

Модельное исследование конвективных эпизодов над Европейской территорией России (2019–2021 гг.) с использованием WRF-ARW

**Губенко И.М.
img0504@Yandex.ru**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский
университет транспорта», доц., к.ф.-м.н.**

Цель работы

Цель работы - оценить значение механизма вторичного ледообразования Халлета-Моссопа для формирования электрической активности и осадков в кучево-дождевых облаках над Европейской территорией России с использованием модели WRF-ARW и модели электризации, обогащённой модулем электризации.

Задачи исследования:

ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЙ ЭТАП:

1. Сконфигурировать разработанную ранее модель конвективных облаков с учетом механизма Халлета–Моссопа на базе WRF-ARW, включая расширение микрофизического блока и параметризации электризации.
2. Собрать и подготовить входные данные для расчётов, включая метеорологические поля для трех интенсивных грозовых эпизодов на территории Центрального, Южного и Приволжского федеральных округов в 2019–2021 гг.
3. Провести численное моделирование развития конвективных ячеек с двумя конфигурациями:
 - ✓ с учётом вторичного ледообразования (HM-on)
 - ✓ без учёта механизма (HM-off)

ДЛЯ АНАЛИЗА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ.

1. Сравнить результаты моделирования с данными наблюдений, включая:
 - ✓ Сети грозопеленгации - ГГО, ВГИ, WWLLN и TLN
 - ✓ Синоптические данные о ливневых осадках
2. Оценить вклад механизма Халлета–Моссопа в:
 - ✓ генерацию ледяных частиц и осадков
 - ✓ интенсификацию молниевой активности
 - ✓ точность прогноза локальных экстремальных явлений
3. Сформулировать выводы о роли вторичного ледообразования для прогноза опасных конвективных явлений и необходимости учёта этого эффекта в оперативных моделях высокого разрешения.

География исследуемых явлений конвекции

№	Дата	Территория (ФО)	Краткое описание
1	27 июня 2019	Центральный ФО (Воронежская, Орловская, Курская, Брянская, Смоленская и Калужская обл.)	Локальные, но мощные ячейки, с суточной макс. молниевой активностью до ~30 разрядов/минуту
2	29 мая 2021	Южный ФО (Краснодарский край)	Обширная мультиячеистая структура, в том числе очаг у г. Краснодар с градом
3	18 июня 2019	Приволжский ФО (Татарстан, Нижегородская обл.)	Сильная одиночная суперячейка с преимущественно дождевыми осадками

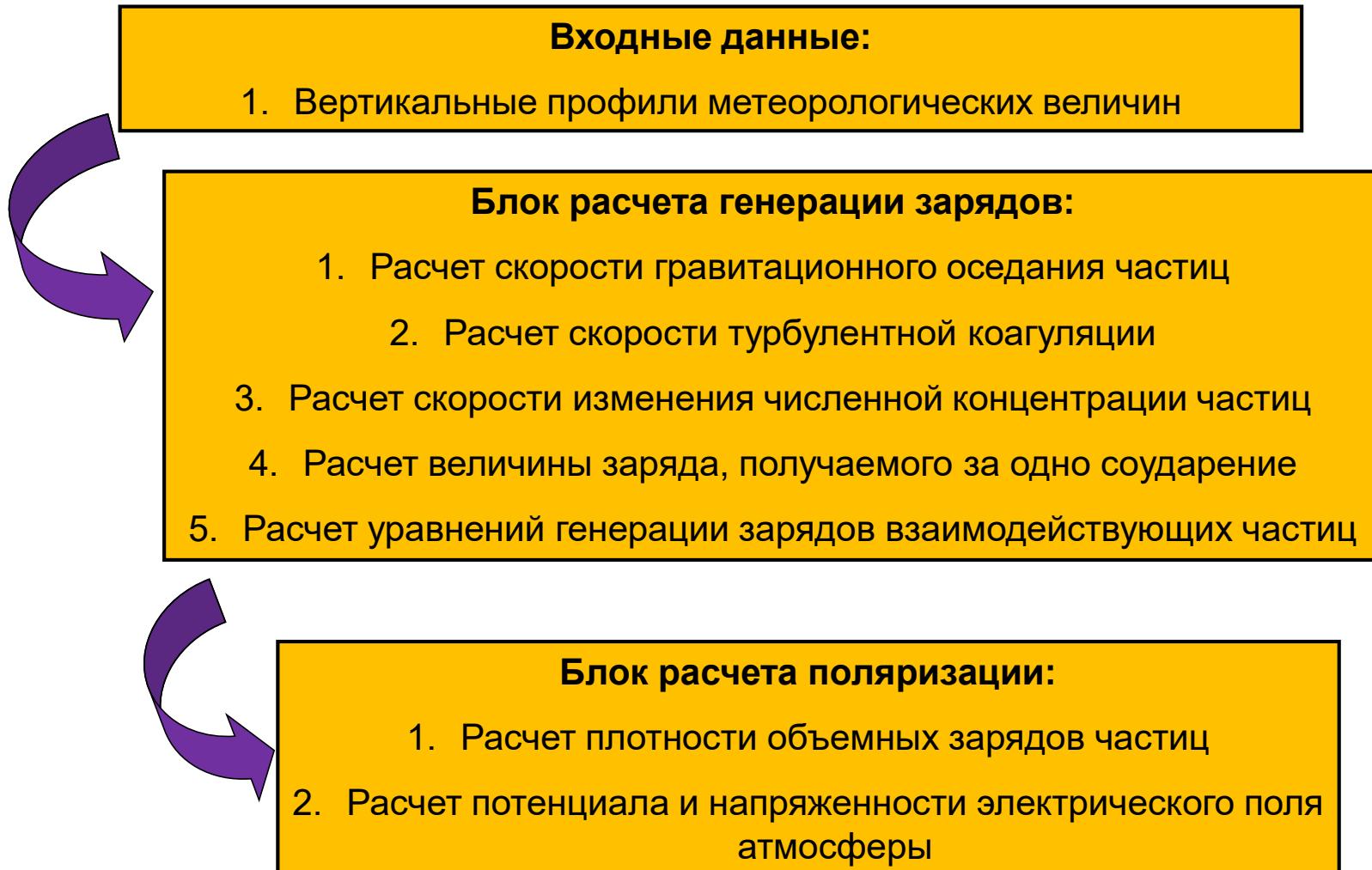
Методы и материалы

Область исследования - Центральный, Южный и Приволжский федеральные округа РФ (по данным сетей грозопеленгации WWLLN, ВГИ, ГГО и синоптики для осадков за конвективные сезоны 2019-2021 гг.).

Использовалась модель **WRF-ARW** с 6 км горизонтальным шагом с начальными данными GFS в 0,25 градусной сетке. Используемые параметризации:

- Конвекции - Kain–Fritsch.
- Микрофизика облаков – Thompson Scheme.
- Радиация - RRTMG Shortwave and Longwave Schemes.
- Процессы в почве – Unified Noah Land Surface Model.

Модель электризации кучево-дождевых облаков для прогноза грозовой активности (1)



Модель электризации кучево-дождевых облаков для прогноза грозовой активности (2)

Уравнения поляризации

1) Напряженность эл. поля: 2) Потенциал эл. поля:

$$E = -\frac{\partial \phi}{\partial z}$$

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho_t}{\epsilon_0}$$

E_{кр}=220 кВ/м [Mansel E. R., MacGorman D.R. ,etc., 2005]

3) Плотность объемного заряда для каждого типа частиц :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + v \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} + S$$

Где w – относительная скорость частицы, м/с; v - коэффициент турбулентной диффузии, м²/с; S – генерация объемного заряда

Модель электризации кучево-дождевых облаков для прогноза грозовой активности (3)

Уравнения генерации зарядов

1. Неиндуктивное заряжение частиц, возникающее при столкновении ледяной крупы с кристаллами снега и частицами льда с ледяной крупой.

$$S = \beta \times \delta q_{1,2} \times (1 - E_{1,2}) \times {E_{1,2}}^{-1} \times |V_1 - V_2| \times n_{1,2}$$

где S-генерация зарядов двух взаимодействующих частиц x и у, Кл·м·3·с-1; β – функция от температуры; δq - заряд, получаемый частицами за одно соударение, Кл; E_{1,2}-коэффициент соударения частиц; V_{1,2}– скорость гравитационного оседания гидрометеоров, м/с; n_{1,2}- скорость изменения численной концентрации гидрометеоров вследствие собирания заряда, кг·м·с-1

Модель электризации кучево-дождевых облаков для прогноза грозовой активности (4)

Уравнения генерации зарядов

2. Индуктивное заряжение частиц – заряжение гидрометеоров под действием электрического поля атмосферы.

А) при взаимодействии ледяной крупы и облачных капель [Довгалюк, 2013]:

$$S = \left[\frac{\pi}{4} E_{1,2} (1 - E_{1,2}) D_1^2 V_1 n_2^{0.022} \right] \cdot \left[\left(\frac{\pi^3}{2} \right) D_2^2 E_z \cos \theta - Q \cdot \left(\frac{\pi^2}{6} \right) \cdot \left(\frac{D_1^2}{D_2^2} \right) \right]$$

где $\cos = 0.84$ – среднее значение косинуса угла, определяющего местоположение облачной капли относительно частицы ледяной крупы; Q - плотность объемного заряда ледяной крупы, Кл/м3; E_z - начальное значение напряженности электрического поля, В/м

Расчет начального значения напряженности электрического поля [Шишкин Н.С., 1964]:

$$E_z = 201 \cdot 7 \cdot \exp(-0.12 z)$$

Где z – высота, м.

Модель электризации кучево-дождевых облаков для прогноза грозовой активности (5)

Уравнения генерации зарядов

Б) при взаимодействии дождевых и облачных капель [Довгалюк, 2013] :

$$S = n_1 n_2 |V_1 - V_2| \frac{\pi}{4} (D_1 + D_2)^2 E_{1,2} (1 - E_{1,2}) \times \left[-\gamma_1 D_1^2 \cos \theta \cdot E_z + \frac{q_1 - \gamma_2 q_2 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2}{1 + \gamma_2 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2} \right]$$

где $\gamma_1 = 1,23$ и $\gamma_2 = 1,64$ – эмпирические коэффициенты, соответствующие размерам капель; $\cos \theta = 0,666$ – среднее значение косинуса угла, определяющего местоположение облачной капли относительно дождевой; $q_1,2$ – водность дождевых и облачных капель, г/кг.

В) при взаимодействии частиц льда и ледяной крупы [Довгалюк, 2013] :

$$S = n_1 n_2 |V_1 - V_2| \frac{\pi}{4} (D_1 + D_2)^2 E_{1,2} (1 - E_{1,2}) \delta q_{1,2}$$

3. Комплексный механизм заряжения частиц подразумевает совокупность индуктивного и неиндуктивного механизмов заряжения частиц.

Совершенствование модели электризации Сб. Добавление схемы электризации при обзернении

Известно, что намерзание переохлажденных облачных капель на градинах может сопровождаться выбросом вторичных ледяных кристаллов (механизм Халлета-Моссопа), являющихся носителем заряда. Тогда зарядение с учетом этих процессов можно описать как [Довгалюк и др., 2013]. :

$$S = \frac{P_{\text{обз}}}{Q_c} \times p_{slp} \times N_c \times \psi \times D^{2.4},$$

Где S – Заряд при обзернении, $P_{\text{обз}}$ – интенсивность обзернения, рассчитанная по формуле ниже, Q_c – влагосодержание облачных капель, p_{slp} – давление на уровне моря; N_c – концентрация облачных капель, ψ – эмпирический коэффициент, равный 0.9×10^{-5} Кл \times м-2.4 [Mossop, 1985], D – диаметр облачных капель.

$$P_{\text{обз}} = \frac{\pi}{4} \times Qc \times Ni \times E_{i,c} (1 - S_{i,c}) (Di + Dc)^2 |V_i - V_c|,$$

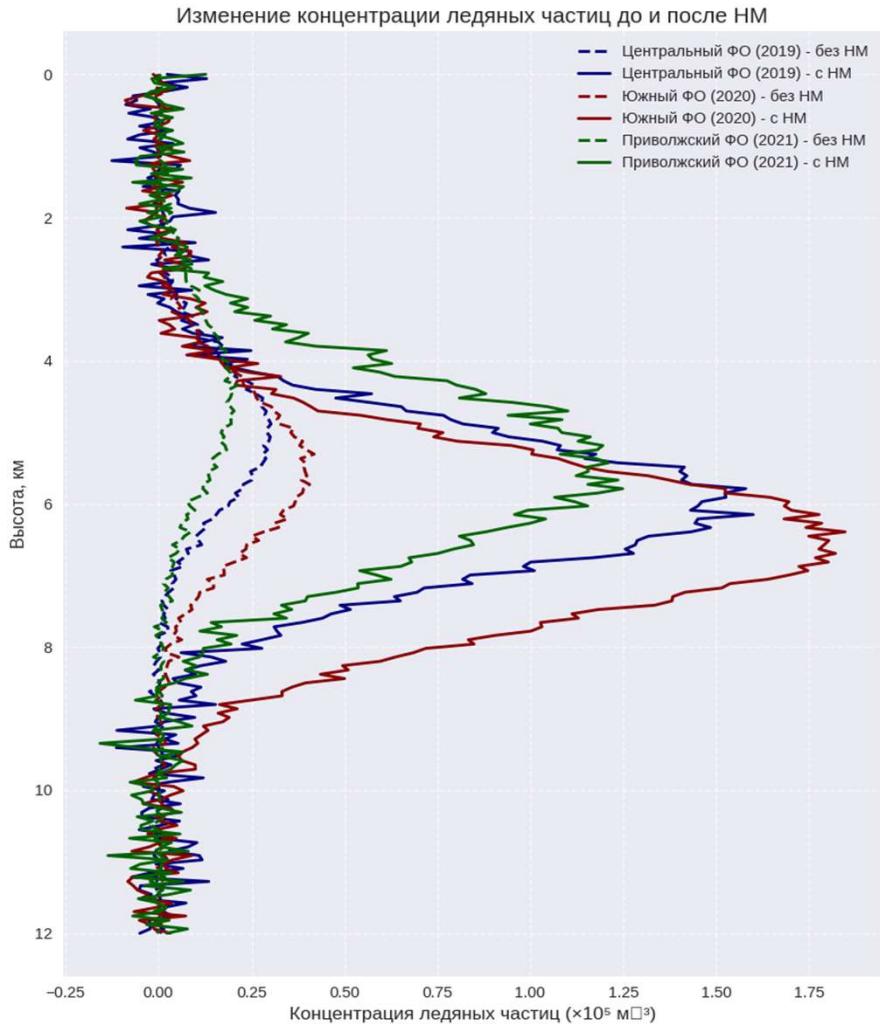
Где Ni – концентрация ледяных частиц, $E_{i,c}$; $S_{i,c}$ коэффициенты слияния и отскока частиц соответственно при взаимодействии облачных частиц и ледяных кристаллов [Довгалюк и др., 2013], V -скорости гравитационного оседания ледяных частиц и облачных капель. соответственно.

Предварительная оценка валидности использования модели электризации

- Для того ,чтобы понять можно ли использовать модель электризации для дальнейшего анализа, были рассчитаны прогнозы гроз и сравнены с данными наблюдений грозометрических сетей.
- В табл. приведены некоторые оценки по трем конвективным эпизодам для двух версий модели электризации.

Метрика	Без НМ (базовая схема)	С НМ (улучшенная схема)
<i>POD</i> (вероятность обнаружения молний)	0.66–0.82	0.86–0.90
<i>FAR</i> (коэффициент ложных тревог)	0.13–0.19	0.05–0.09
<i>ETS</i> (критерий Гилберта)	0.28–0.34	0.32–0.45

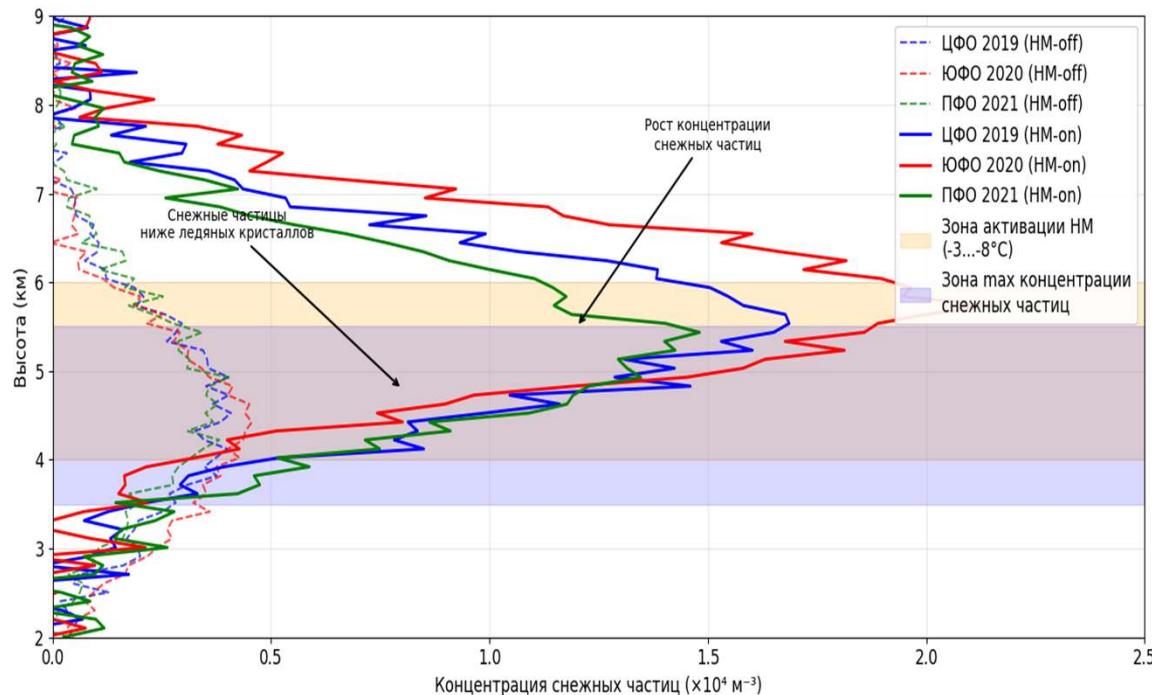
Изменение концентрации ледяных частиц



- График иллюстрирует вертикальные профили концентрации ледяных частиц ($\times 10^5 \text{ м}^{-3}$) для трёх эпизодов конвекции: Центральный ФО (2019, синий), Южный ФО (2020, красный), Приволжский ФО (2021, зелёный). Без НМ (пунктир), С НМ (сплошная): Резкий рост на 60–75% (пики $1.2\text{--}1.8 \times 10^5 \text{ м}^{-3}$ на 5.5–6.5 км), смещение вверх из-за апвеллингов.

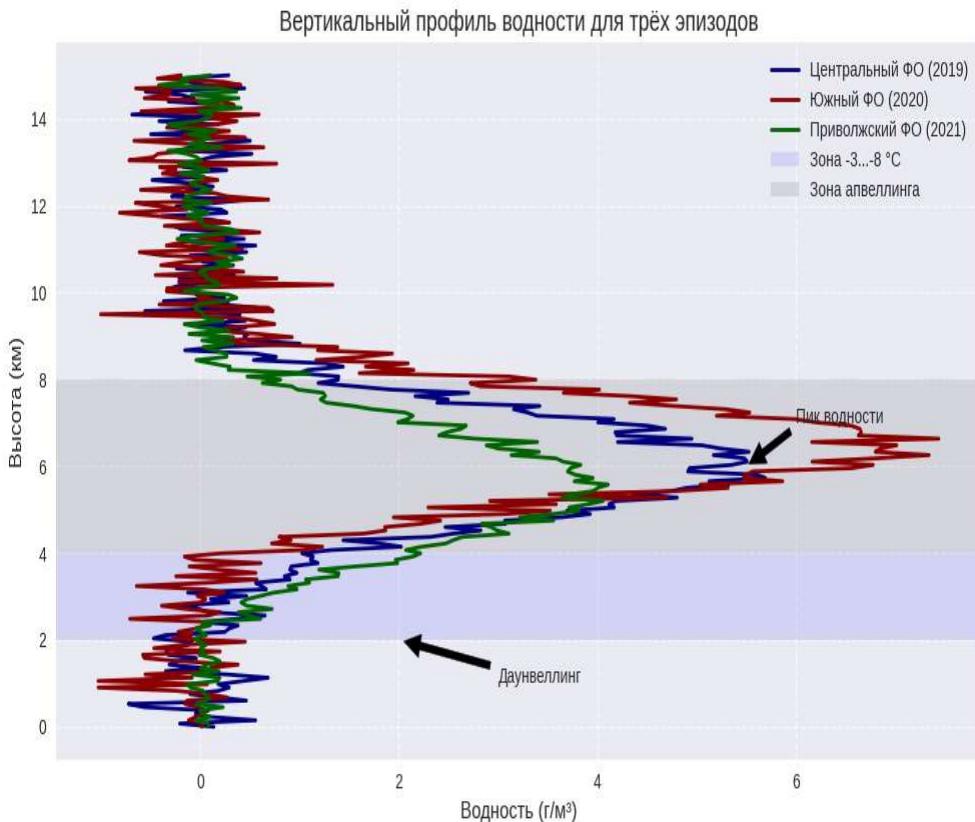
Изменение концентрации снежных частиц

Вертикальные профили концентрации снежных частиц
с учетом (HM-on) и без учета (HM-off) механизма Халлета-Моссопа



- Максимум концентрации снежных частиц расположен ниже, чем у ледяных кристаллов - преимущественно в диапазоне 3.5-5.5 км.
- При включении механизма Халлета-Моссопа также наблюдается рост концентрации снежных частиц, но он может быть менее выраженным, чем для ледяных кристаллов, поскольку снежные частицы формируются через процессы агрегации и акреции.
- Рост концентрации снежных частиц при HM-on объясняется увеличением количества "затравок" для роста снежинок - вторичные ледяные кристаллы, образующиеся по механизму Халлета-Моссопа, служат центрами кристаллизации для формирования более крупных снежных частиц.

Вертикальный профиль водности для трех эпизодов (1)

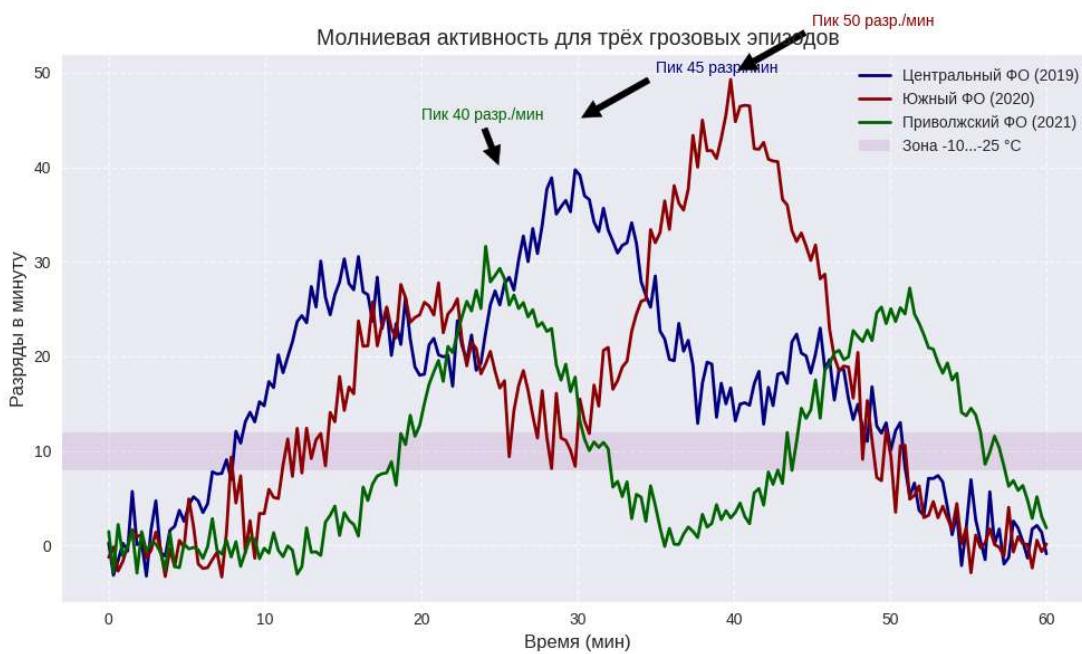


- График показывает вертикальные профили водности ($\text{г}/\text{м}^3$) для трёх эпизодов: Центральный ФО (2019, синий), Южный ФО (2020, красный), Приволжский ФО (2021, зелёный).
- Максимум водности в нижней/средней частях облака (5–7 км), с пиками 4–7 $\text{г}/\text{м}^3$. Южный ФО: самый высокий пик ($\sim 7 \text{ г}/\text{м}^3$), мощные апвеллинги, усиление осадков.
- Зоны: переохлаждение (2–4 км, штриховка) — рост льда; апвеллинг (4–8 км) — поддержка водности.
- Это подтверждает роль апвеллингов в эволюции облаков

Вертикальный профиль водности для трех эпизодов (2)

Центральный ФО (2019)	Южный ФО (2020)	Приволжский ФО (2021)
Водность: Пик около 5.5 г/м ³ на 6 км, указывающий на умеренную конвективную активность. Небольшие флюктуации отражают неоднородности в облаке.	Водность: Самый высокий пик — около 7 г/м ³ на 6.5 км, что указывает на мощные апвеллинги и высокую водность, связанную с экстремальными осадками (ливни, град).	Водность: Пик около 4 г/м ³ на 5.5 км, менее выраженный, что указывает на умеренный штурм с меньшей интенсивностью.
Связь с исследованием: Максимум водности в средней части облака (4–8 км) соответствует зонам апвеллинга, поддерживающим высокую концентрацию ледяных частиц.	Связь с исследованием: Высокая водность коррелирует с описанным низким давлением в ядре шторма, увеличивающим вертикальную протяженность облака и интенсивность электризации.	Связь с исследованием: Меньшая водность согласуется с менее мощными апвеллингами и умеренной концентрацией ледяных частиц, но зона переохлаждения всё ещё активна.

Молниевая активность для трех конвективных эпизодов (расчитано по модели электризации)

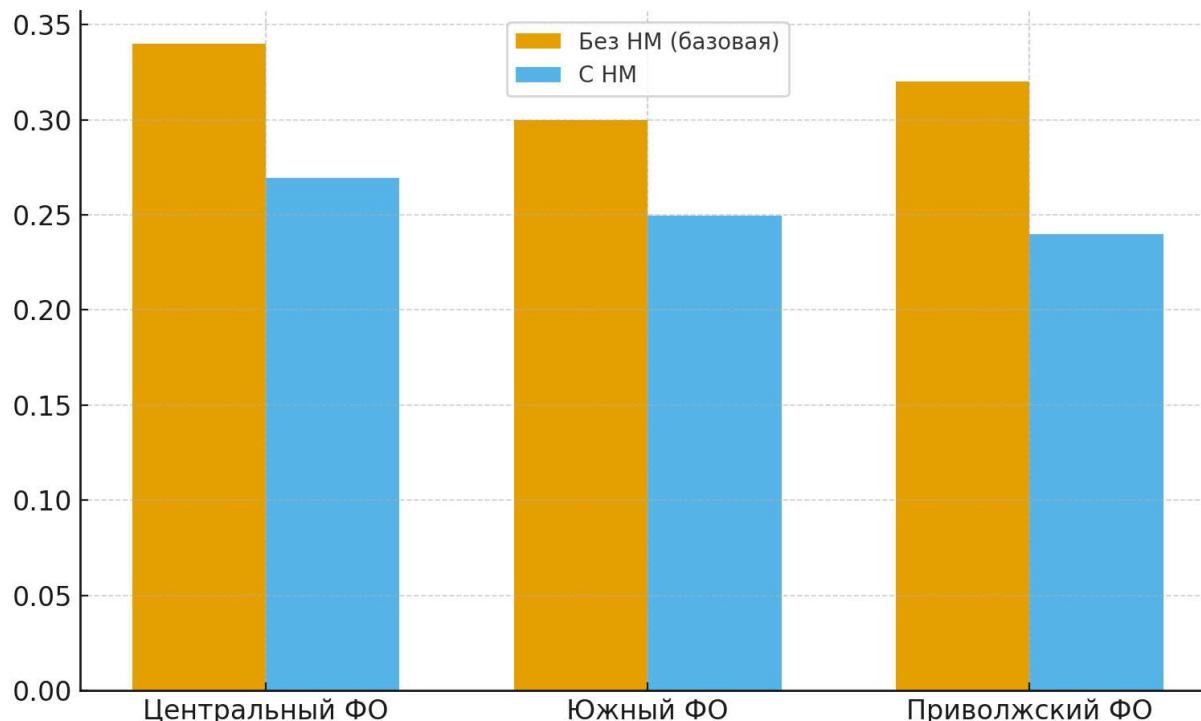


- График показывает количество разрядов в минуту (ось Y) во времени (0–60 минут, ось X) для трёх грозовых эпизодов: Центральный (2019), Южный (2020) и Приволжский (2021).
- Каждая кривая имеет уникальный профиль с несколькими пиками, отражающими всплески молниевой активности (до 40–50 разрядов/мин), связанные с вторичным ледообразованием по механизму Халлета-Моссопа.
- Зона температур $-10\ldots-25$ °C (примерно 8–12 км) выделена штриховкой, так как именно в этой зоне происходят большинство разрядов.

К вопросу о связи механизма Халлетта-Моссопа и осадков

- Активация механизма Халлетта-Моссопа в переохлажденной зоне приводит к резкому росту концентрации ледяных частиц (на 60–75%), усиливает апвеллинги и водность в средней части облака, а также связана с всплесками молниевой активности.
- Эти микрофизические изменения напрямую влияют на формирование осадков, включая ливни и град.

сравнение ошибки прогноза интенсивности ливневых осадков (RMSE) для двух версий модели электризации



- Включение механизма Халлета–Моссопа приводит к снижению ошибки в прогнозе интенсивности ливней на 17–25% в зависимости от региона.
- Это подтверждает значимый вклад вторичного ледообразования в формирование осадков и необходимость его учёта в моделях высокого разрешения.

Общие выводы

- Механизм Халлета-Моссопа критически важен для моделирования микрофизики конвективных облаков: активация в слое -3...-8 °C вызывает рост концентрации ледяных частиц на 60–75% (до 10^5 – 10^6 м⁻³), усиливая соударения, электризацию и формирование осадков.
- Установлена связь между зонами вторичного ледообразования, апвеллингами и всплесками молниевой активности (до 40–50 разрядов/мин в диапазоне -10...-25 °C), что подтверждает роль НМ в эволюции штормов.
- Внедрение НМ в WRF-ARW улучшает прогноз экстремальных явлений: RMSE интенсивности осадков снижается до ~25%, повышается точность локализации гроз для эпизодов над ЕТР (2019–2021 гг.).
- Исследование подчеркивает необходимость учета НМ в моделях высокого разрешения для надежного прогнозирования конвективных опасностей (грозы, ливни, град), способствуя оперативной метеорологии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
№ 24-77-00005, <https://rscf.ru/project/24-77-00005/>.