

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 мультячейчатая 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.).

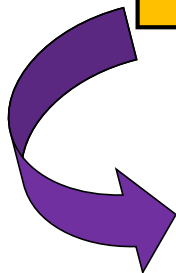
Использовалась модель **WRF-ARW** с 6 км горизонтальным шагом с начальными данными GFS в 0,25 градусной сетке. Используемые параметризации:

- 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)

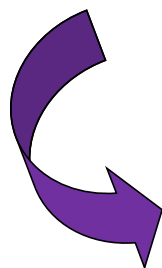
Входные данные:

1. Вертикальные профили метеорологических величин



Блок расчета генерации зарядов:

1. Расчет скорости гравитационного оседания частиц
2. Расчет скорости турбулентной коагуляции
3. Расчет скорости изменения численной концентрации частиц
4. Расчет величины заряда, получаемого за одно соударение
5. Расчет уравнений генерации зарядов взаимодействующих частиц



Блок расчета поляризации:

1. Расчет плотности объемных зарядов частиц
2. Расчет потенциала и напряженности электрического поля атмосферы

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

Уравнения поляризации

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

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

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho_t}{\varepsilon_0}$$

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

3) Плотность объемного заряда для каждого типа частиц :

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

Где \tilde{w} – относительная скорость частицы, м/с; ν - коэффициент турбулентной диффузии, м²/с; S – генерация объемного заряда

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

Уравнения генерации зарядов

1. Неиндуктивное заряджение 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 y, 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 заряджение частиц – заряджение гидрометеоров под действием электрического поля атмосферы.

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

$$S = \left[\frac{\pi}{4} E_{1,2} (1 - E_{1,2}) D^2_1 V_1 n^{0.022}_2 \right] \cdot \left[\left(\frac{\pi^3}{2} \right) D^2_2 E_z \cos \theta - Q \cdot \left(\frac{\pi^2}{6} \right) \cdot \left(\frac{D^2_1}{D^2_2} \right) \right]$$

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]:

$$E_z = 201.7 \cdot \exp(-0.12 z)$$

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-Моссоба), являющихся носителем заряда. Тогда зарядение с учетом этих процессов можно описать как [Довгалюк и др., 2013]. :

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

Где S – Заряд при обзернении, $P_{обз}$ – 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.

$$P_{обз} = \frac{\pi}{4} \times Q_c \times N_i \times E_{i,c} (1 - S_{i,c}) (D_i + D_c)^2 |V_i - V_c|,$$

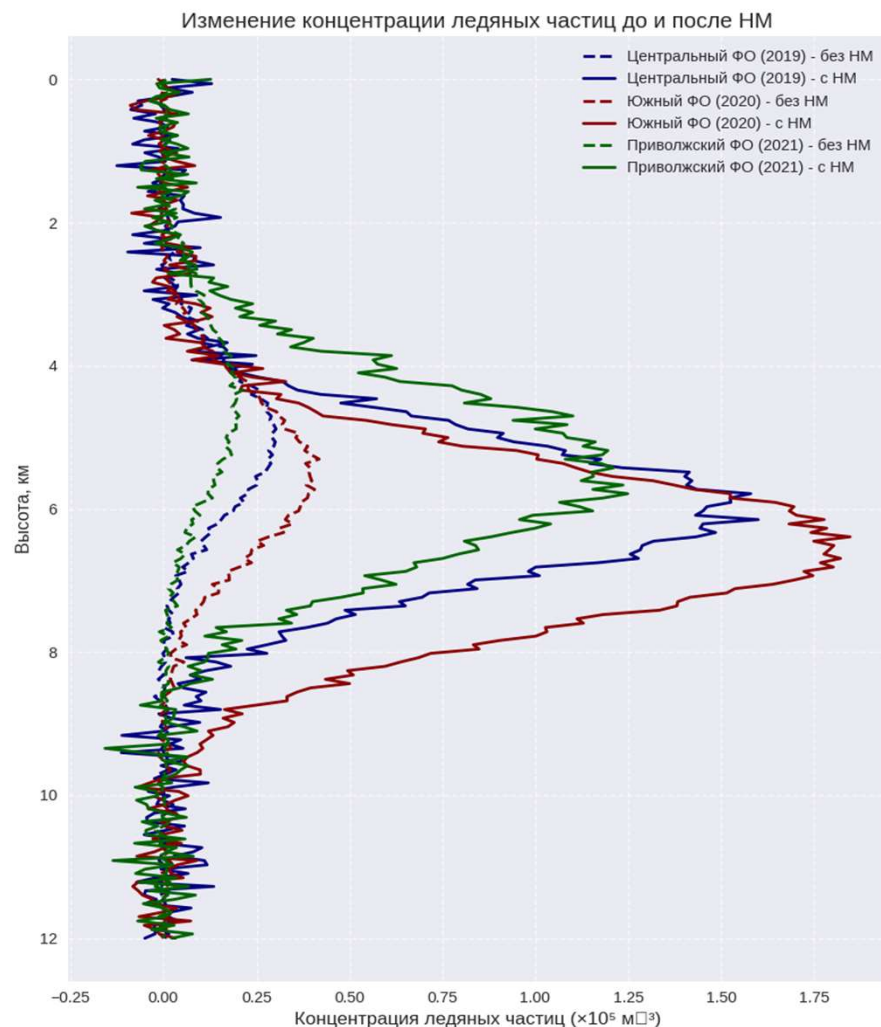
Где N_i – концентрация ледяных частиц, $E_{i,c}$; $S_{i,c}$ коэффициенты слияния и отскока частиц соответственно при взаимодействии облачных частиц и ледяных кристаллов [Довгалюк и др., 2013], V -скорости гравитационного оседания ледяных частиц и облачных капель. соответственно.

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 грозомерических 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 (вероятность обнаружения молний)</i>	0.66–0.82	0.86–0.90
<i>FAR (коэффициент ложных тревог)</i>	0.13–0.19	0.05–0.09
<i>ETS (критерий Гилберта)</i>	0.28–0.34	0.32–0.45

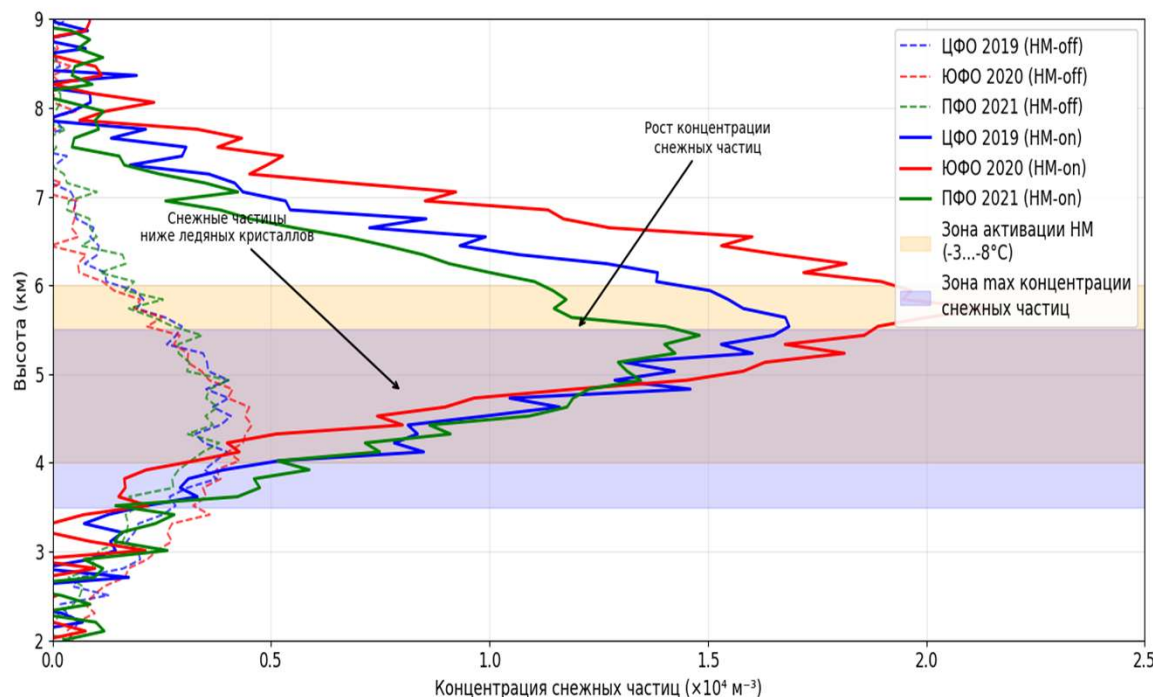
Изменение концентрации ледяных частиц



- 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)
- Базовая ледность с пиками $\sim 0.2\text{--}0.4 \times 10^5 \text{ м}^{-3}$ на 4.5–5.5 км. 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.

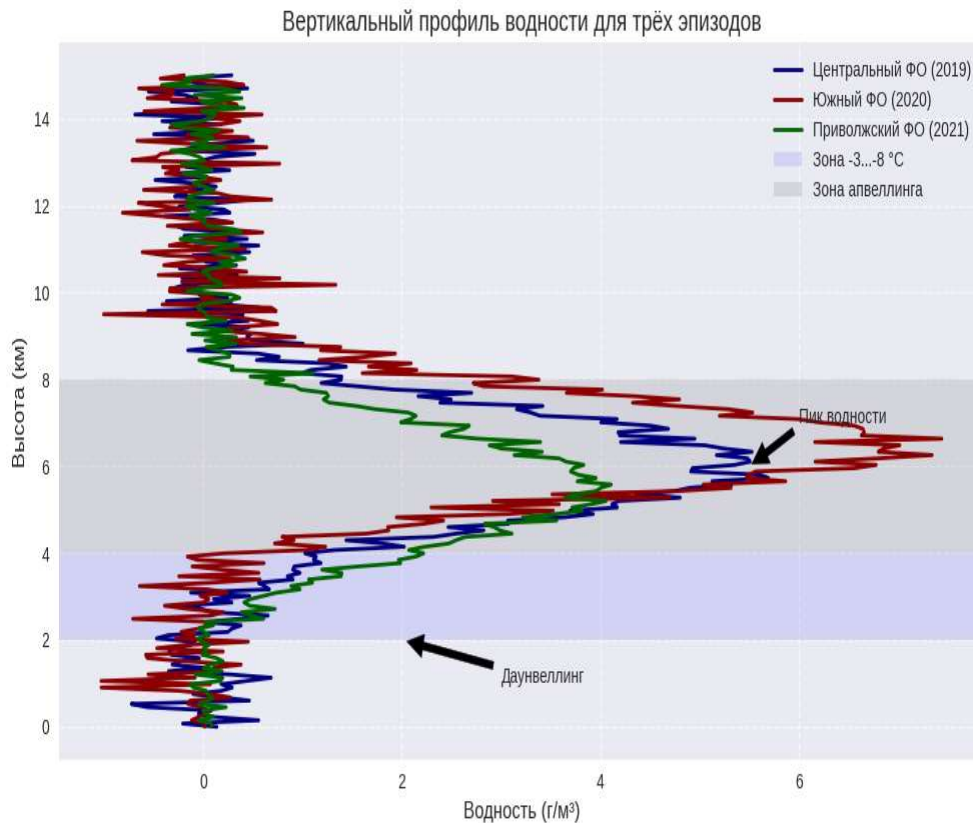
Изменение концентрации снежных частиц

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 аккреции.
- Рост концентрации снежных частиц при НМ-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 трёх эпизодов (1)

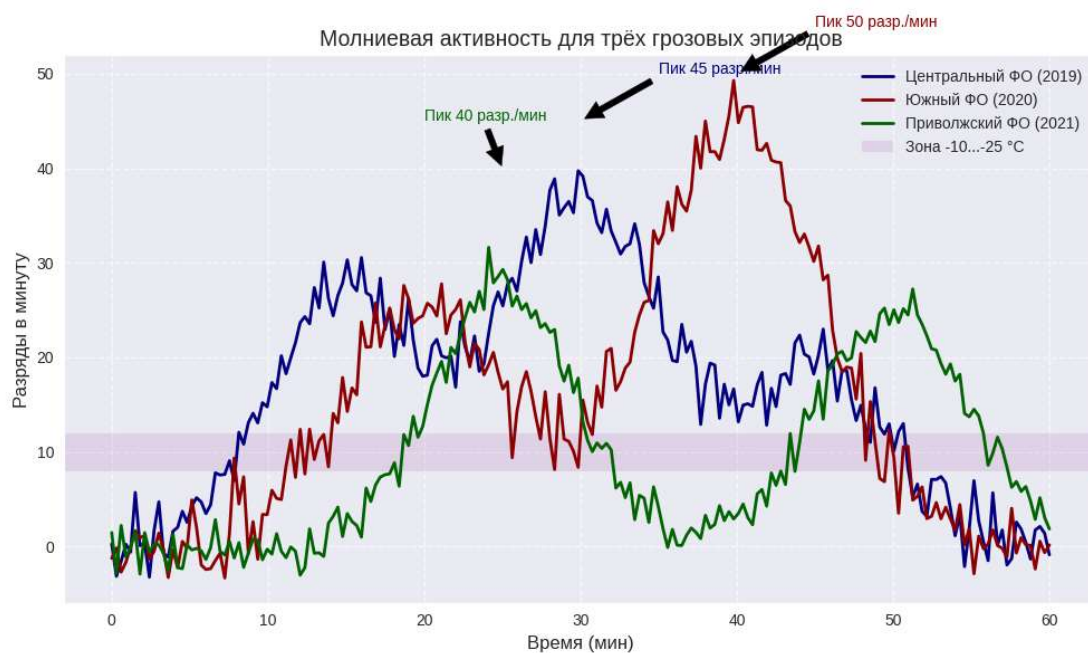


- График показывает вертикальные профили водности (г/м^3) для трёх эпизодов: Центральный ФО (2019, синий), Южный ФО (2020, красный), Приволжский ФО (2021, зелёный).
- Максимум водности в нижней/средней частях облака (5–7 км), с пиками 4–7 г/м^3 . Южный ФО: самый высокий пик ($\sim 7 \text{ г/м}^3$), 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 флуктуации 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 шторм 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 трёх конвективных эпизодов (рассчитано по модели электризации)

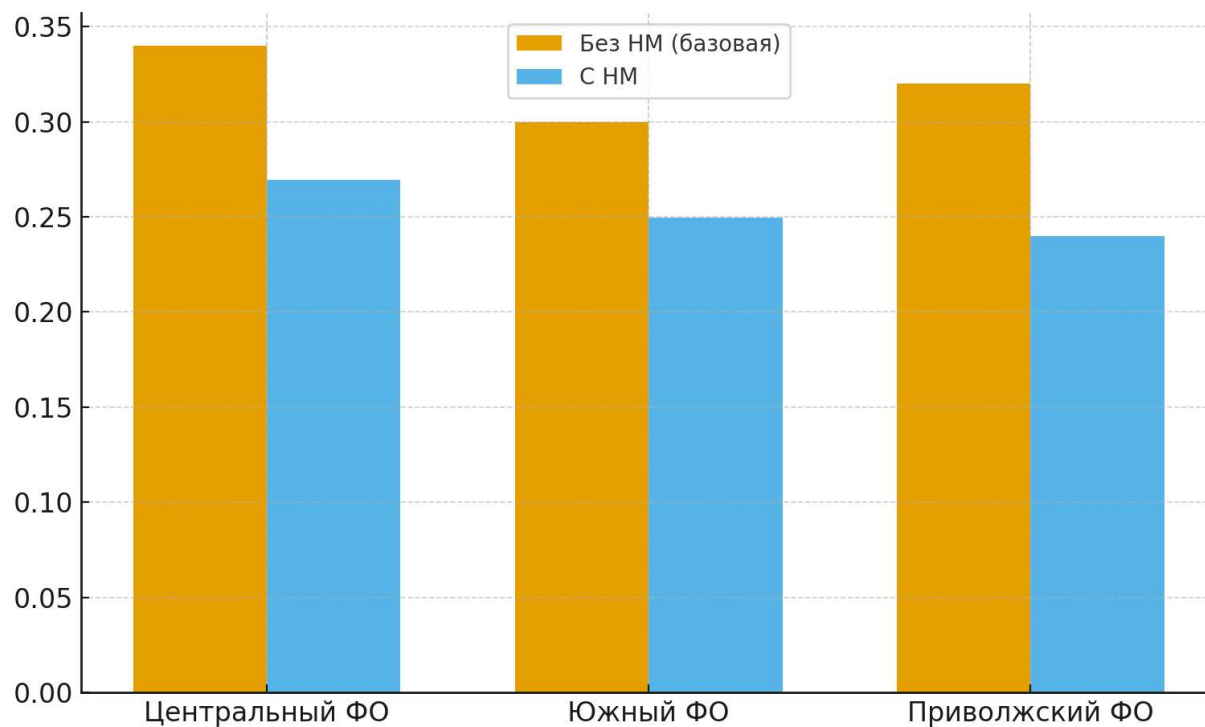


- График показывает количество разрядов в минуту (ось Y) во времени (0–60 минут, ось X) для трёх грозовых эпизодов: Центральный (2019), Южный (2020) и Приволжский (2021).
- Каждая кривая имеет уникальный профиль с несколькими пиками, отражающими всплески молниевой активности (до 40–50 разрядов/мин), связанные с вторичным ледообразованием по механизму Халлета-Моссопа.
- Зона температур $-10...-25^{\circ}\text{C}$ (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 Халлета-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–Моссоба 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 ВЫВОодЫ

- Механизм Халлета-Моссопа критически важен для моделирования микрофизики конвективных облаков: активация в слое $-3...-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ вызывает рост концентрации ледяных частиц на 60–75% (до $10^5\text{--}10^6\text{ м}^{-3}$), усиливая соударения, электризацию и формирование осадков.
- Установлена связь между зонами вторичного ледообразования, апвеллингами и всплесками молниевой активности (до 40–50 разрядов/мин в диапазоне $-10...-25\text{ }^{\circ}\text{C}$), что подтверждает роль НМ в эволюции штормов.
- Внедрение НМ в WRF-ARW улучшает прогноз экстремальных явлений: RMSE интенсивности осадков снижается до $\sim 25\%$, 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/>.