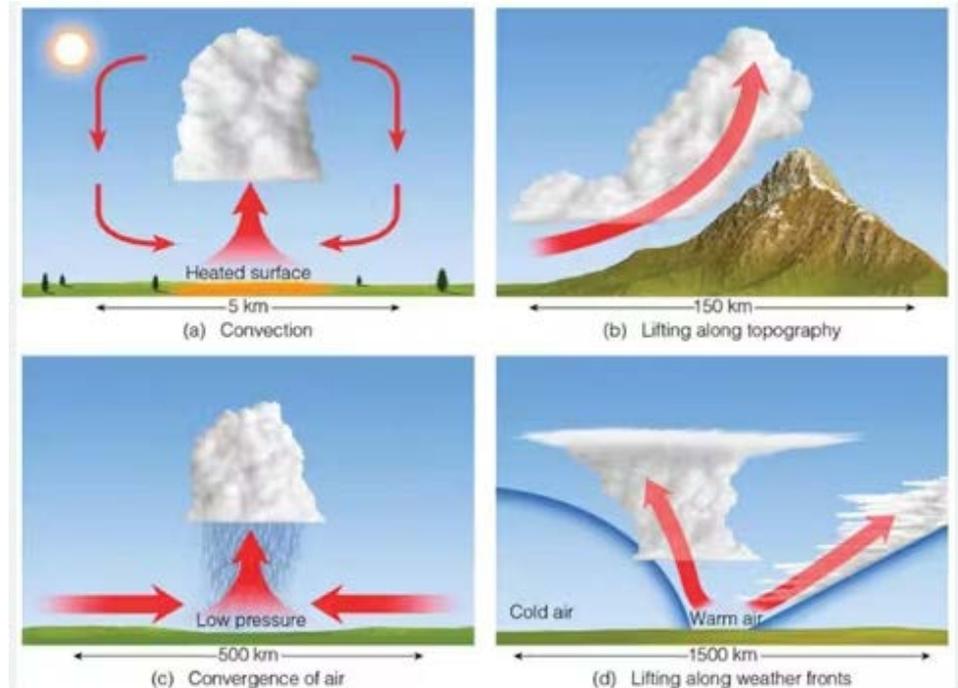
# Диагностические признаки интенсивной конвекции, проявляющиеся в данных дистанционных наблюдений

Спрыгин А.А., Калмыкова О.В.

Научно-производственное объединение "Тайфун", г. Обнинск  
Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, г. Москва

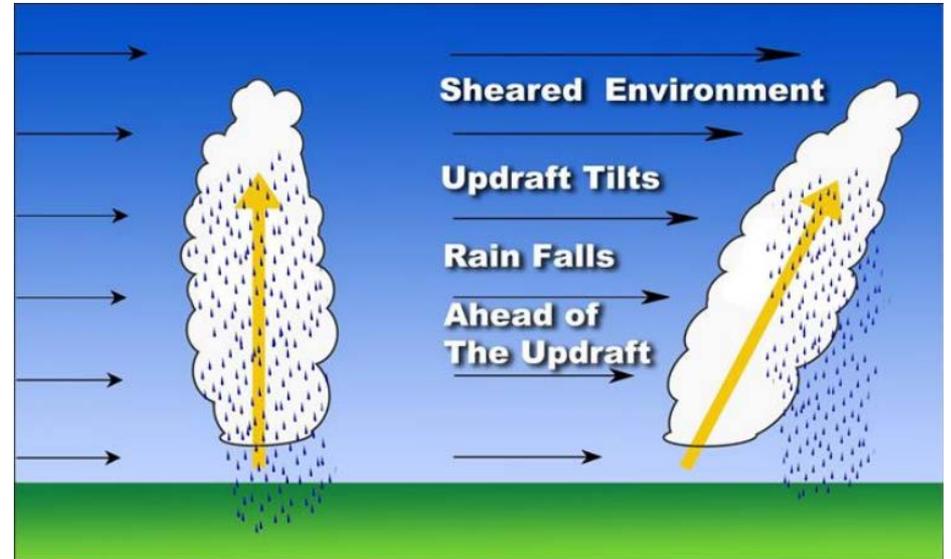
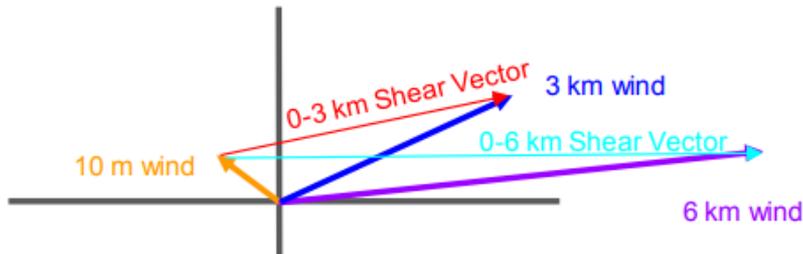
## Интенсивные конвективные процессы

- Интенсивные конвективные процессы способствуют образованию облаков большой вертикальной протяженности в слоях, охватывающих почти всю тропосферу, а иногда и нижнюю часть стратосферы.
- С практической точки зрения анализ и прогноз такой глубокой конвекции представляет большой интерес, поскольку с ней могут быть связаны интенсивные ливневые осадки, выпадение града, шквалистые ветра и смерчи, сильная молниевая активность.
- По причине проникновения восходящих движений на значительные высоты в системах глубокой конвекции конденсируется большое количество водяного пара. Теплота конденсации нагревает частицы воздуха и сообщает им дополнительное вертикальное ускорение. Таким образом, фазовые переходы влаги играют ключевую роль в развитии и поддержании систем глубокой конвекции.
- Системы глубокой конвекции существуют в различных формах. Выделяют изолированные и групповые системы. Изолированные системы – отдельные ячейки, мультячейки и суперячейки. Групповые включают в себя ряд конвективных ячеек, объединенных в одну большую мезомасштабную конвективную систему (линии шквалов, мезомасштабные конвективные комплексы). На образование той или иной формы систем глубокой конвекции оказывают влияние условия окружающей среды, в первую очередь величина вертикального сдвига ветра, а также в некоторой степени и тип механизма формирования восходящих потоков (форсинга).

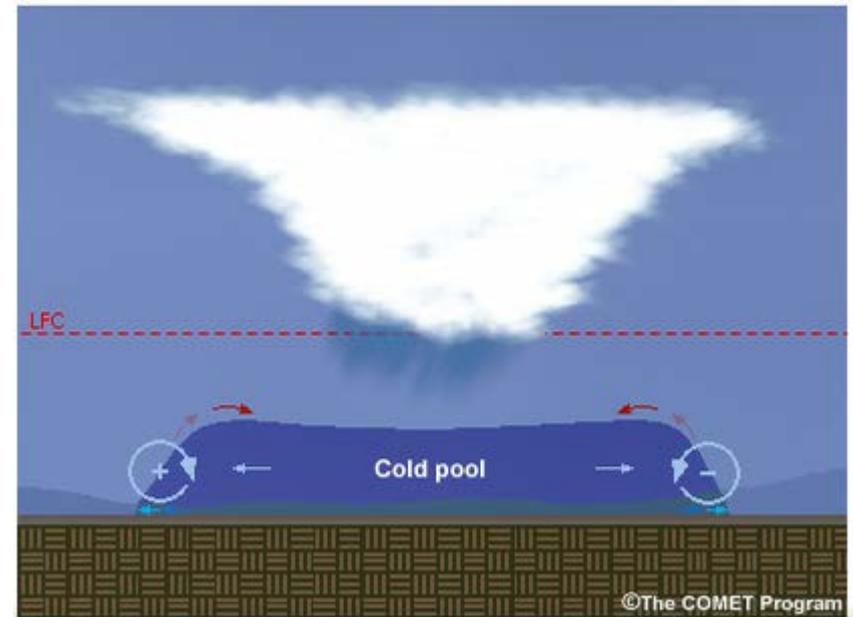


# Факторы, способствующие формированию долгоживущих систем

- Вертикальный сдвиг ветра. Разграничивает область отрицательной плавучести (выпадения осадков) и область восходящих потоков, подпитывающих систему.



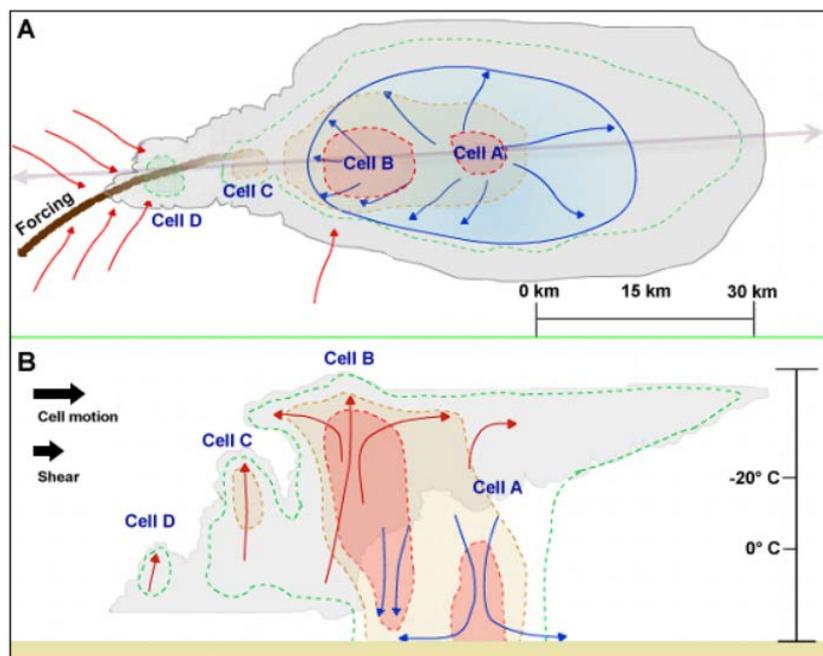
- В условиях слабого сдвига ветра триггером долгоживущей конвекции может выступать холодный бассейн (cold pool) – плотная холодная воздушная масса, растекающаяся в подоблачном слое, образуемая при испарении осадков. Эти бассейны способствуют инициированию новых конвективных ячеек вдоль их границы.
- В общем случае, как правило, присутствуют оба фактора в различном соотношении друг с другом, обеспечивая формирование и подпитку систем глубокой конвекции на том или ином ее фланге.



# Мультиячейки

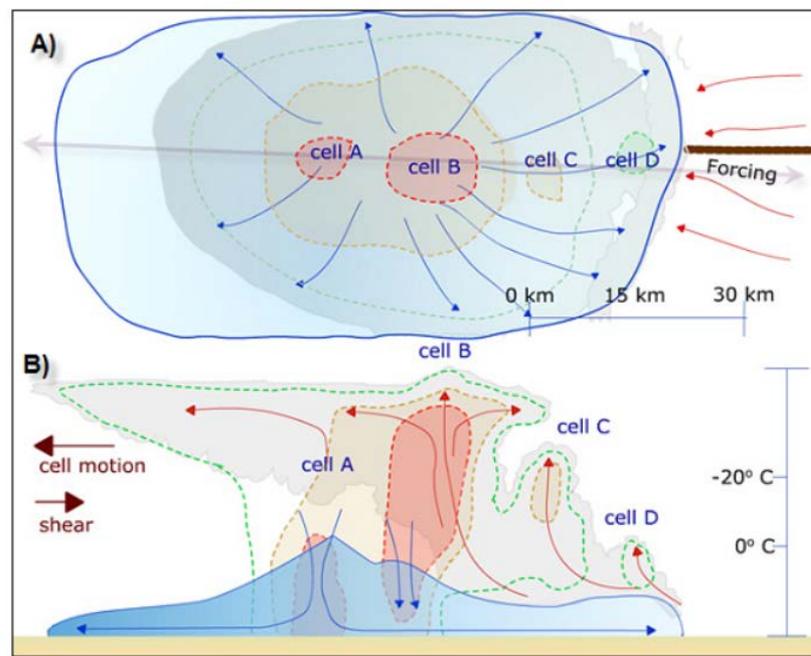
- Состоят из нескольких конвективных ячеек, располагающихся в непосредственной близости друг к другу. Относятся к масштабу мезо-γ (2-20 км). Визуально выглядят как единое облако, разделяют друг с другом область осадков и холодный бассейн. В такой структуре происходит частая инициация новых ячеек до того как диссипируют более ранние, что способствует долгому времени ее жизни. Мультиячейки возникают при слабом сдвиге ветра.
- Если размеры холодного бассейна невелики, то образование новых ячеек обычно происходит вдоль линии форсинга (конвергенции или неустойчивости) вне области данного бассейна в тыловой части системы.
- В условиях существования достаточно большого по площади холодного бассейна инициация новых ячеек обычно происходит на его переднем фланге вдоль так называемого фронта порывистости.

Conceptual Diagrams of Storm-scale Thunderstorm with Weak Cold Pool



NOAA

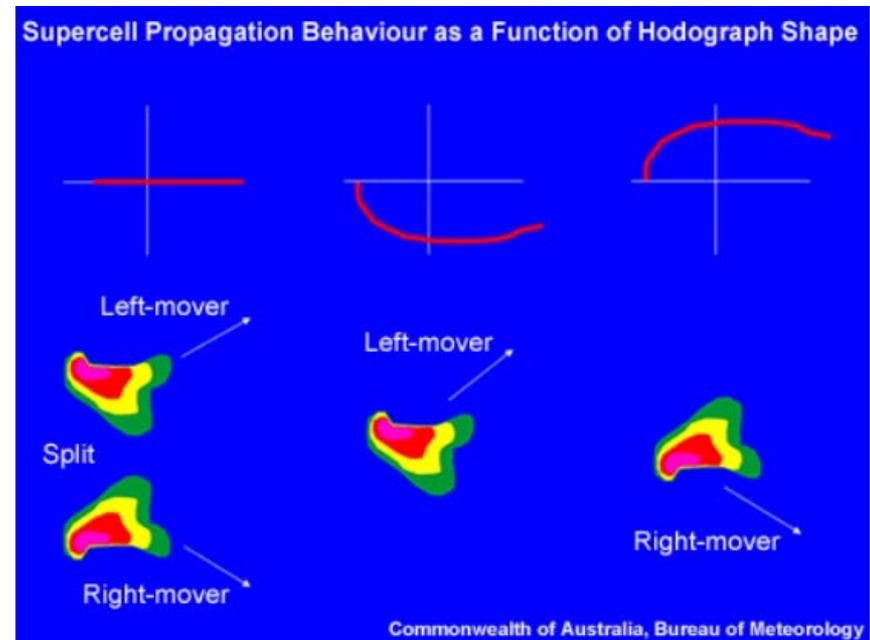
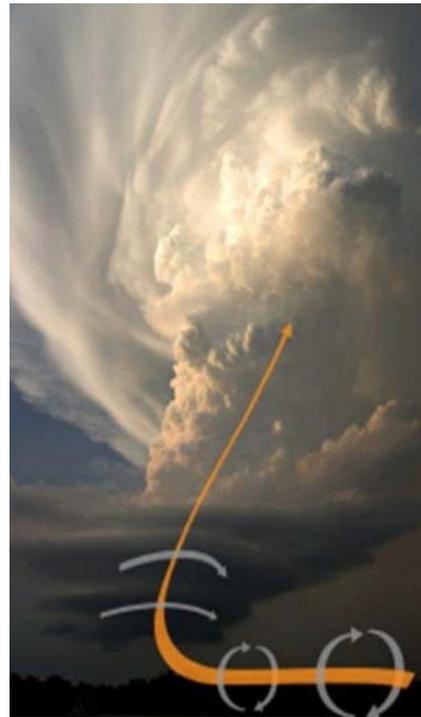
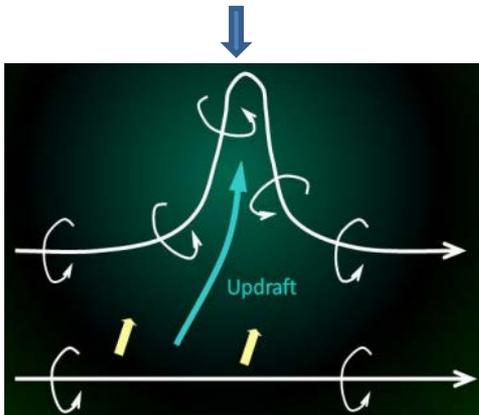
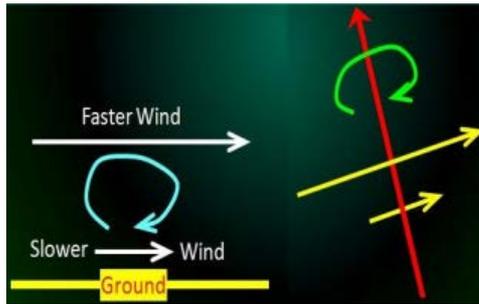
Conceptual Diagrams of Storm-scale Thunderstorm with Strong Cold Pool



NOAA

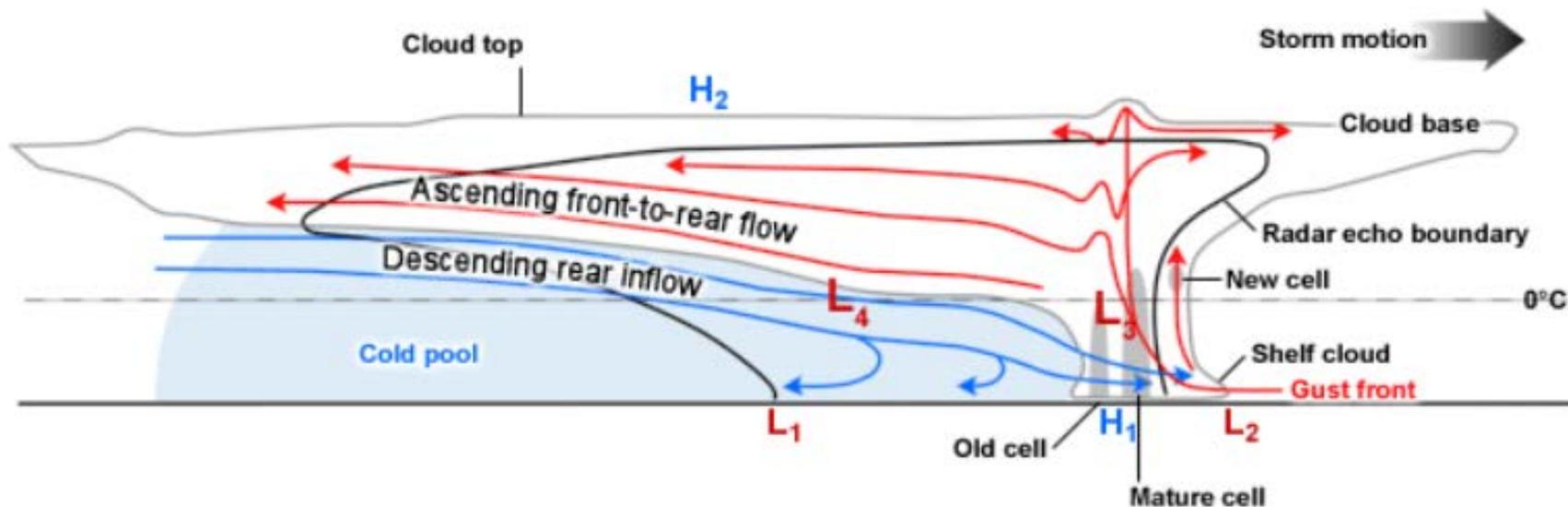
# Суперячейки

- Обычно достаточно долго живущие системы, часто имеющие аномальный вектор движения (по отношению к направлению ведущего потока). В структуре суперячеек присутствует мезоциклон – небольшая по размерам (2-10 км) область вертикального вращения глубиной около 3 км. Продолжительное время существования суперячейки объясняется смещением области выпадения осадков (нисходящих потоков) от центра мезоциклона, где преобладают восходящие потоки, постоянно подпитывающие облако. По мере ослабления мезоциклона происходит постепенный распад и суперячейки.
- Образование мезоциклона в суперячейке происходит вследствие отклонения изначально горизонтальной завихренности, возникающей под действием вертикального сдвига ветра, восходящим потоком под формирующимся облаком. В результате в области влияния этого потока происходит трансформация завихренности в вертикальную. При этом в зависимости от формы годографа ветра возможны различные варианты дальнейшей эволюции суперячейки.



## Мезомасштабные конвективные системы

- Как и мультячейки состоят из большого числа отдельных ячеек, расположенных близко друг к другу, но имеют значительно большие размеры (масштаб мезо- $\beta$  (20-200 км) и мезо- $\alpha$  (200-2000 км). Формируют единую область выпадения осадков и наковальню. Масштабы МКС и продолжительное время их жизни (от нескольких часов до суток) обуславливают влияние силы Кориолиса в том числе на их морфологию.
- Определяющим триггером образования МКС, как и для мультячеек, являются холодные бассейны. Кроме того важную роль в процессе их развития играют вертикальный сдвиг ветра, запасы конвективной энергии (CAPE) и механизмы форсинга. Часто МКС являются результатом эволюции мультячеек с образованием холодных бассейном достаточных размеров.
- Организация воздушных потоков в МКС обуславливается формированием областей гидростатического минимума (L) и максимума (H). Главный минимум формируется под наковальней на верхней границе холодного бассейна и приводит к ускорению нисходящего потока при его движении к поверхности земли. Как следствие в тылу МКС возникают сильные приземные ветра и шквалы.



# Диагностические признаки интенсивной конвекции

- Интенсивные конвективные процессы зачастую могут быть обнаружены по прямым или косвенным признакам. Эти признаки проявляются в структуре данных дистанционных наблюдений, в первую очередь радиолокационных, спутниковых и грозопеленгационных. В литературе эти признаки часто именуют шаблонами или сигнатурами интенсивной конвекции.
- По результатам некоторых исследований установлена статистическая связь наблюдаемых признаков с регистрацией опасных конвективных явлений, что указывает на их потенциальную прогностическую значимость. Природа проявления некоторых признаков до сих пор не изучена. Возможность выявления ряда признаков в большой степени определяется разрешением исходных данных.

## **Спутниковые сигнатуры:**

Определяются особенностями, наблюдаемыми на верхней границе штормов, являются совокупным результатом множества различных физических процессов.



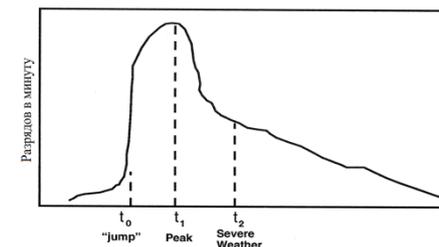
## **Радарные сигнатуры:**

Связаны с особенностями пространственно-временного распределения гидрометеоров в структурах с сильным и устойчивым восходящим потоком.



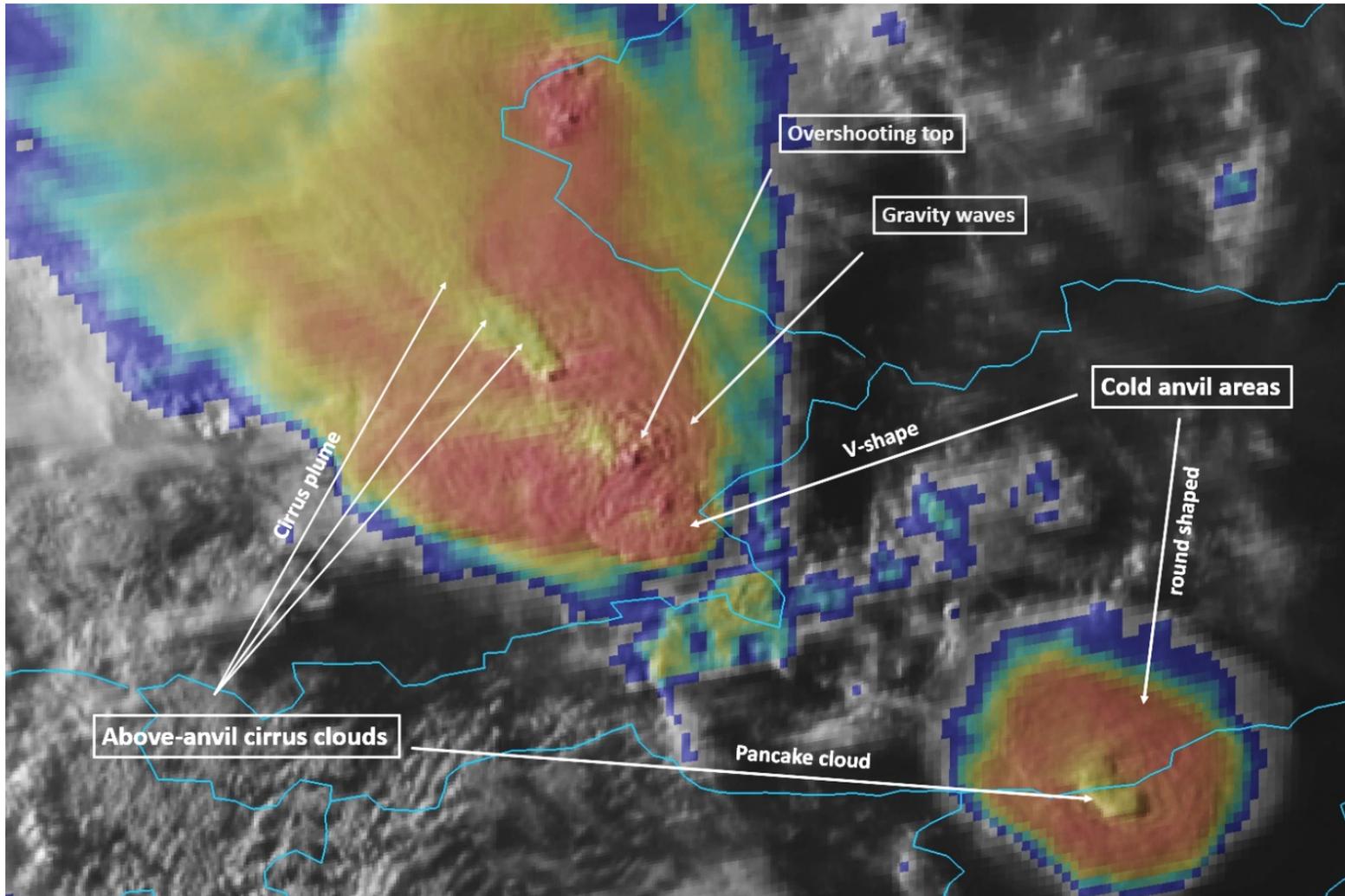
## **Сигнатуры молниевой активности:**

Связанны с пульсациями воздушных потоков, обуславливающими различные особенности регистрации молниевых разрядов.

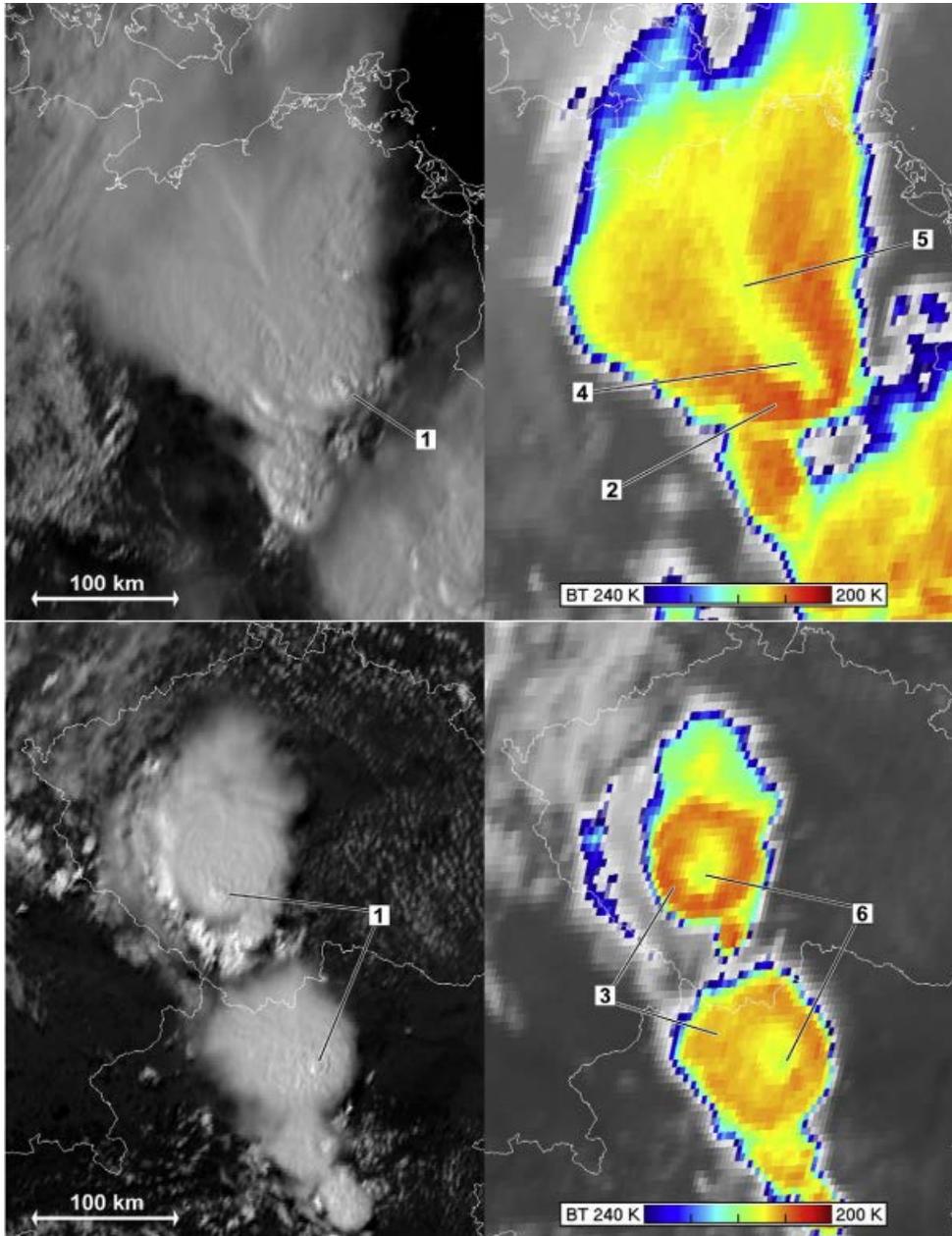


## Спутниковые сигнатуры

- Мощные восходящие потоки проникают в самые верхние слои тропосферы и нередко в нижнюю часть стратосферы, где преобладают волновые процессы. Взаимодействие этих потоков с находящим там воздухом приводит к формированию различных шаблонов, наблюдаемых на спутниковых снимках как в видимом, так и в инфракрасном диапазонах спектра.

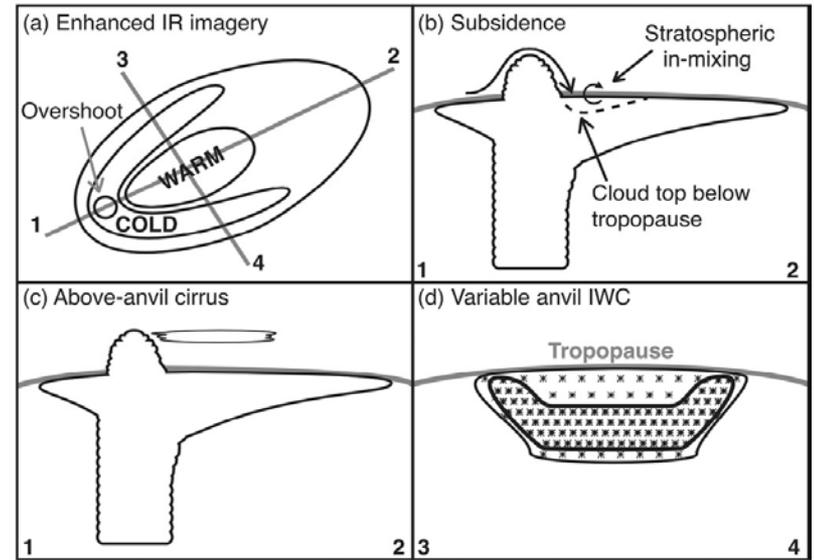


# Спутниковые сигнатуры



- 1 – Overshooting tops
- 2 – Cold-U
- 3 – Cold Ring
- 4 – Close-in warm area (CWA)
- 5 – Distant warm area (DWA)
- 6 – Central warm spouts (CWS)

## Гипотезы формирования шаблонов



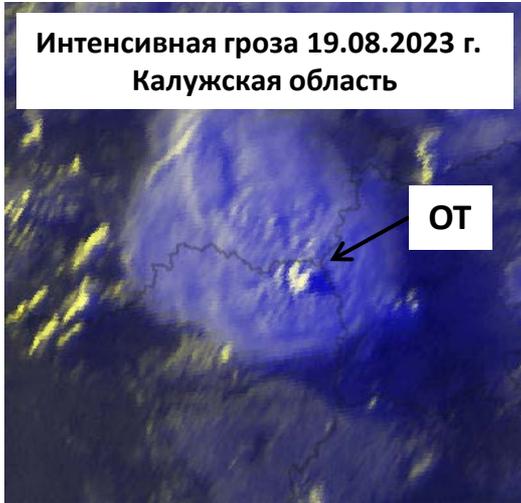
**b** - эффект «проседания» подветренной от ОТ стороны при взаимодействии обтекающих ОТ потоков с воздухом нижней стратосферы

**c** - генерация и распространение на подветренную сторону от ОТ шлейфа перистой облачности

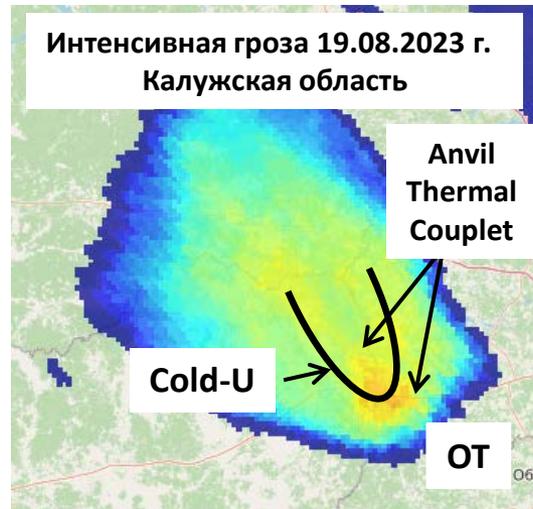
**d** - распад ОТ на 2 шлейфа с более плотными частицами по контуру и менее плотными в центральной части шторма

# Спутниковые сигнатуры

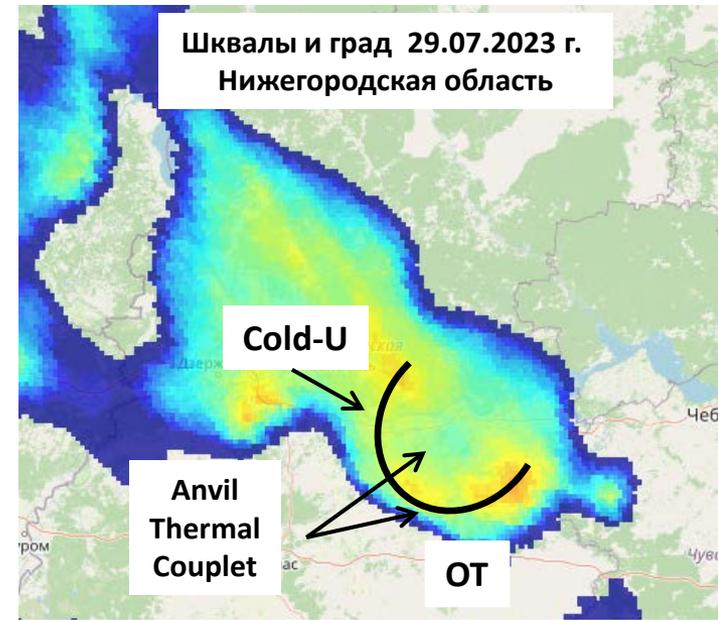
Интенсивная гроза 19.08.2023 г.  
Калужская область



Интенсивная гроза 19.08.2023 г.  
Калужская область



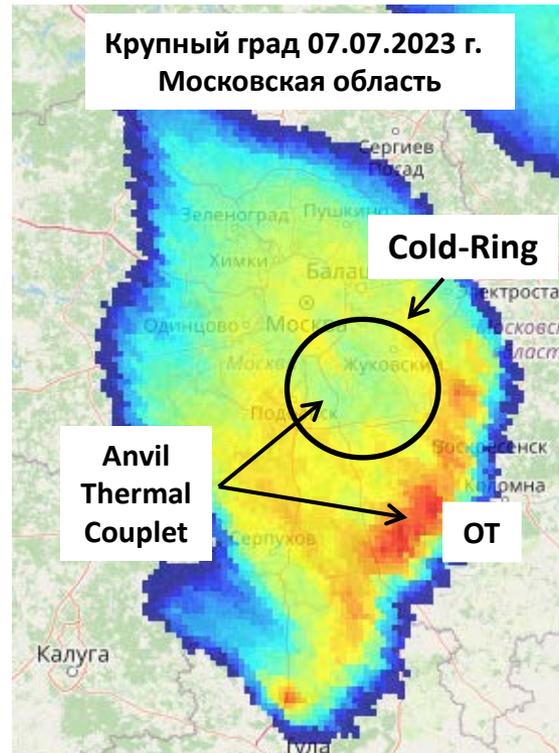
Шквалы и град 29.07.2023 г.  
Нижегородская область



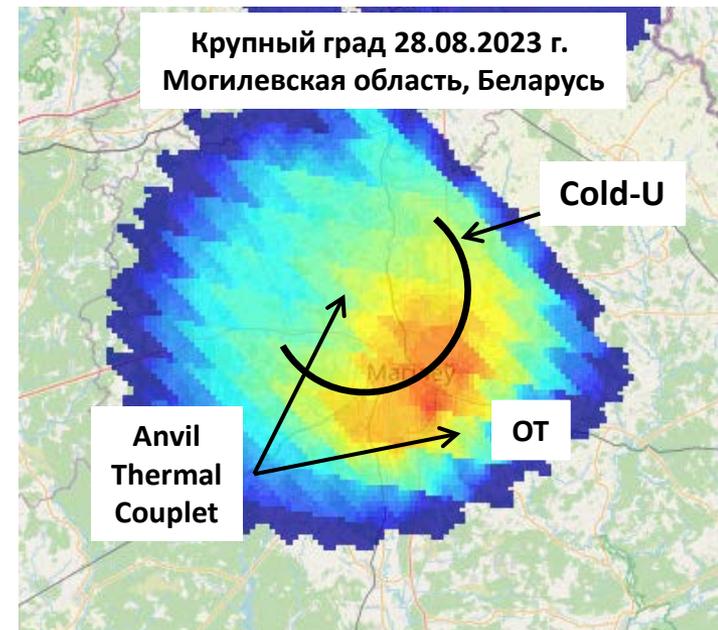
Крупный град 28.08.2023 г.  
Могилевская область, Беларусь



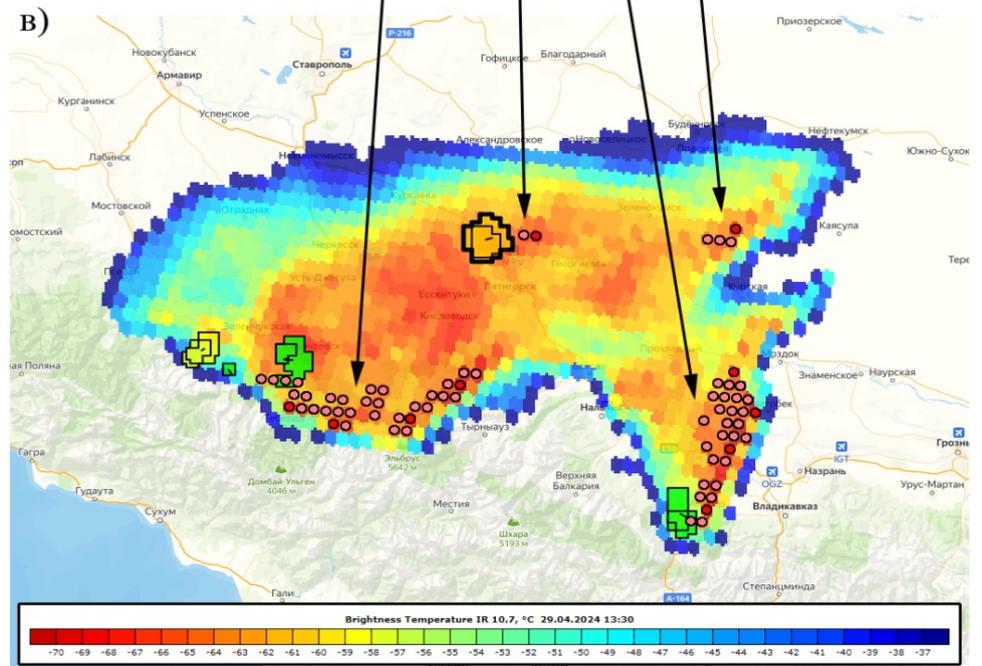
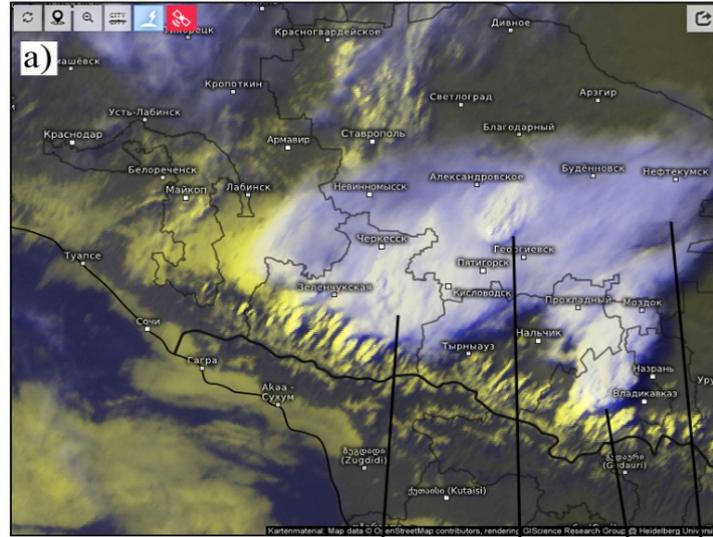
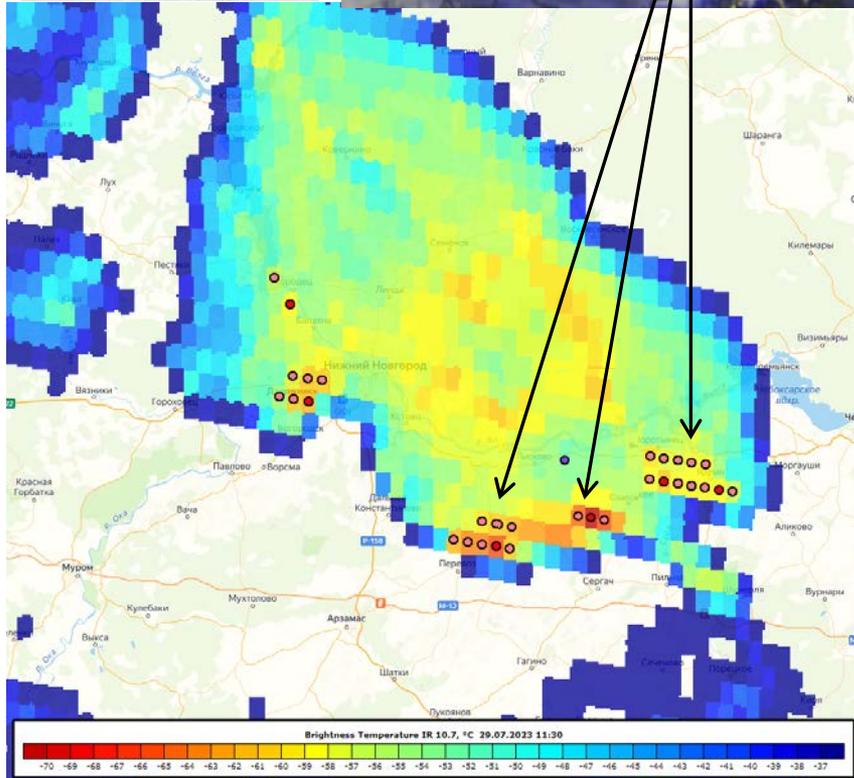
Крупный град 07.07.2023 г.  
Московская область



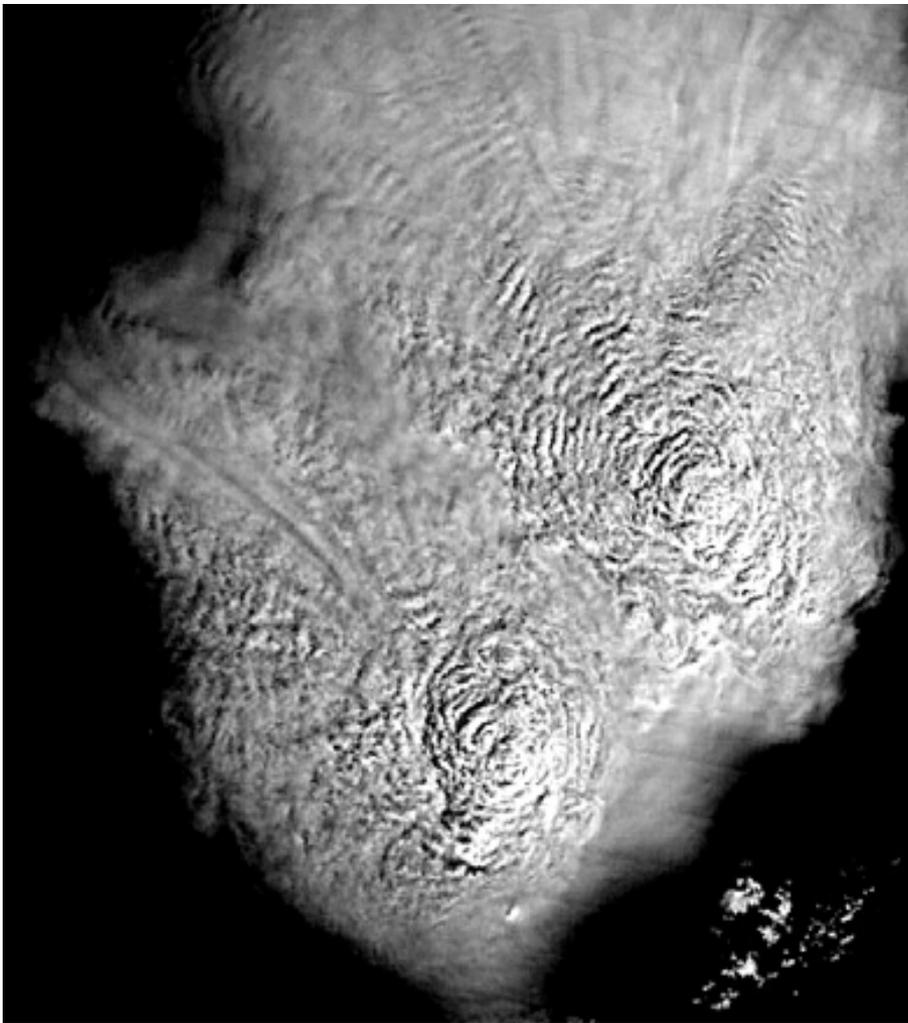
Крупный град 28.08.2023 г.  
Могилевская область, Беларусь



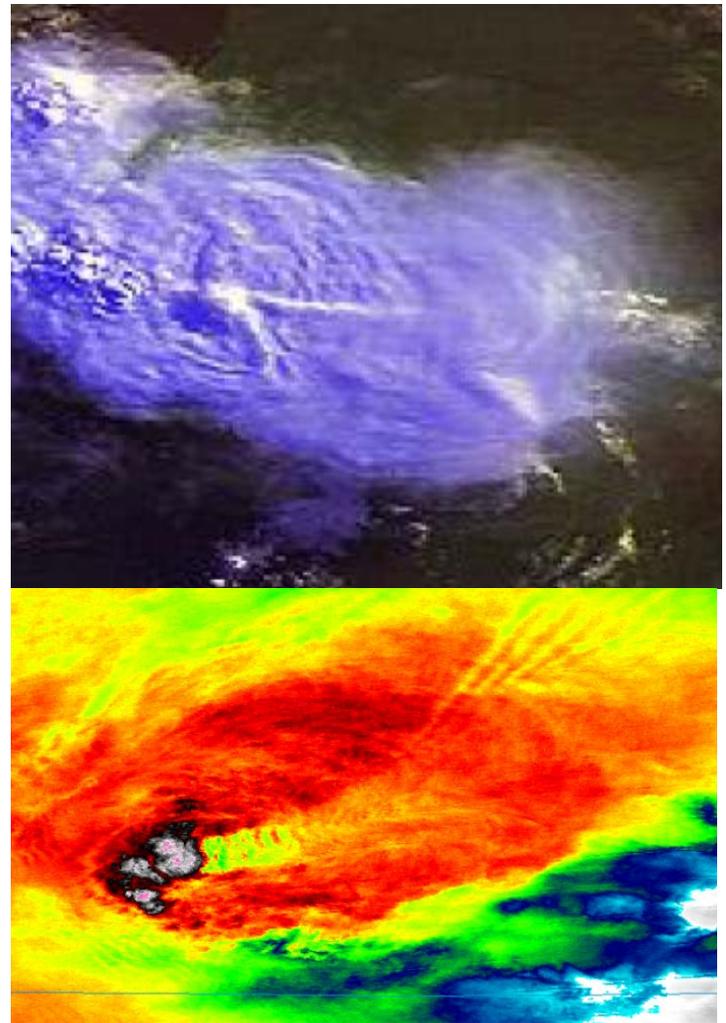
# Спутниковые сигнатуры



## Internal Gravity Waves (IGW)

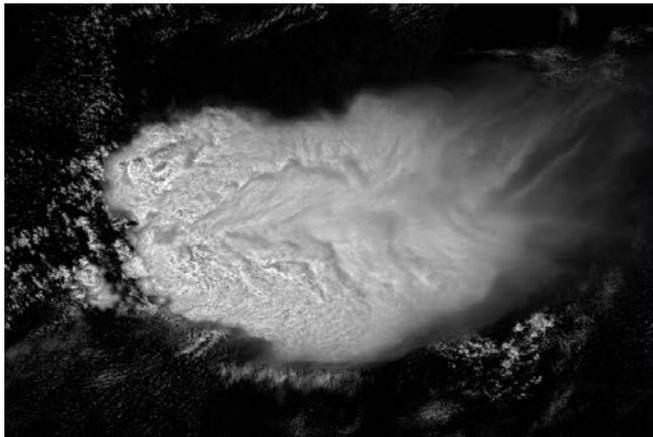
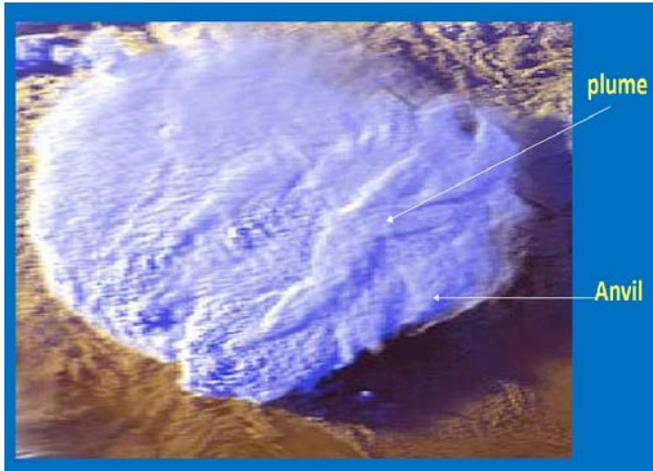


## Storm Tops Ship Waves

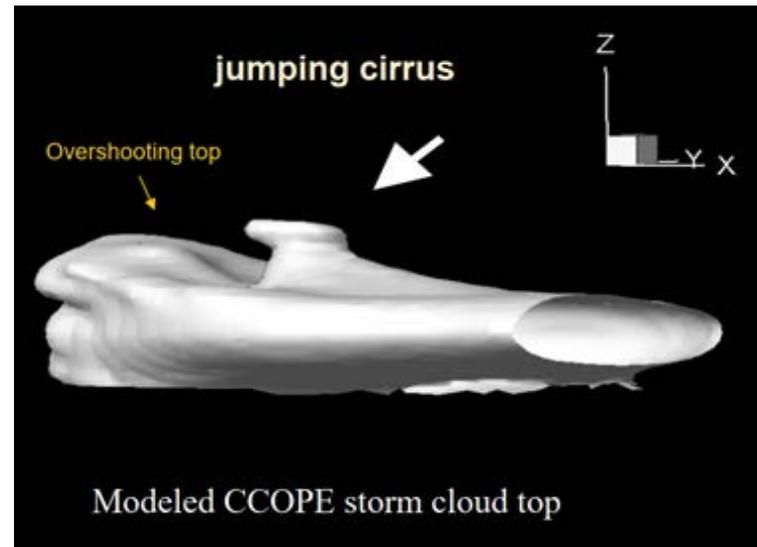
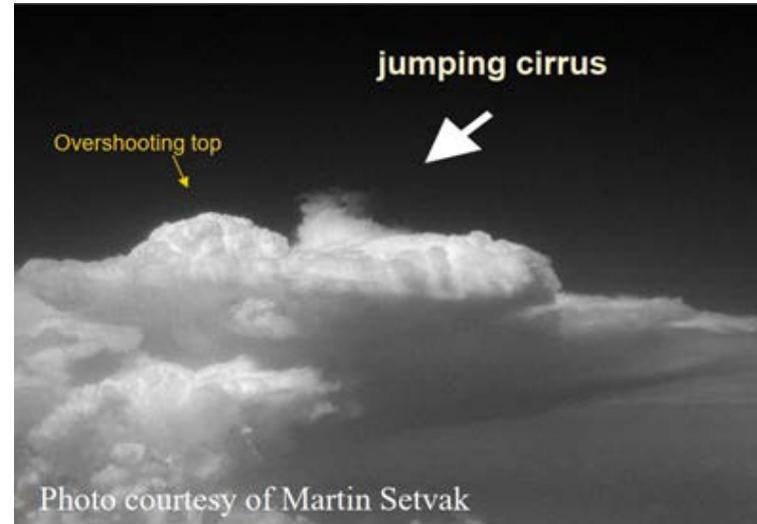


# Спутниковые сигнатуры

## Above Anvil Cirrus Plumes (AACP)

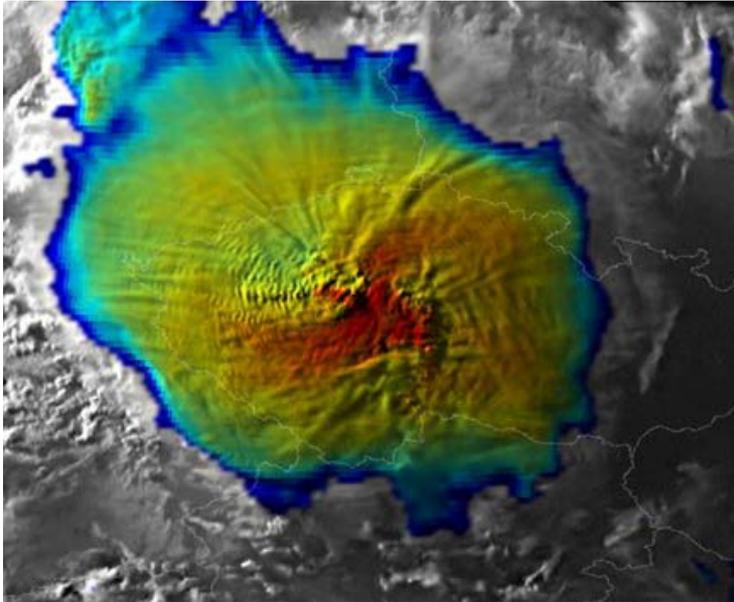


## Jumping Cirrus (JC)

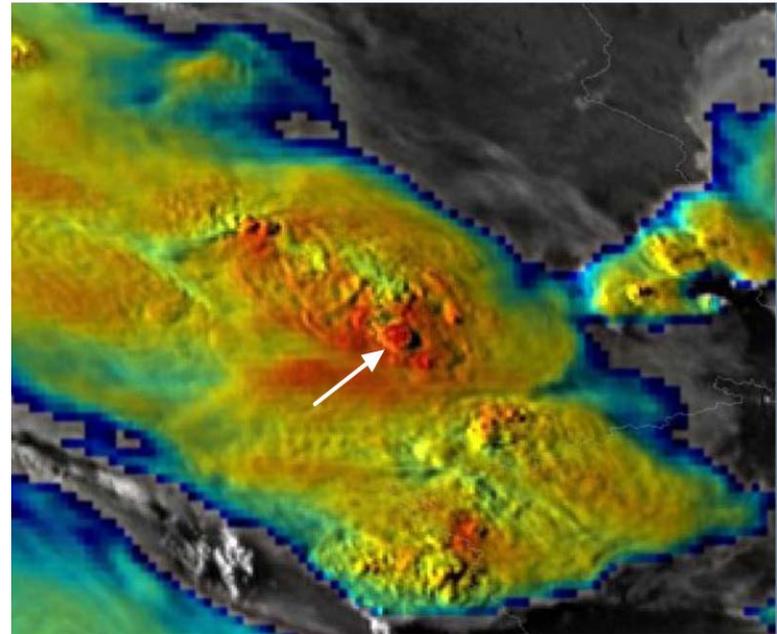


# Спутниковые сигнатуры

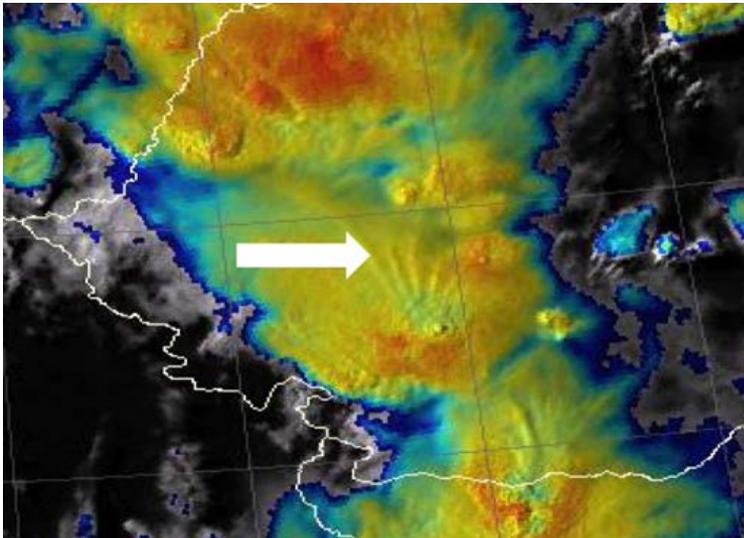
Gullwing cirrus (GC)



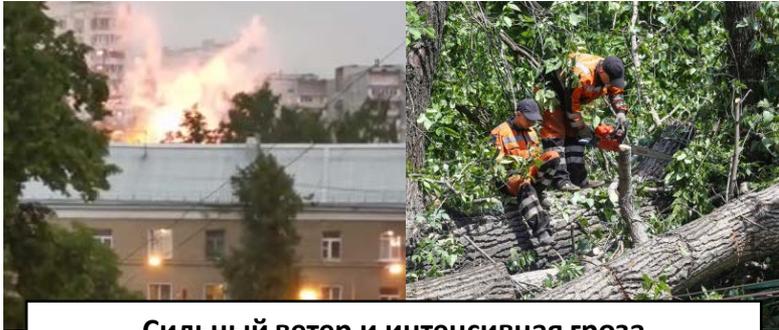
Puncake Clouds (PC)



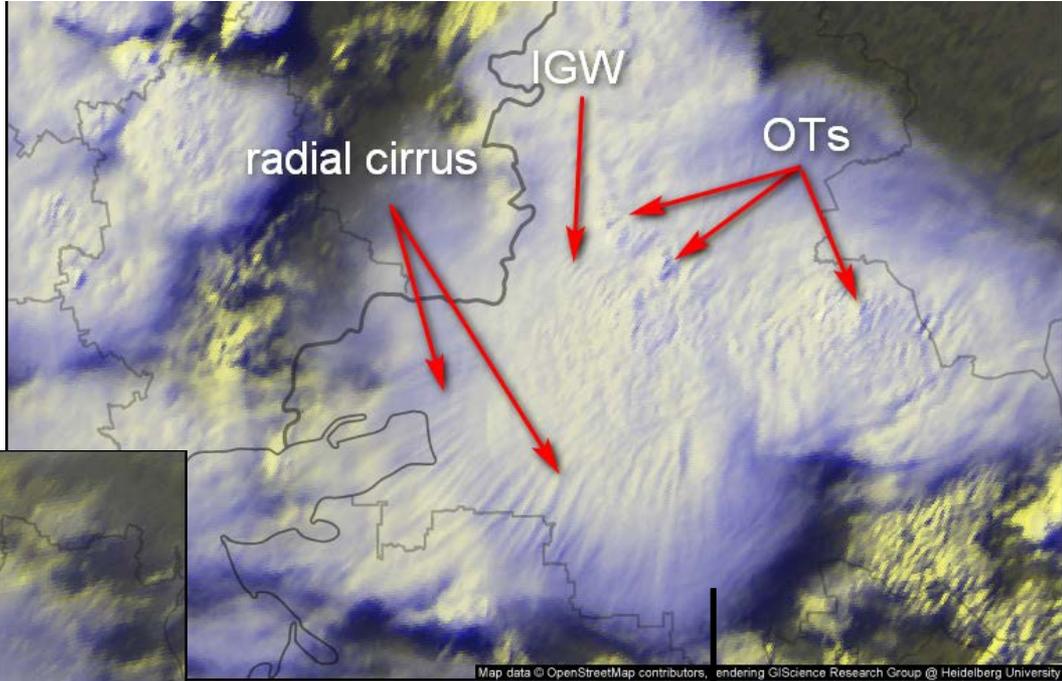
Radial Cirrus (RC)



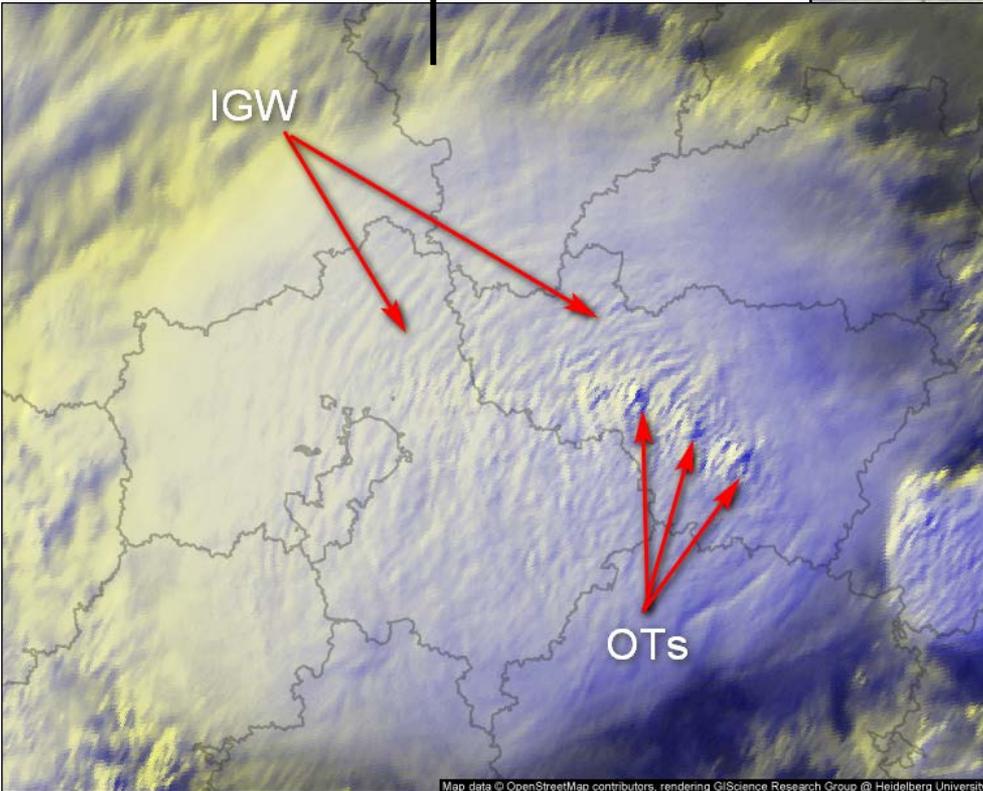
# Спутниковые сигнатуры



Сильный ветер и интенсивная гроза  
14.07.2020 г. Московская и Владимирская обл.



Map data © OpenStreetMap contributors, rendering GIScience Research Group @ Heidelberg University



Map data © OpenStreetMap contributors, rendering GIScience Research Group @ Heidelberg University

HD

Sun 14-06-2020, 14:55 UTC

Крупный град 14.06.2020 г.  
Ростовская область



Satellite HD

Tue 14-07-2020, 16:20 UTC

# Спутниковые сигнатуры

Суперячейка 04.07.2024 г.

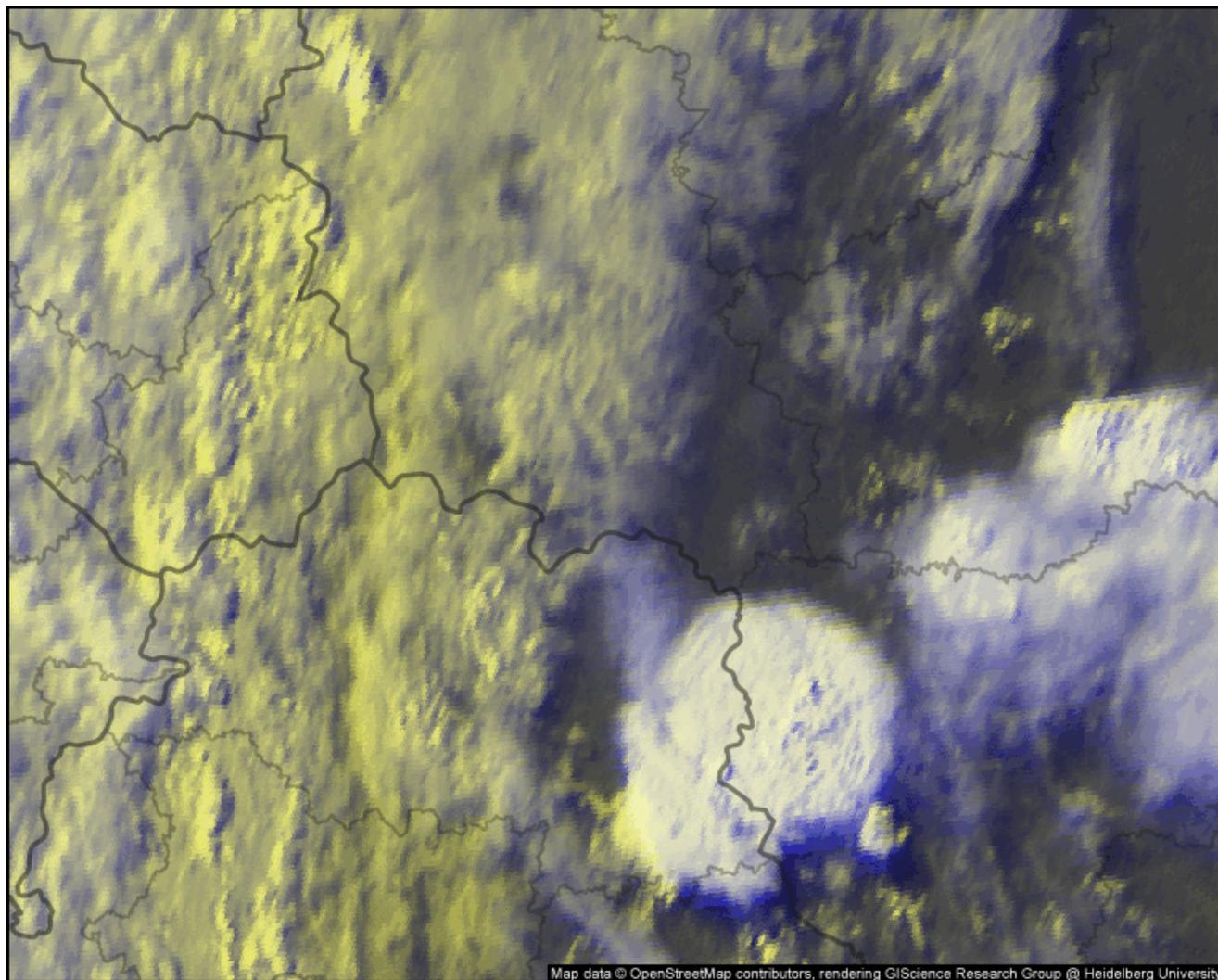
Брянская обл.

Смоленская обл.

Псковская обл.

Новгородская обл.

Тверская обл.



**Satellit HD**

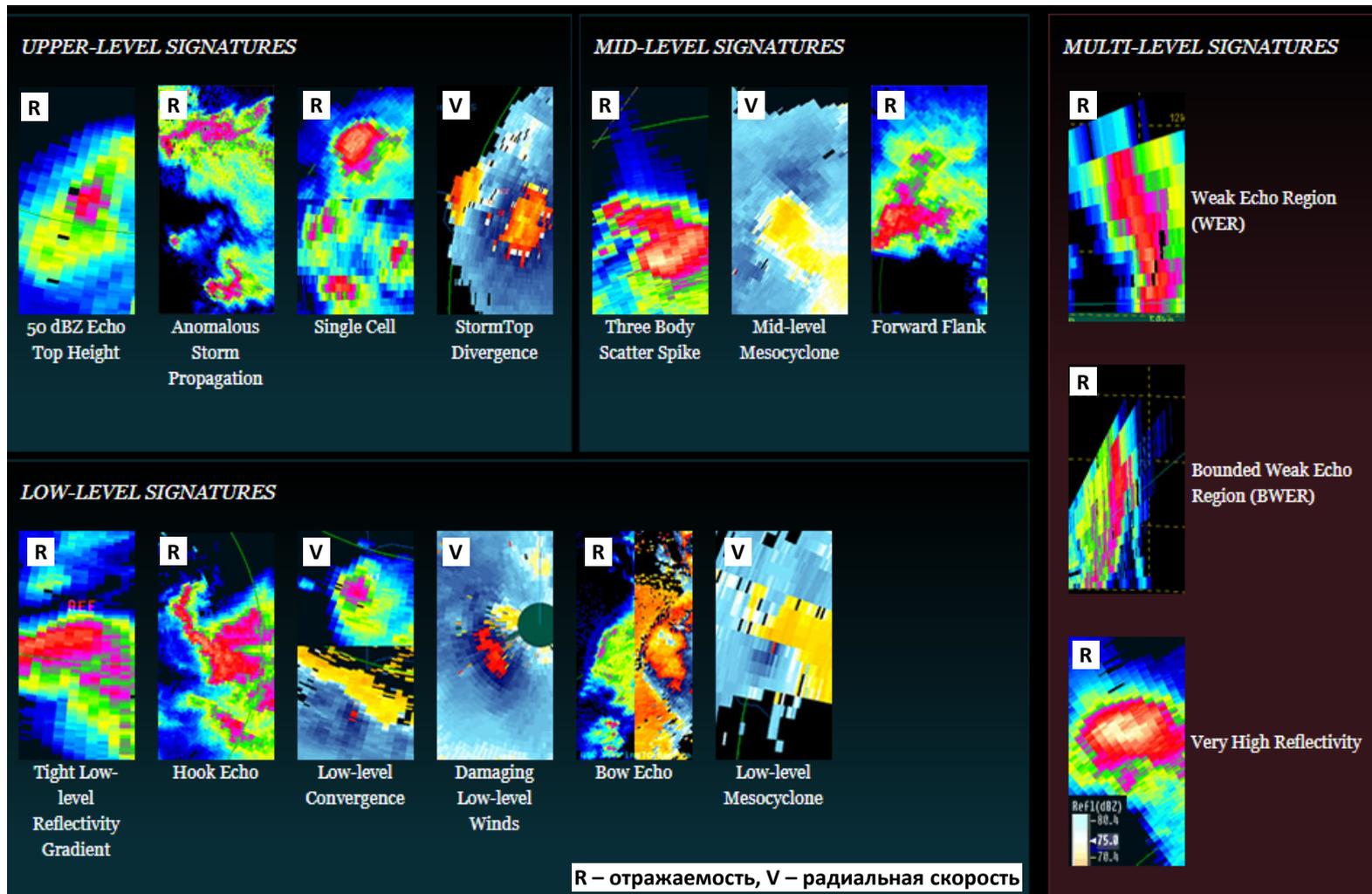
Do. 04.07.2024, 17:35 Uhr MESZ

© Kachelmann GmbH - Download nur für den privaten Gebrauch!  
Bitte benutzen Sie zum Teilen die Share-Buttons oben rechts

Rasterkarte 30 E, 56 N (Zoomstufe 3 / Auflösung 750m)

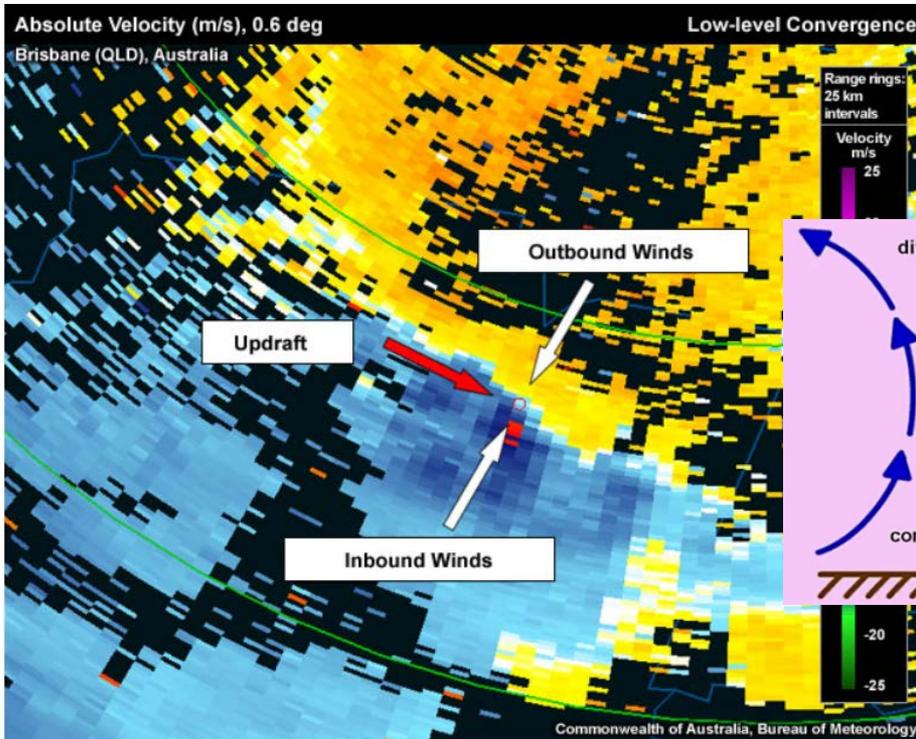
# Радарные сигнатуры

- Сложная организация воздушных потоков в системах глубокой конвекции обуславливает особое распределение гидрометеоров как в пространстве, так и во времени. Как следствие на изображениях горизонтальной отражаемости (R) и радиальной скорости (V), по которым можно судить соответственно о размерах и о характере перемещения гидрометеоров, на том или ином уровне или в слое могут проявляться различные визуальные шаблоны.

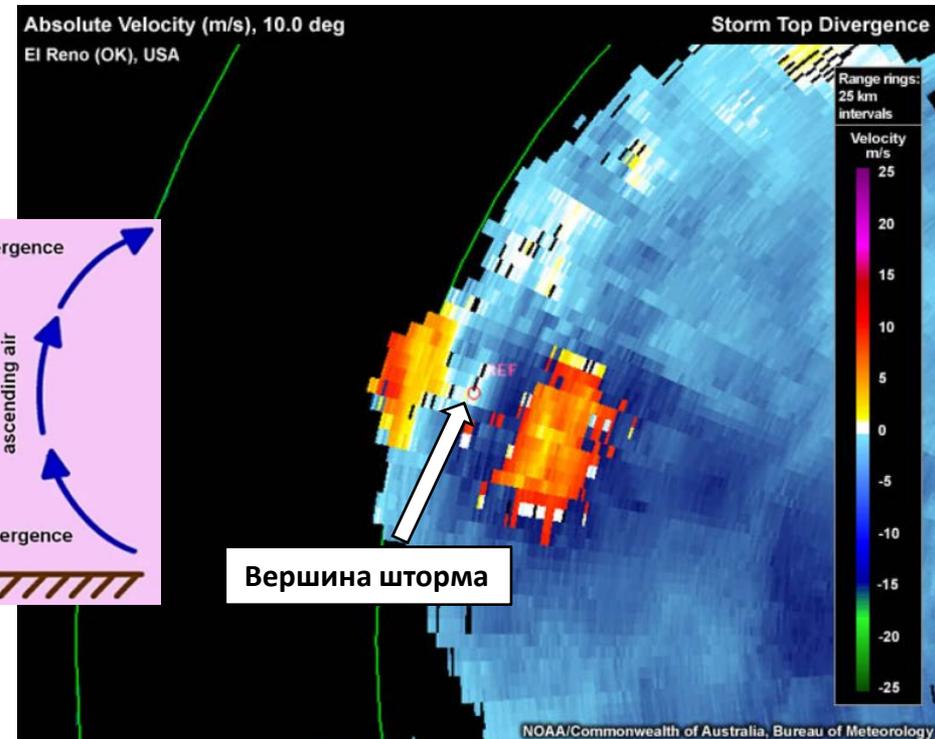


# Радарные сигнатуры (*Low-Level Convergence + Storm Top Divergence*)

*Конвергенция воздуха в приземном слое*

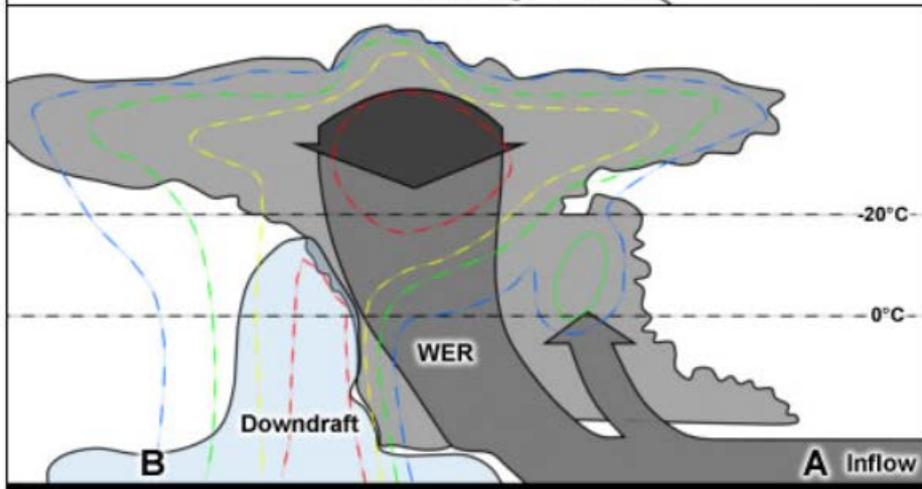
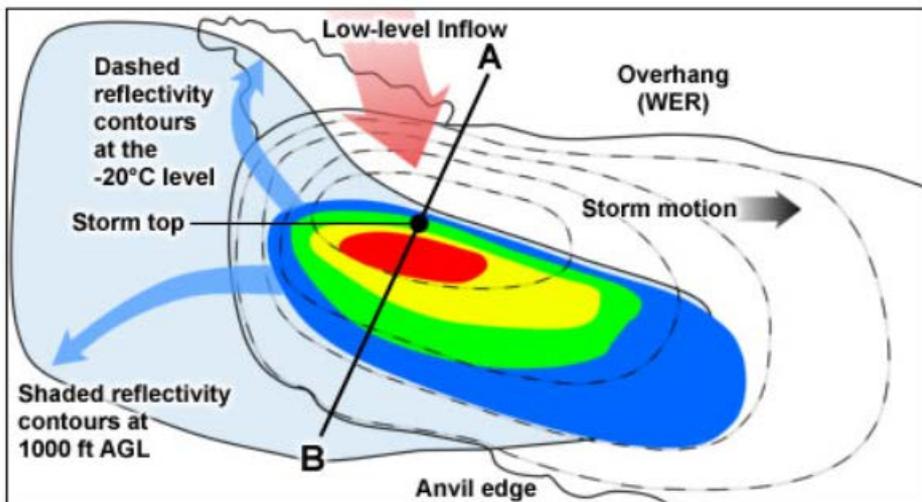


*Дивергенция воздуха вблизи вершины шторма*

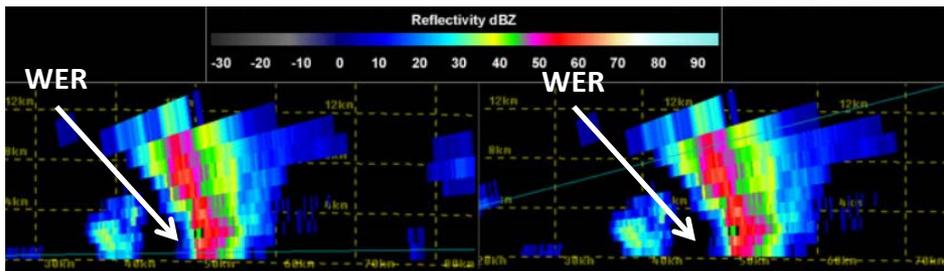


Поле скорости может быть несимметрично. Интенсивность дивергенции коррелирует с интенсивностью восходящего потока.

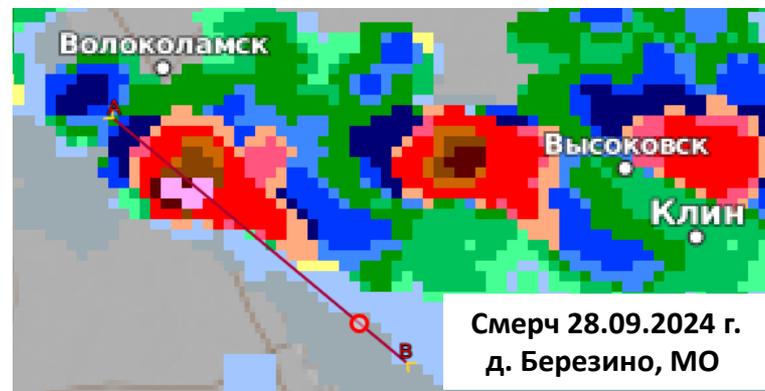
# Радарные сигнатуры (*Weak Echo Region*)



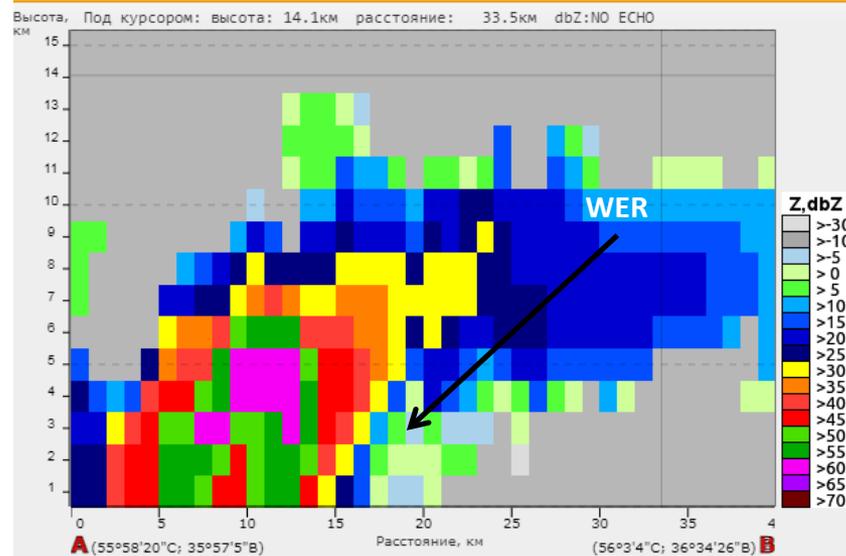
NOAA / The COMET Program



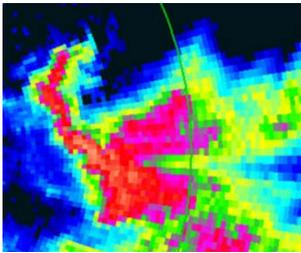
**WER** – наклонная область радиоэха с резкими границами высоких и низких значений отражаемости в некотором слое. Присуща структурам с мощным восходящим потоком. Наклон в сторону притока воздуха.



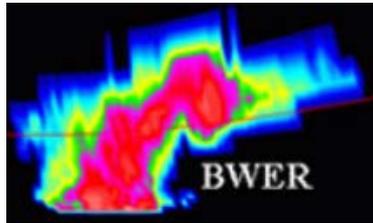
## Вертикальное сечение р/л отражаемости Z



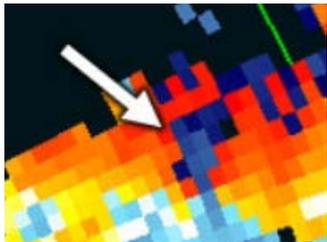
# Радарные сигнатуры (суперячейки)



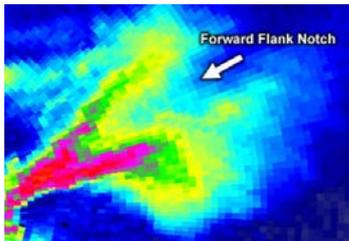
**Hook Echo** – крючкообразный изгиб радиоэха в нижнем слое. Формируется за счет выпадения осадков в зоне огибающей область восходящего потока.



**Bounded Weak Echo Region (BWER)** – область низких значений отражаемости, окруженная в некотором слое со всех сторон областью более высоких значений. Связана с мезоциклоном.



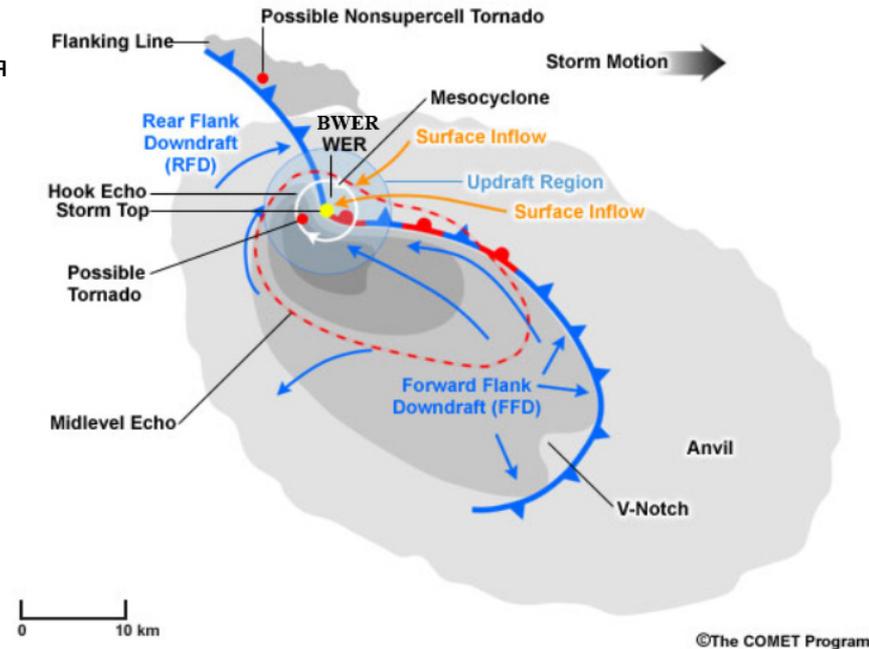
**Low-level and Midlevel Mesocyclone** – область вращения (2-10 км), представленная зонами с различными по знаку значениями радиальной скорости.



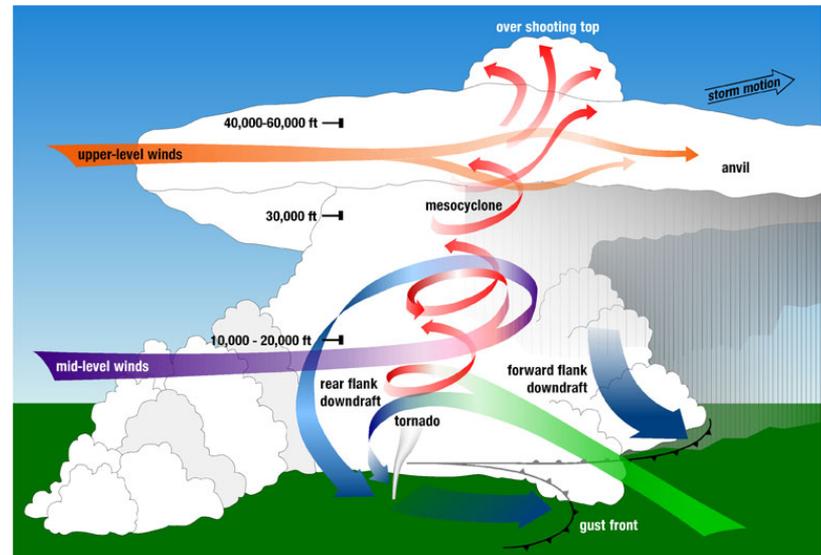
**Forward Flank Notch** – V-образная форма радиоэха на среднем уровне, возникающая в связи с тем, что набегающие ветра верхних уровней могут огибать область мощного восходящего потока.

**Anomalous Storm Propagation** – суперячейка перемещается в направлении, отличном от направления ведущего потока.

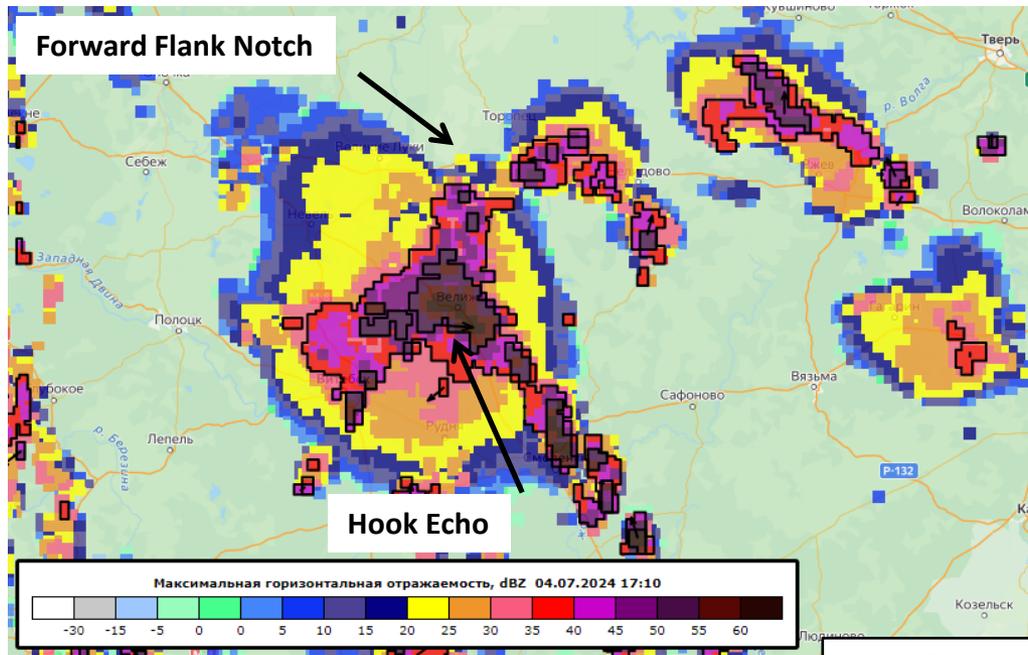
**Single Cell** – доминирующая ячейка на вершине шторма, связанная с устойчивым долгоживущим восходящим потоком суперячейки.



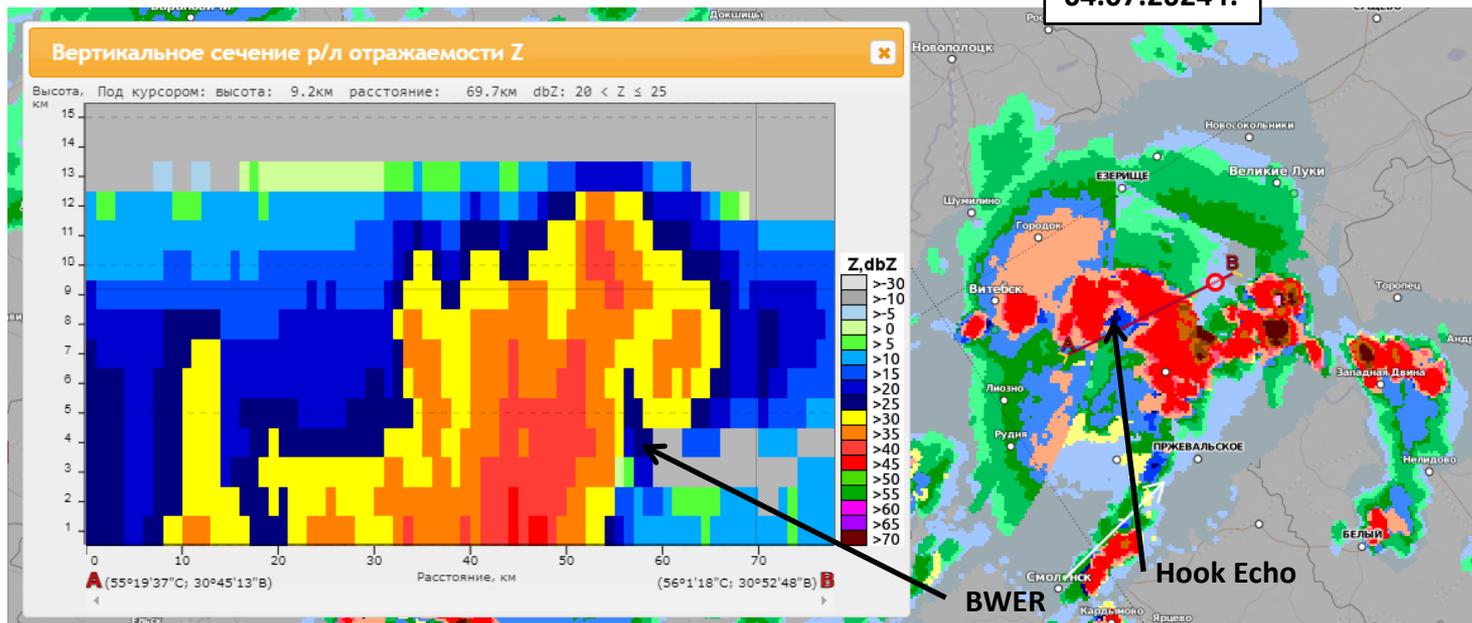
©The COMET Program



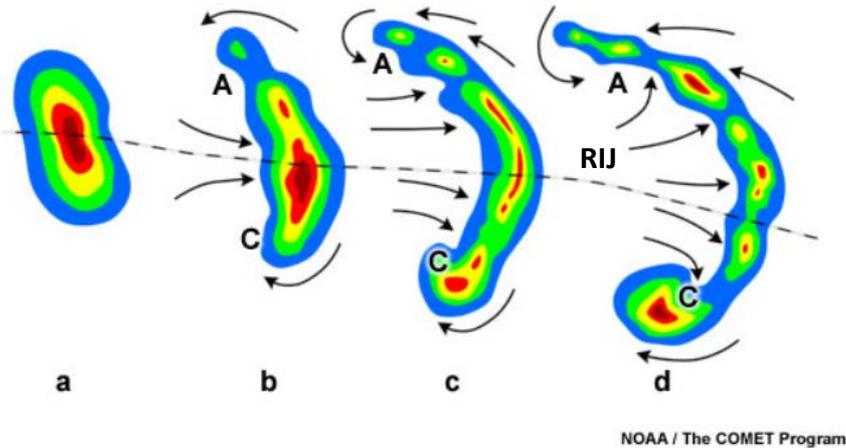
# Радарные сигнатуры (суперячейки)



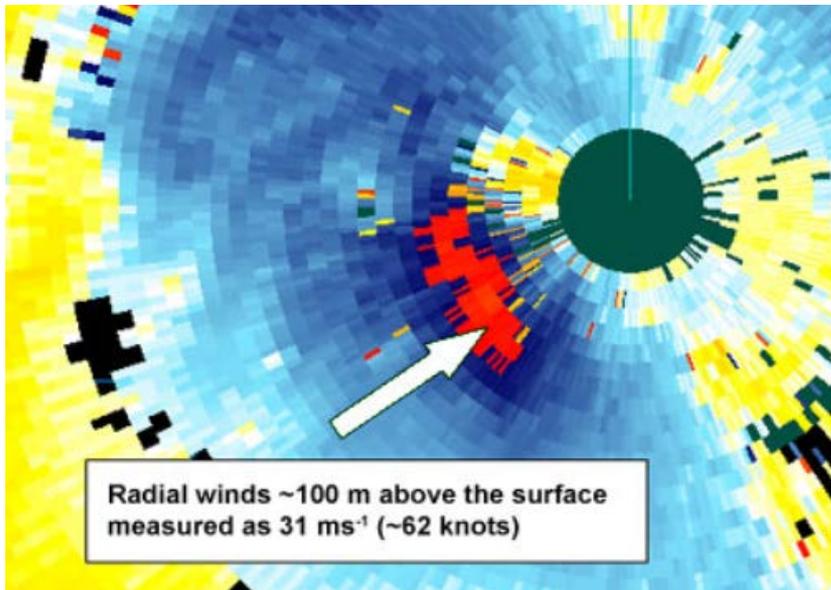
04.07.2024 г.



## Радарные сигнатуры (МКС)

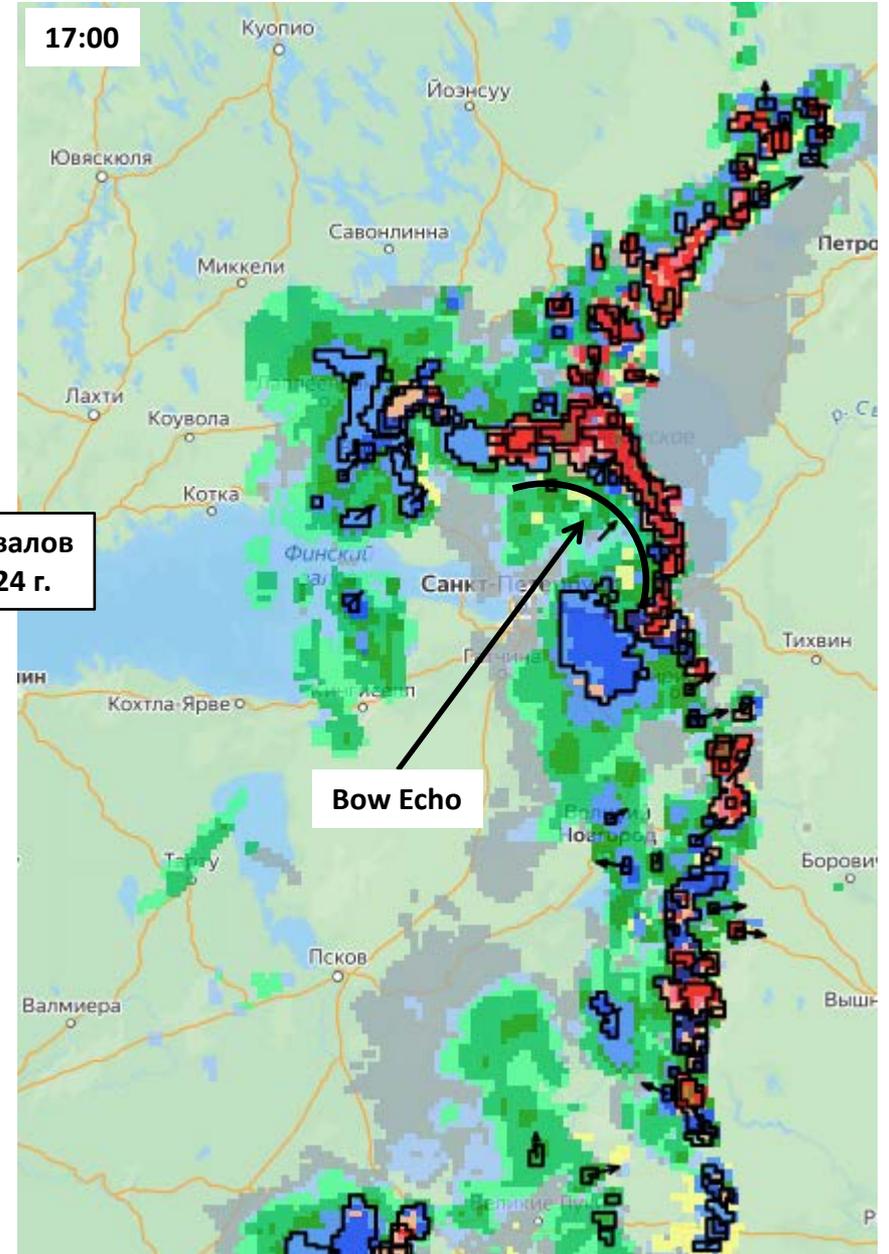
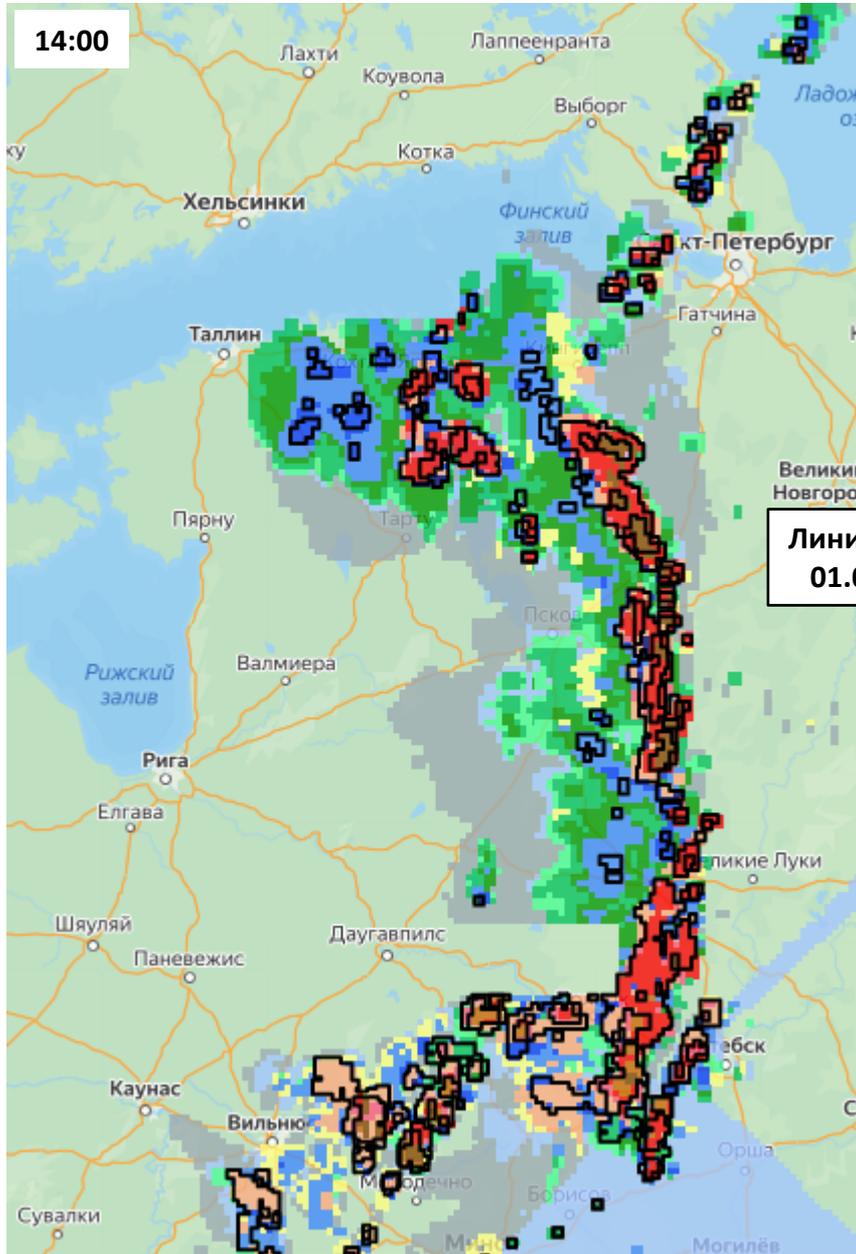


**Bow Echo** – дугообразный изгиб радиоэха, сигнатура присуща квазилинейным конвективным системам большого масштаба (мезо- $\alpha$ ) с наличием выраженного сдвига ветра и тылового нисходящего потока, дающего сильные приземные ветра и в то же время способствующего подпитке системы (Rear Inflow Jet (RIJ)). RIJ формируется при опускании воздуха из наковальни вдоль границы холодного бассейна, при этом вследствие наличия градиента давления при движении к поверхности земли поток ускоряется. По краям долгоживущего Bow Echo из-за влияния силы Кориолиса могут формироваться мезовихри (A и C).



**Сильные приземные ветра** – идентифицируемые на изображениях радиальной скорости, области локальных максимумов, явно указывающие на наличие интенсивного нисходящего потока, как правило связанного с формированием и развитием мезомасштабной конвективной системы или суперячейки.

# Радарные сигнатуры (МКС)



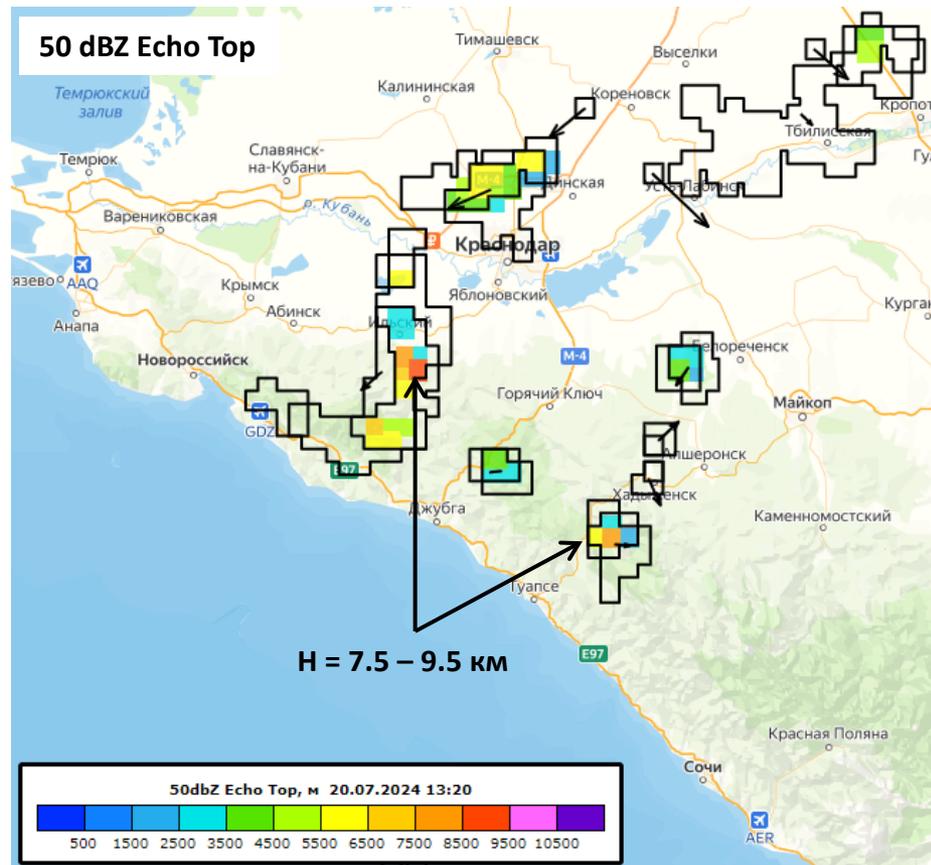
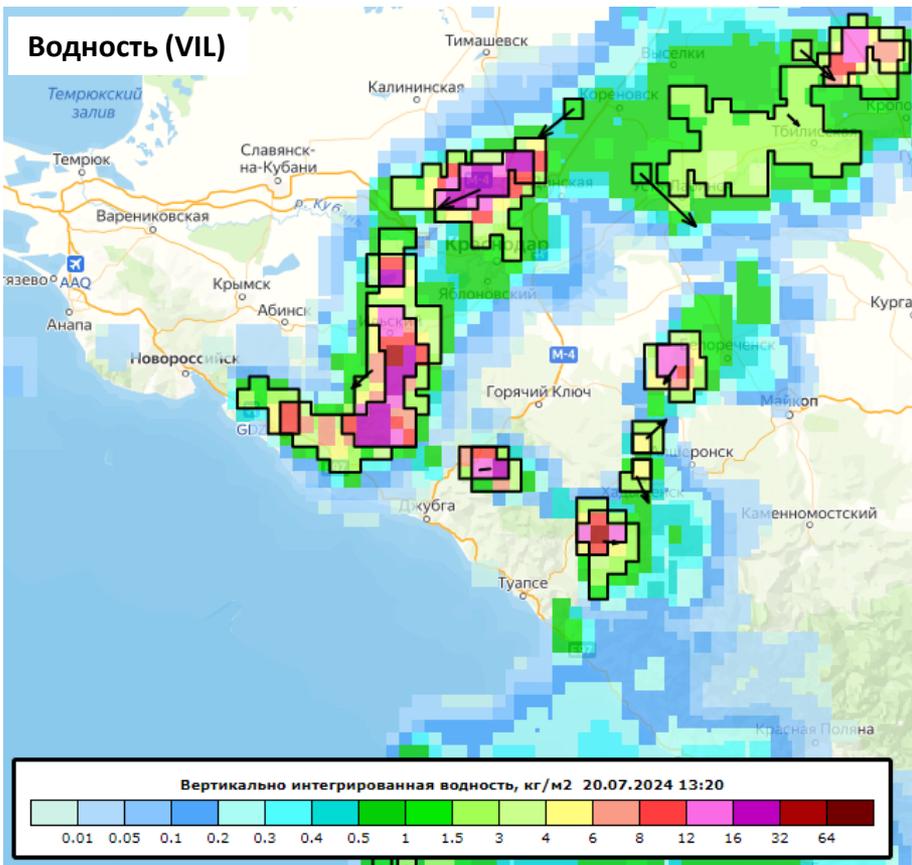
Линия шквалов  
01.07.2024 г.

Bow Echo



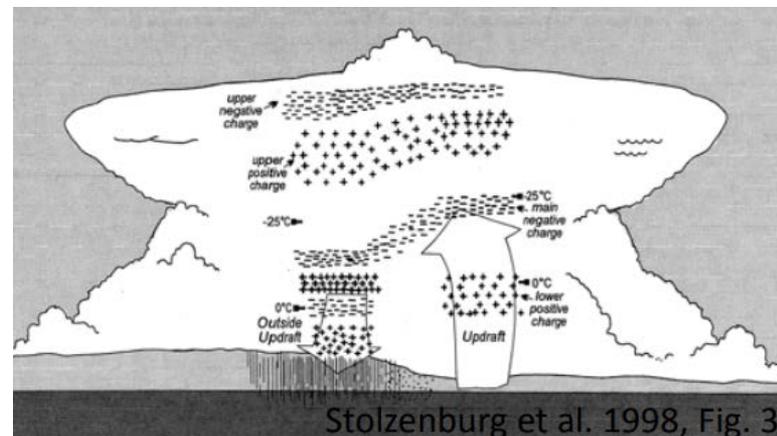
# Радарные сигнатуры (градовые шторма)

20.07.2024 г.

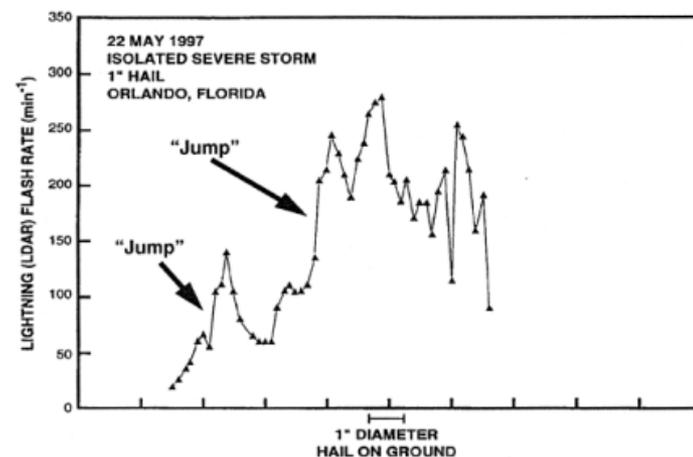


## Сигнатуры молниевой активности

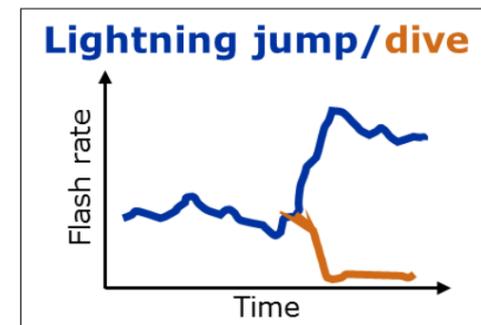
- Как известно, электризация в облаках обуславливается процессами взаимодействия гидрометеоров между собой (трением) и их спонтанным разрушением. При опускании более тяжелых частиц (крупинки и града) они уносят с собой вниз отрицательный заряд, более легкие положительно заряженные кристаллы остаются наверху. Происходит спонтанная поляризация облака. За счет сложного фазового состава частиц в облаке в его толще могут формироваться сразу несколько областей накопления различных по знаку зарядов.



- По результатам многих исследований установлена связь между интенсивностью восходящих потоков и частотой регистрации грозных разрядов в облаке. Усиление потока приводит к увеличению массы переносимых им частиц воздуха, которые при подъеме охлаждаются и превращаются в крупинки, формируются условия для скопления в облаке все большего объема заряженных частиц, что в конечном итоге приводит к более частому их разряду. Резки скачки числа разрядов в сторону увеличения получили название Lightning Jump (LJ). Они могут отмечаться за несколько десятков минут до появления опасных явлений.



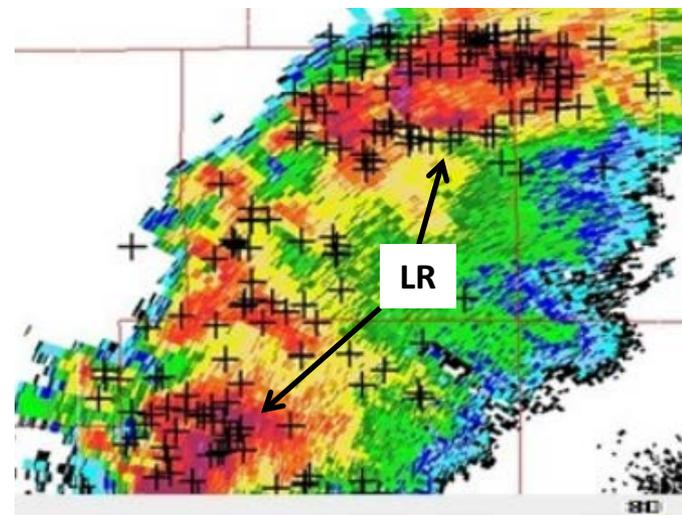
- Не так давно в ряде работ появились упоминания и о еще одной сигнатуре Lightning Dive (LD) – резком понижении частоты грозных разрядов. Ее связывают с усилением нисходящего потока в формирующемся суперячейковом облаке. Данная сигнатура может предшествовать формированию мезоциклонного смерча.



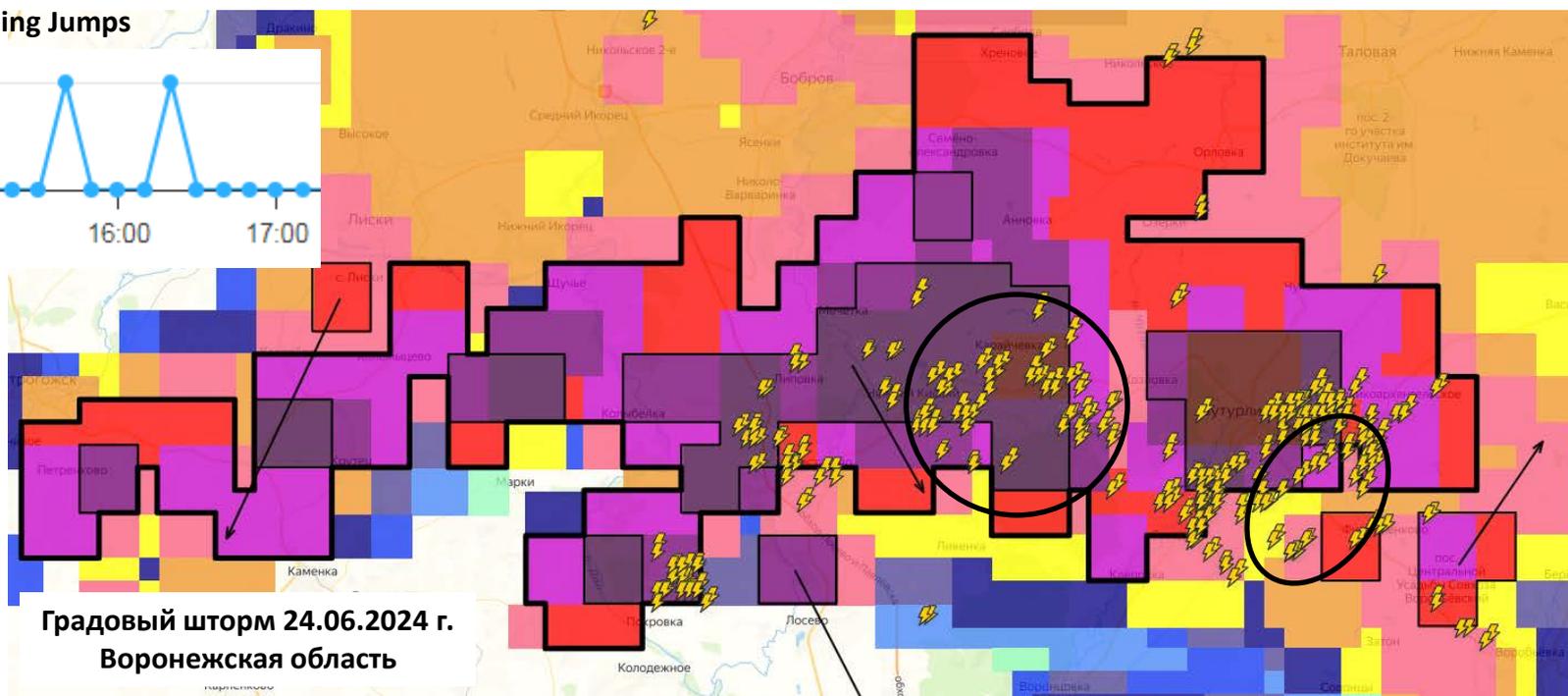
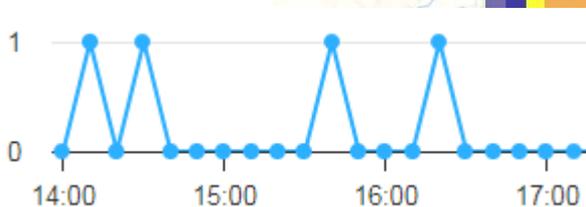
# Сигнатуры молниевой активности

## Малоизученные сигнатуры:

- изменение полярности разрядов земля-облако за несколько десятков минут до шторма – гипотетически связано с изменением соотношения крупных частиц (крупинок) и более мелких кристаллов в облаке, вследствие чего генерируется разряд той или иной полярности
- формирование специфических форм на картах плотности грозовых разрядов (Lightning Rings (LR) -грозовые кольца) – гипотетически связано с выносом крупных гидрометеоров в сторону от области восходящего потока



## Lightning Jumps



Градовый шторм 24.06.2024 г.  
Воронежская область

Град 13-16 ч



## Заключение

---

- Рассмотрена специфика формирования трех основных типов систем, связанных с интенсивной конвекцией: мультячейковые шторма, суперячейки, мезомасштабные конвективные системы. Важно отметить, что данное разделение является условным, поскольку в процессе эволюции систем они могут перерождаться из одного типа в другой, кроме того некоторые конвективные шторма на начальной стадии своего развития могут обладать свойствами систем различных типов.
- Подготовлен обзор известных диагностических признаков мощной конвекции по данным дистанционных наблюдений (спутниковых, радарных, грозопеленгационных). Приведены примеры 10 спутниковых сигнатур, 16 радарных сигнатур, 4 сигнатур молниевой активности. Для некоторых сигнатур были найдены примеры их проявления на Европейской территории России по данным сети наблюдений Росгидромета. Важно подчеркнуть, что возможность идентификации большинства сигнатур определяется пространственно-временным разрешением исходных данных. Чем оно выше, тем более явно будет видна сигнатура.
- План дальнейшей работы:
  - ✓ Анализ отдельных случаев мощных конвективных систем (включая случаи слияния систем различных типов) и связанных с ними опасных конвективных явлений на базе всего комплекса доступных данных дистанционных наблюдений (Электро-Л, ДМРЛ-С, ГПС ВГИ, ГПС Планета, ГПС Алвес, ВММ-310 НПО Тайфун).
  - ✓ Оценка предсказуемости опасных конвективных явлений на базе сигнатур интенсивной конвекции (заблаговременности их проявлений по отношению к моментам регистрации опасных явлений). Анализ жизненного цикла конвективных штормов, уточнение их классификации для разных регионов России, в том числе оценка различий в условиях их возникновения.
- Работа выполняется в рамках проекта Российского научного фонда (№ 24-17-00357).



**Спасибо за внимание**