

Численное моделирование атмосферного обледенения на воздушных линиях электропередачи

И.И. Леонов¹, С.В. Черешнюк¹, А.А. Крылов¹, Д.М. Комаров^{1,2}

¹Управления ГИС-систем и климатических воздействий
АО «Россети Научно-технический центр», Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва,
Россия

Гололедно-изморозевые отложения высокой интенсивности

К опасным метеорологическим явлениям (**оя**) относятся явления погоды, которые интенсивностью, продолжительностью и временем возникновения представляют угрозу безопасности людей, а также могут нанести значительный ущерб отраслям экономики [Руководящий Документ, 2002].

Критерии опасных явлений гололедно-изморозевых отложений для:

- гололеда – диаметром не менее **20 мм**;
- сложного отложения или мокрого снега – диаметром не менее **35 мм**;
- изморози – диаметр отложения не менее **50 мм**

Наибольшую опасность для деятельности человека представляют отложений в виде гололеда, зернистой изморози и мокрого снега.



Фото: Тарасова Наталья

Гололед

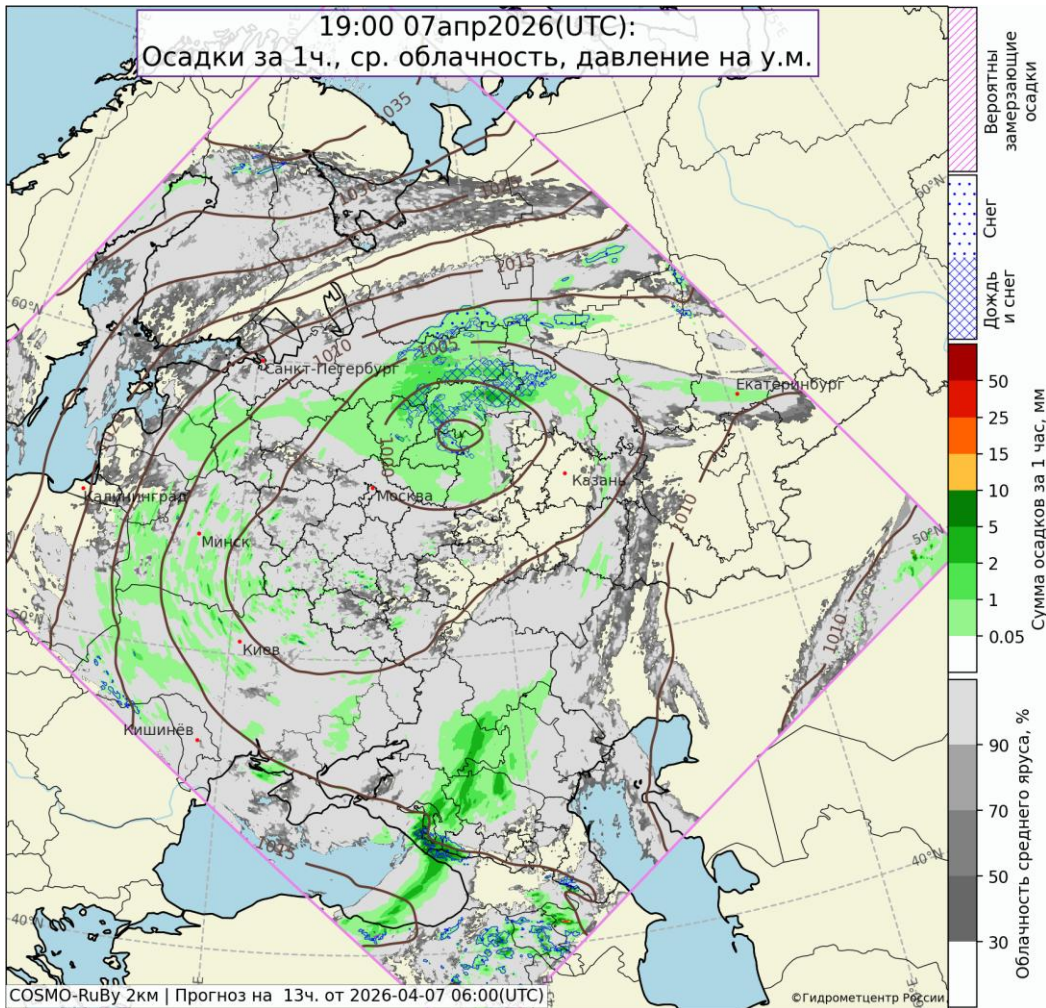


cloudatlas.wmo.int

Зернистая изморозь

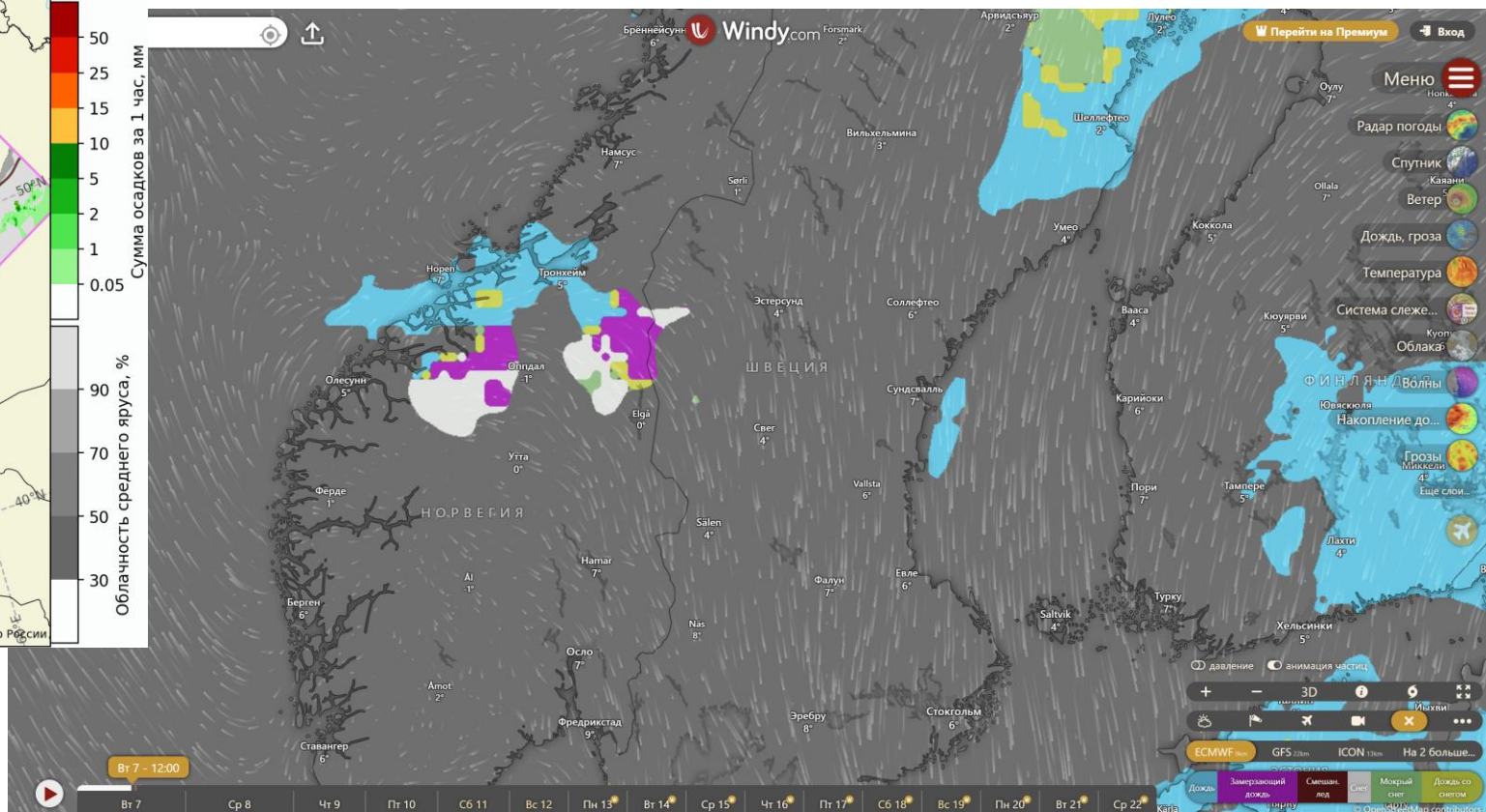


Отложения мокрого снега

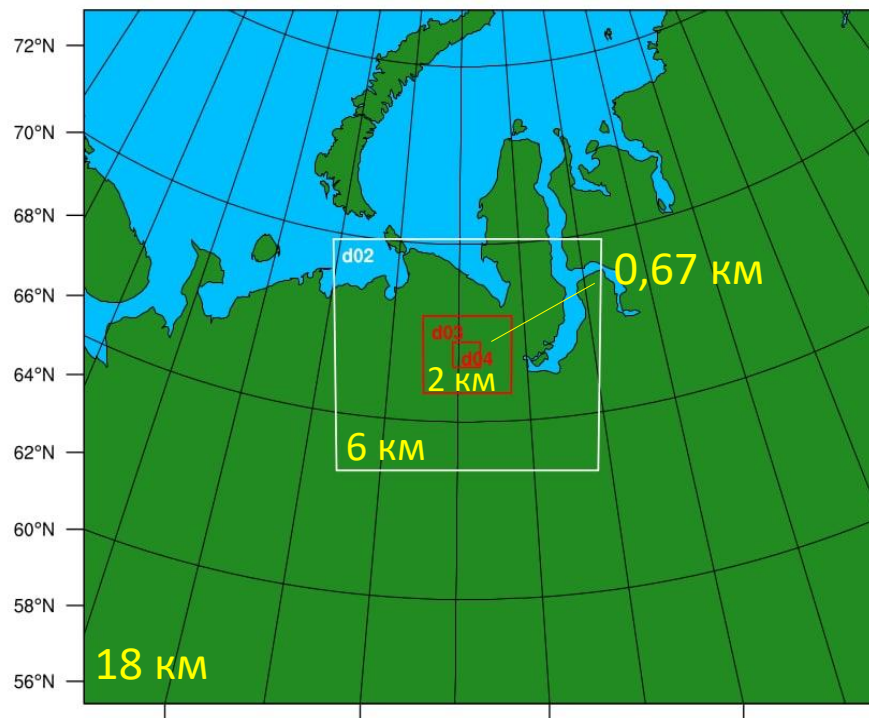


Карты прогнозов мезомасштабной модели
COSMO-RU с 2.2-километровым
пространственным разрешением.
Карта прогноза осадков, облачность от
Гидрометцентра России.

Карты прогнозов типа осадков глобальными моделями атмосферы.
Карта прогноза осадков модели ECMWF на 7 апреля 2026 г.



Проведение численных экспериментов по воспроизведению случаев гололедно-изморозевых с использованием атмосферной модели WRF-ARW



142x121 узлов сетки

78 вертикальных уровней (28/58 в нижних 2/5 км)

Начальные данные: реанализ ERA5 0.25x0.25°

3-4 расчетные области: 18 – 6 – 2 – 0,67 км

Набор физики:

MP_PHYSICS: NSSL 2-moment Scheme (18)

RA_LW_PHYSICS: RRTMG Longwave Scheme (4)

RA_SW_PHYSICS: RRTMG Shortwave Scheme (4)

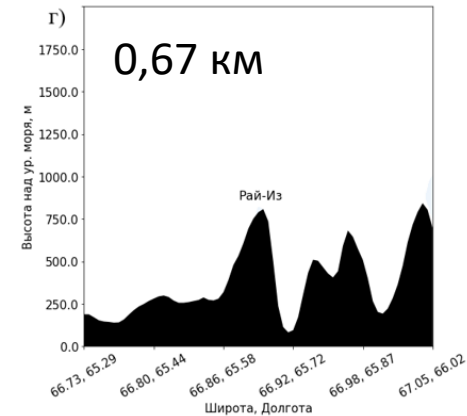
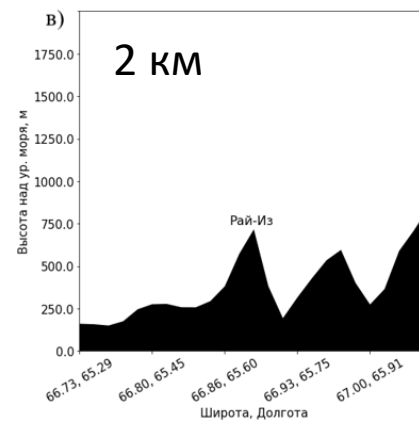
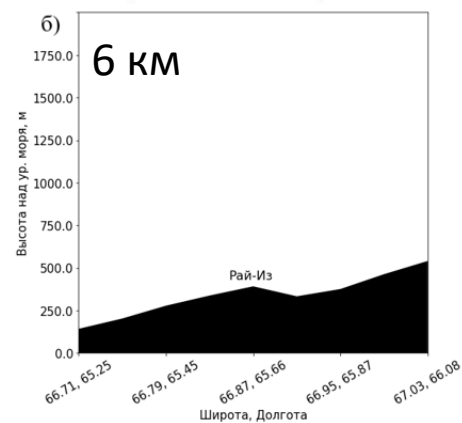
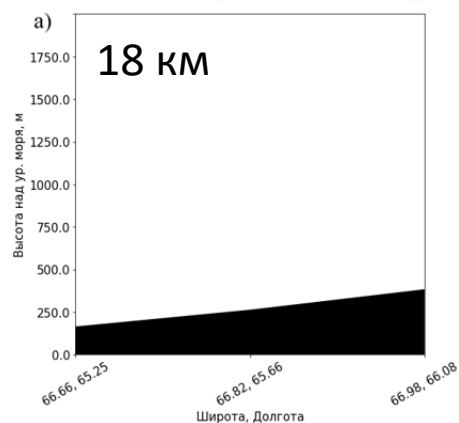
SF_SFCLAY_PHYSICS: Revised MM5 (1)

SF_SURFACE_PHYSICS: Noah-MP Land Surface Model (4)

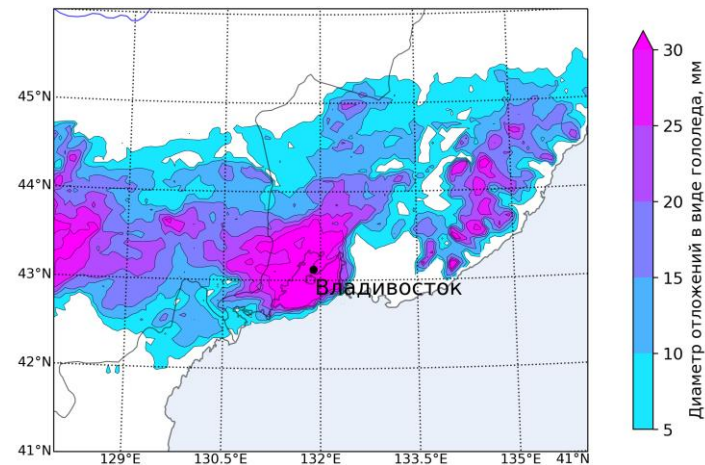
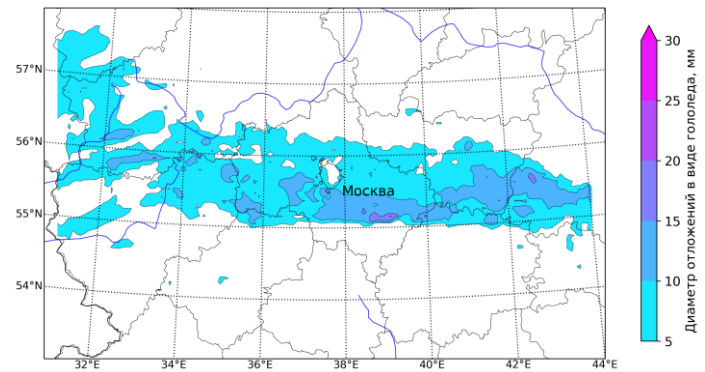
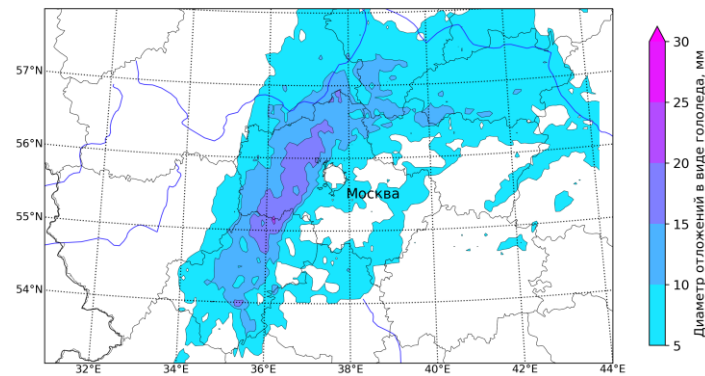
BL_PBL_PHYSICS: Bougeault-Lacarrere Scheme (8)

CU_PHYSICS: New Simplified Arakawa-Schubert (14)

SF_URBAN_PHYSICS: Building Energy Model (BEM) (3)



Результаты численного моделирования высокоинтенсивных отложений гололеда



Поля максимального диаметра гололеда на момент по данным модели WRF-ARW

Условие выпадения замерзающих осадков:

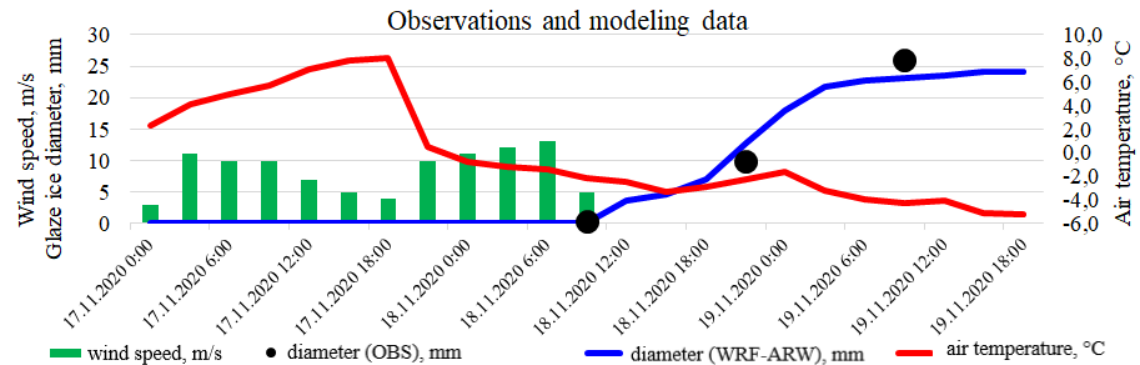
$$\frac{QRAIN}{QICE+QSNOW+QGRAUP+QRAIN} > 0.8 \text{ и } T2 < 0$$

где QRAIN, QICE, QSNOW, QGRAUP – гидрометеоры в виде дождя, облачного льда, снега и ледяной крупы соответственно

Прирост льда в каждый момент времени рассчитывался по формуле (Jones, 1996):

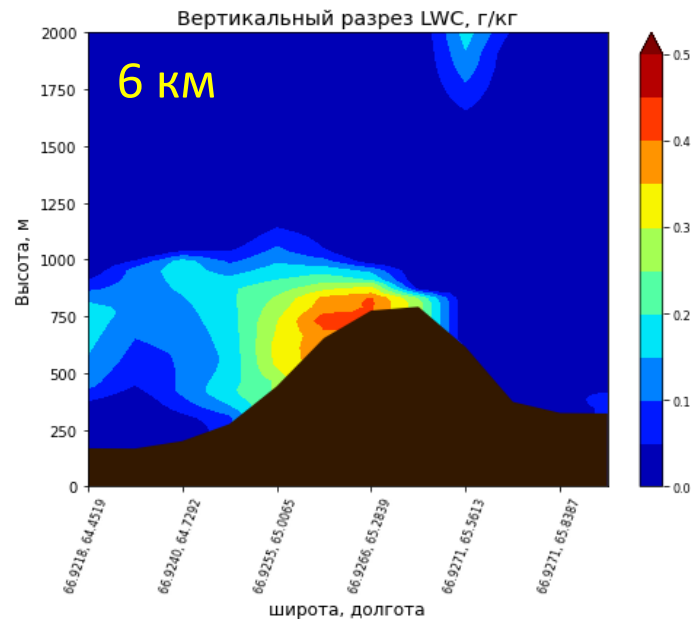
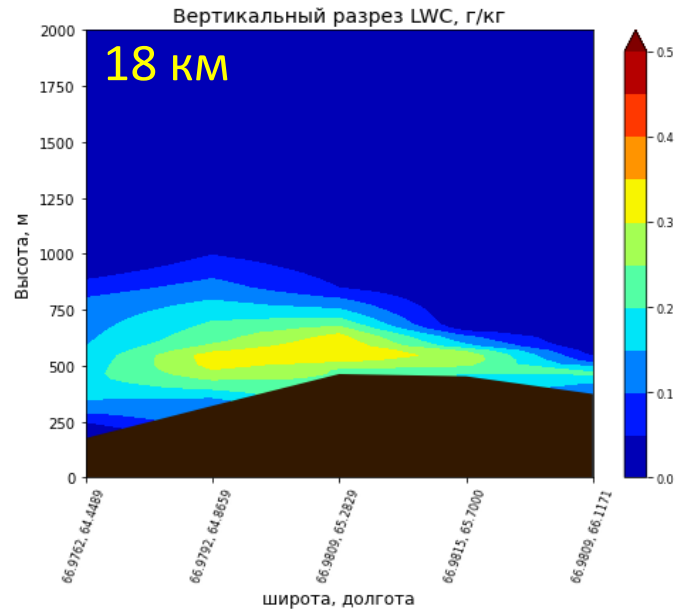
$$R(t) = \frac{1}{\rho_i \pi} \sqrt{(\rho_0 P(t))^2 + (3.6 V(t) W(t))^2}$$

где $W(t) = 0,067P(t)^{0,846}$ – содержание воды в воздухе; $V(t)$ – скорость ветра на высоте 10 м, P – сумма жидких осадков (мм) за период времени между $t-1$ и t ; ρ_0 – плотность воды ($\sim 1000 \text{ кг/м}^3$); ρ_i – плотность льда ($\sim 0,9 \text{ кг/м}^3$).



(Леонов, Черешнюк, 2022)

Прогнозирование зернистой изморози по данным WRF-ARW



Зернистая изморозь на возвышенности, Ставрополье

Гололед

Образование – $T < 0^{\circ}\text{C}$ + жидкие осадки

Разрушение – $T > 0^{\circ}\text{C}$

Мокрый снег

Образование – $T < \sim 1,6^{\circ}\text{C}$ + смешанные осадки (1-20% жидкой фазы)

Разрушение – $T > 0^{\circ}\text{C}$

Зернистая изморозь

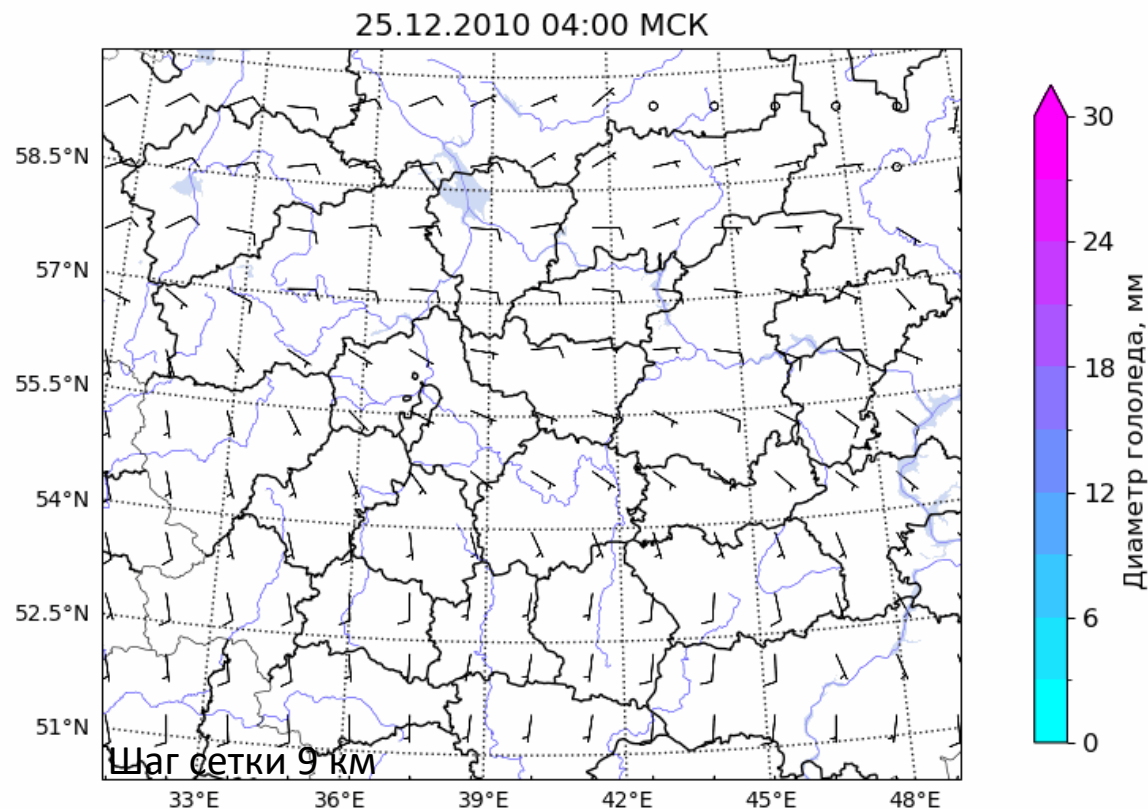
Образование – $T < 0$ + переохлажденные капли

Разрушение – $T > 0$ +

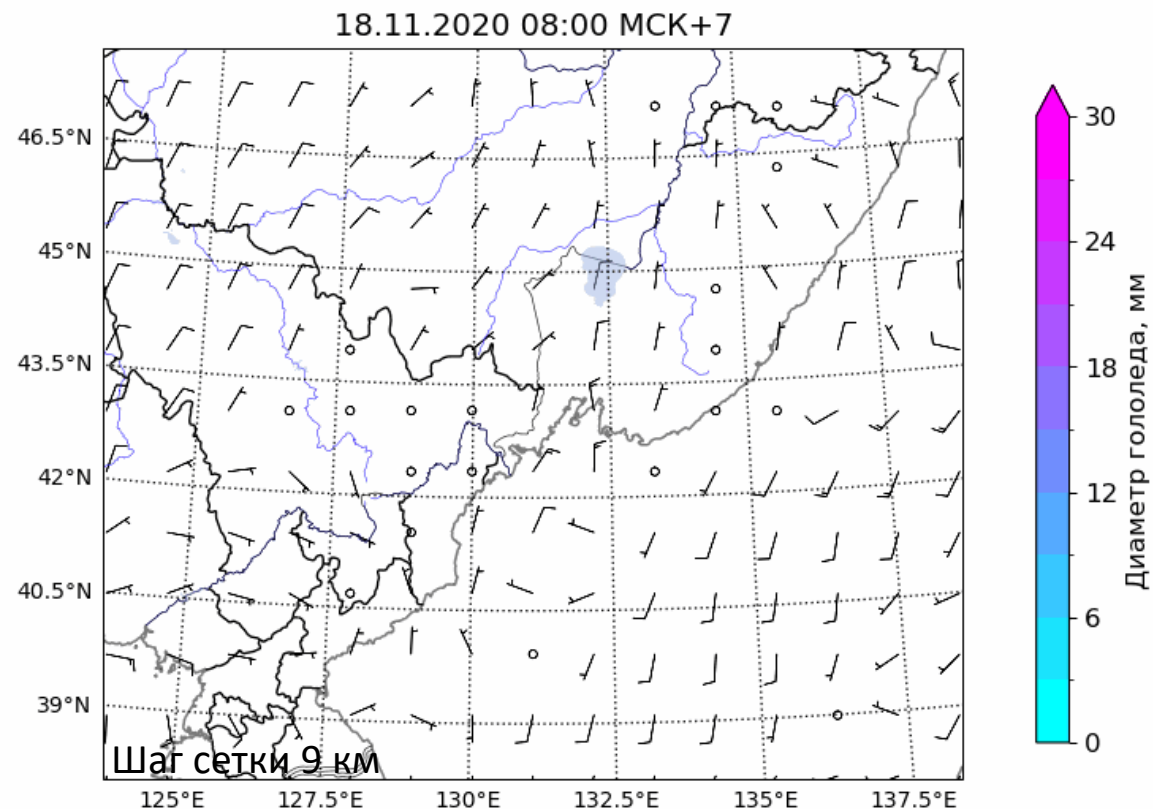
**СУБЛИМАЦИЯ(ВОЗГОНКА) +
МЕХАНИЧЕСКИЙ СБРОС**

Зернистая изморозь может сохраняться на различных объектах несколько дней. Для правильного «разрушения» не достаточно только положительной температуры.

Расчет поля толщины гололедных отложений с использованием данных численных моделей атмосферы (WRF-ARW и др.)

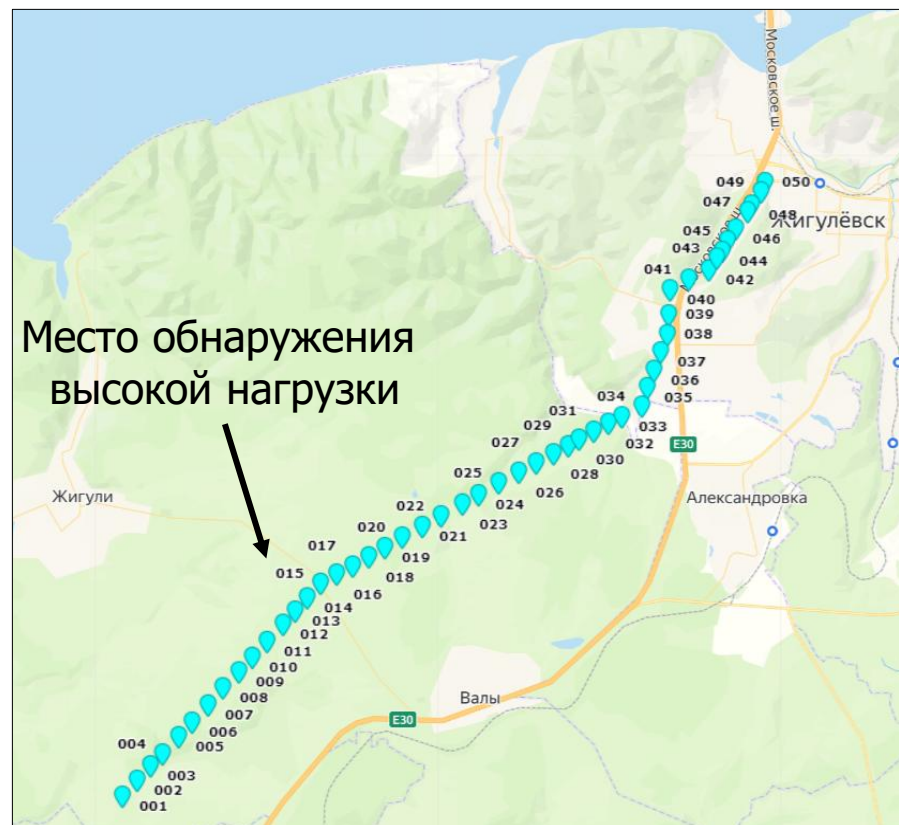


Образование гололеда в конце декабря 2010 года на территории Центральной России по данным модели WRF-ARW



Образование гололеда 19-20 ноября 2020 года в Приморском крае по данным модели WRF-ARW

Расчет толщины и массы гололеда для определенных объектов электросетевого комплекса (отдельные опоры)



Место обнаружения высокой гололедной нагрузки по данным датчиков тяжения МЭС Волги (Самара)

8 декабря 2021 года.
Ставропольский район Самарской области.

Известная информация о ВЛ:

- координаты опор
- диаметр проводов ВЛ
- высота подвеса проводов
- длина пролетов ВЛ.

+

Данные численной модели
WRF-ARW

- толщина гололеда
- количество осадков
- температура воздуха
- многие др. параметры

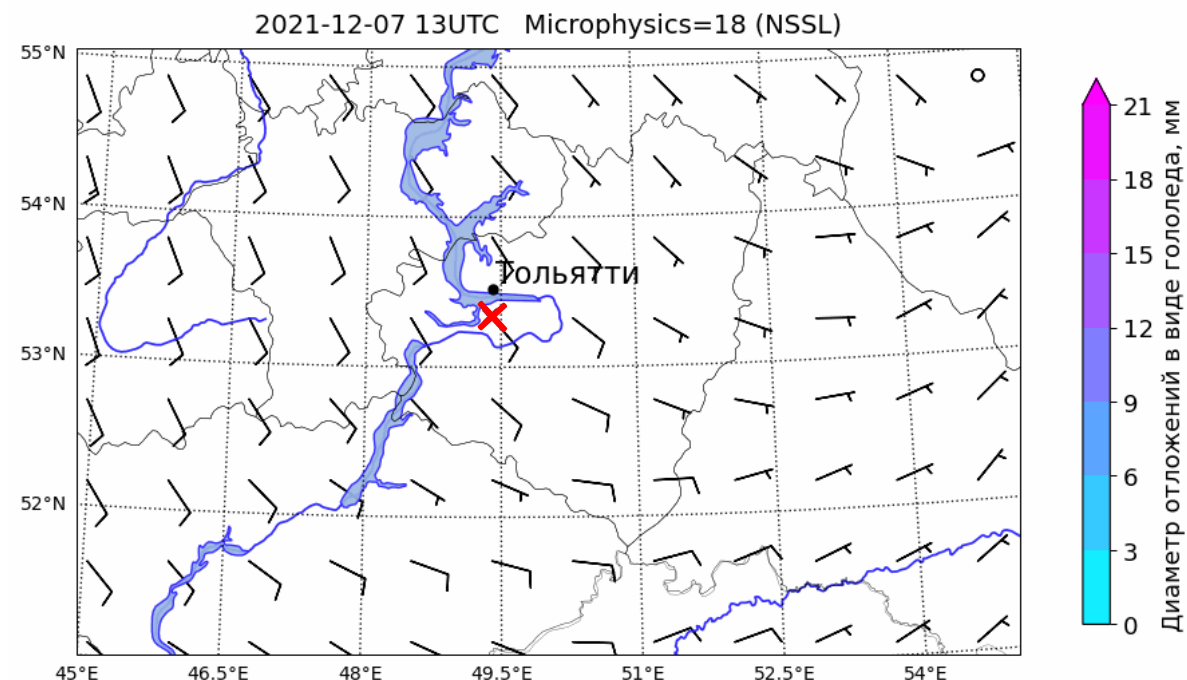
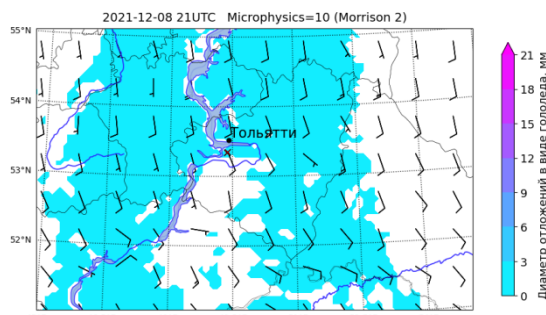
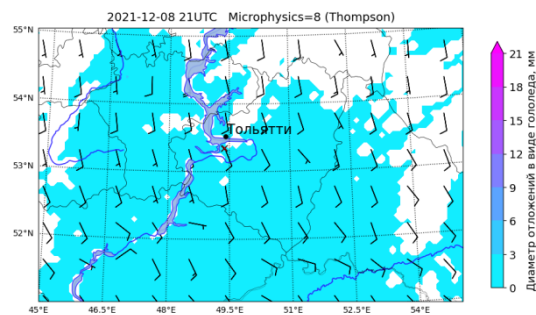
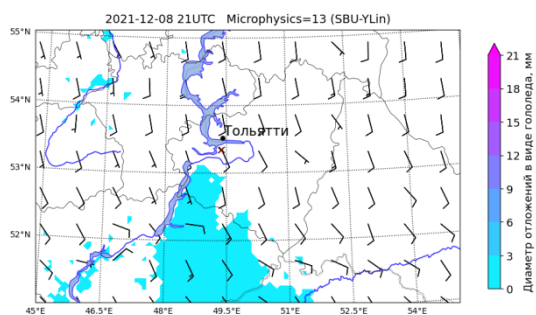
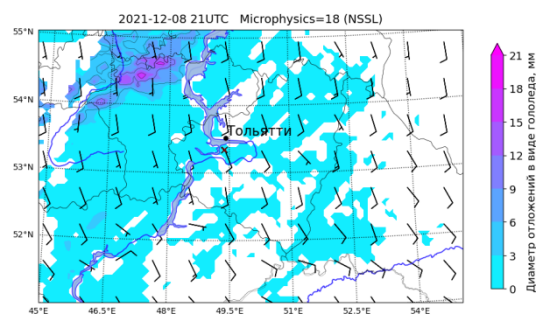


Результат

Информация о гололедной
нагрузке для каждой опоры ВЛ
и для каждого пролета ВЛ

Расчет поля толщины гололедных отложений с использованием данных численных моделей атмосферы (WRF-ARW и др.)

Примеры с расчета толщины гололеда с
использованием различных параметризаций
микрофизики модели WRF-ARW:



Образования гололеда 8 декабря 2021 года на территории
Самарской области по данным модели WRF-ARW

Разработанная методика позволяет получать
данные о толщине гололеда на любых
высотах (от поверхности земли до ~300 м)

Расчет толщины и массы гололеда для определенных объектов электросетевого комплекса (отдельные опоры)

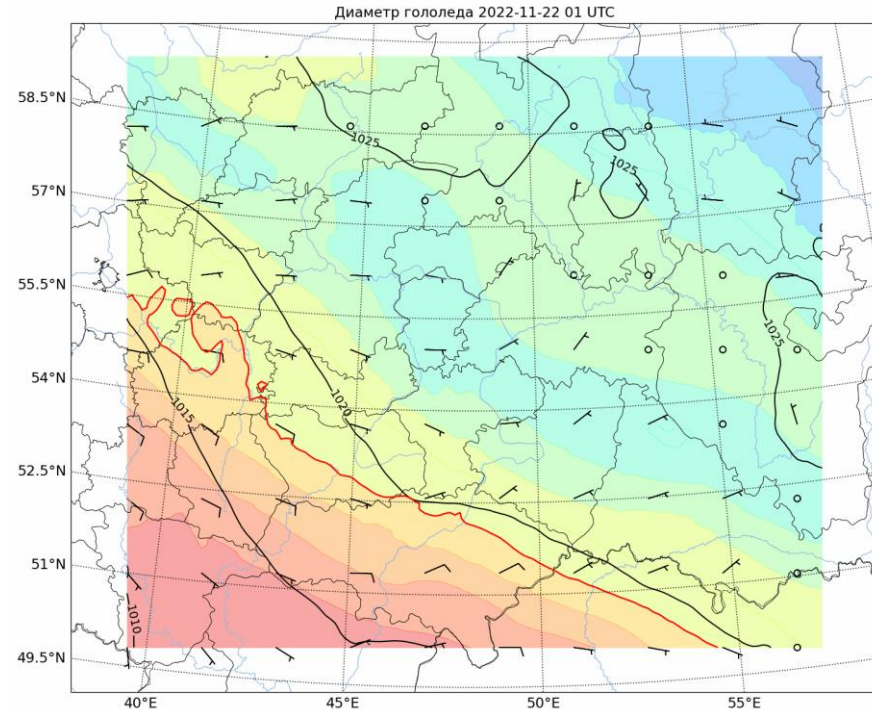
220 кВ Жигулев. ГЭС - Сызрань (43) за период [08.12.2021 - 08.12.2021]																	
Время	Грозотрос Л	Влажность	Фаза А	Фаза А (t)	Фаза А2	Фаза А2 (t)	Фаза В	Фаза В (t)	Фаза В2	Фаза В2 (t)	Фаза С	Фаза С (t)	Фаза С2	Фаза С2 (t)	Температура	Заряд АКБ	Сила Ветра
08.12.2021 0:07:02	214.8	93	737.9	-10	701.2	-10	721.9	-9.5	690.7	-10.5	717	-10	687.5	-10	-10.5	12.6	4.4
08.12.2021 0:56:48	215.3	94.4	736.4	-10.5	699.7	-10.5	719.7	-9.5	691	-10.5	714.5	-10	691.4	-10.5	-10.6	12.6	5.1
08.12.2021 1:44:43	215.6	96.5	737.7	-10	700.5	-10	721.7	-9	689	-10	717	-9.5	689.7	-10	-10.3	12.6	6.4
08.12.2021 2:28:58	214.3	н/д	739	-10	702.5	н/д	717.7	-9.5	688.2	н/д	717.5	-10	690.9	н/д	н/д	н/д	0
08.12.2021 3:14:33	215.5	100	737.2	-9.5	700.2	-9.5	717.7	-8.5	689	-9.5	713.5	-9	688.7	-9.5	-9.8	12.6	4.8
08.12.2021 3:58:13	214.8	100	735.9	-9.5	699.7	-9.5	719.5	-8.5	684.5	-9.5	715.7	-9.5	688.2	-9.5	-9.8	12.6	4.1
08.12.2021 4:48:46	215.8	100	739.7	-9	702	-9	719.4	-8.5	688.7	-9.5	715.2	-9	689	-9	-9.6	12.6	4
08.12.2021 5:30:47	217.8	100	740.2	-8	703.7	-8	721.7	-7.5	690.2	-8	716.7	-8	691.7	-8	-8.3	12.6	2.7
08.12.2021 6:15:23	223	100	744.7	-7	709.5	-7	727	-6.5	693.7	-7	720.2	-7	695.7	-7	-7.5	12.6	2.4
08.12.2021 6:59:19	226.6	100	754.4	-6	716	-6	732	-5	700.7	-6	725.5	-5.5	699.5	-6	-6.5	12.6	6.4
08.12.2021 7:42:14	235.3	100	766.7	-5.5	730	н/д	742	-5	711.7	-5.5	733.9	-5.5	706	-5.5	-6	12.6	4.4
08.12.2021 8:34:52	249.8	100	795.5	-5.5	762	-5.5	761.5	-4.5	734.5	-5.5	746	-5	717.4	-5.5	-5.5	12.6	4
08.12.2021 9:20:34	254.8	100	798.2	-5	765	-5	772.4	н/д	744.7	-5	753.7	-4.5	726.2	-5	-5	12.6	3.2
08.12.2021 10:06:47	263.7	100	813.2	-4	773.9	н/д	783	н/д	754.7	-4.5	764.5	-4	737.2	-4	-4.5	12.6	4.3
08.12.2021 11:12:29	281.5	100	826	н/д	787.9	н/д	798.7	н/д	769.2	-3.5	780.7	-3	753.7	-3	-3.5	12.8	4
08.12.2021 11:56:22	303.2	100	841	-2.5	800.2	н/д	817.2	н/д	782.9	-3	796.2	-2.5	769.7	-2.5	-3	13	2.7
08.12.2021 12:42:24	312.8	100	854.2	-2	818.7	н/д	831.7	-1	801.2	-2	814.5	-1.5	783	-2	-2.2	13	3.4
08.12.2021 13:28:45	335.8	100	878.5	-1	842.2	-1	852	-0.5	821.2	-1	833	-1	807.5	-1	-1.6	13	3
08.12.2021 14:14:26	349.2	100	888.7	-0.5	851.5	-0.5	861.5	0	826.7	-0.5	839.7	-0.5	809.5	-0.5	-0.8	12.8	3.4
08.12.2021 15:31:38	373.2	100	922.5	0	881.2	0	889.7	0.5	848.2	-0.5	864	0	831	0	-0.4	12.6	4.3
08.12.2021 16:16:00	376.1	100	931	0	890.2	0	888.7	0.5	861.2	0	865.5	0	835.5	0	-0.3	12.6	4.1
08.12.2021 17:00:47	386.8	100	936.9	0	900.2	0	895.9	0.5	867	0	870	0	842.9	0	-0.3	12.6	3
08.12.2021 17:41:53	384.3	100	938	0	901.4	0	897	1	869	0	869.4	0	843.7	0	-0.3	12.6	2.7
08.12.2021 18:25:59	400.8	100	958.7	0	913	0	910.7	1	878.7	0	879	0.5	849.7	0	-0.3	12.6	3.5
08.12.2021 19:10:52	221.3	100	983.7	0	946	0	926.5	0.5	893.5	0	892	0	867.2	0	-0.3	12.6	2.9
08.12.2021 19:58:43	225.5	100	973.2	0	930	0	918.2	0.5	887.2	0	885.5	0	855	0	-0.3	12.6	1.7
08.12.2021 20:40:30	230.5	100	986.2	0	941.9	0	931.4	0.5	894	0	896.5	0	871	0	-0.2	12.6	3.2
08.12.2021 21:25:14	231.6	100	983.2	0	937.7	0	930.4	0.5	896.7	0	895.2	0	864.7	0	-0.3	12.6	3.2
08.12.2021 22:10:11	234	100	998.4	-0.5	961.4	-0.5	940.4	0.5	905.7	-0.5	906	0	868.7	-0.5	-0.4	12.6	3.9
08.12.2021 22:55:38	234.8	100	1000	-0.5	956.7	-0.5	937.7	0.5	907.2	-0.5	901.5	0	867.9	-0.5	-0.5	12.6	3.2
08.12.2021 23:41:12	236	100	1003.4	-0.5	961.7	-0.5	936	0	904	-0.5	902.7	-0.5	876.5	-0.5	-0.6	12.6	3.2

Пример данных с конкретных датчиков тяжения
8 декабря 2021 года.

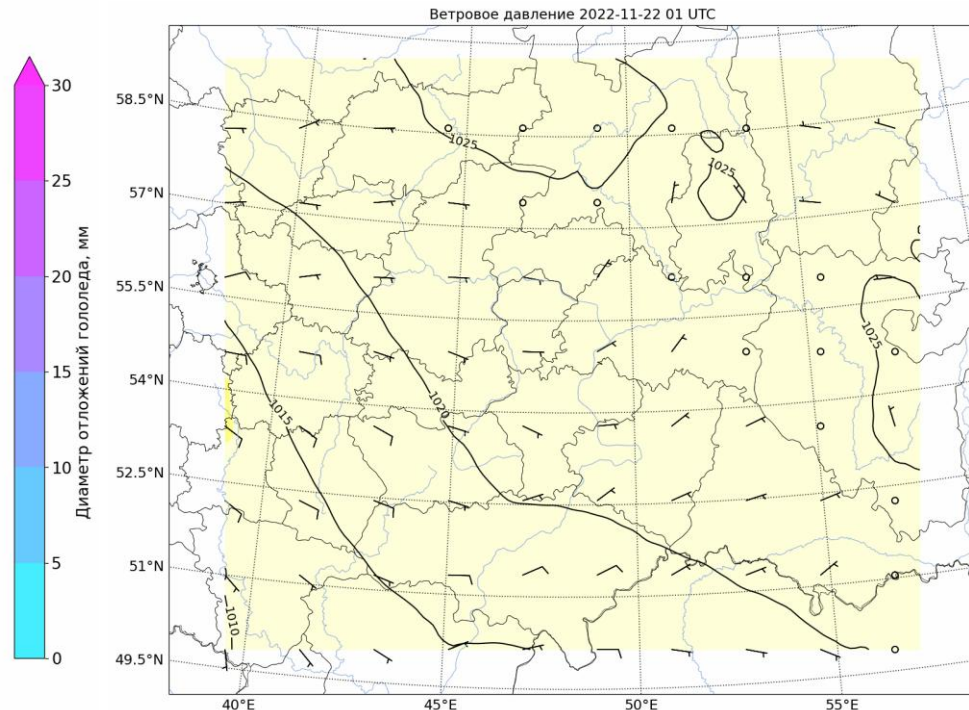
Зная данные о толщине провода (30,4 мм) и о высоте подвеса проводов (~30 м) можно получать прогноз толщины и массы гололеда для конкретного участка ВЛ.



Диаметр
гололеда,
мм

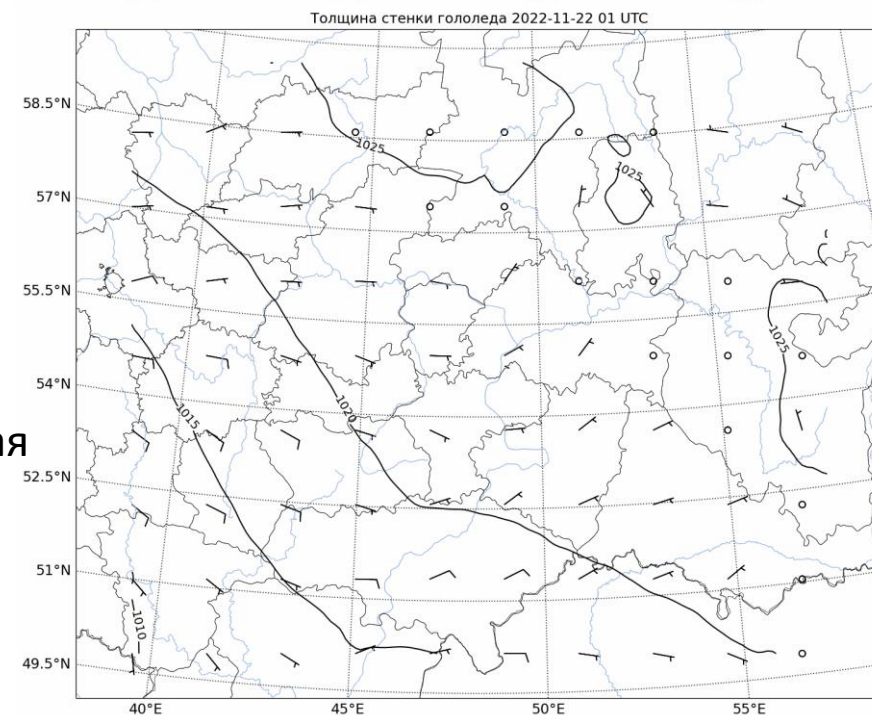


Диаметр отложений гололеда, мм

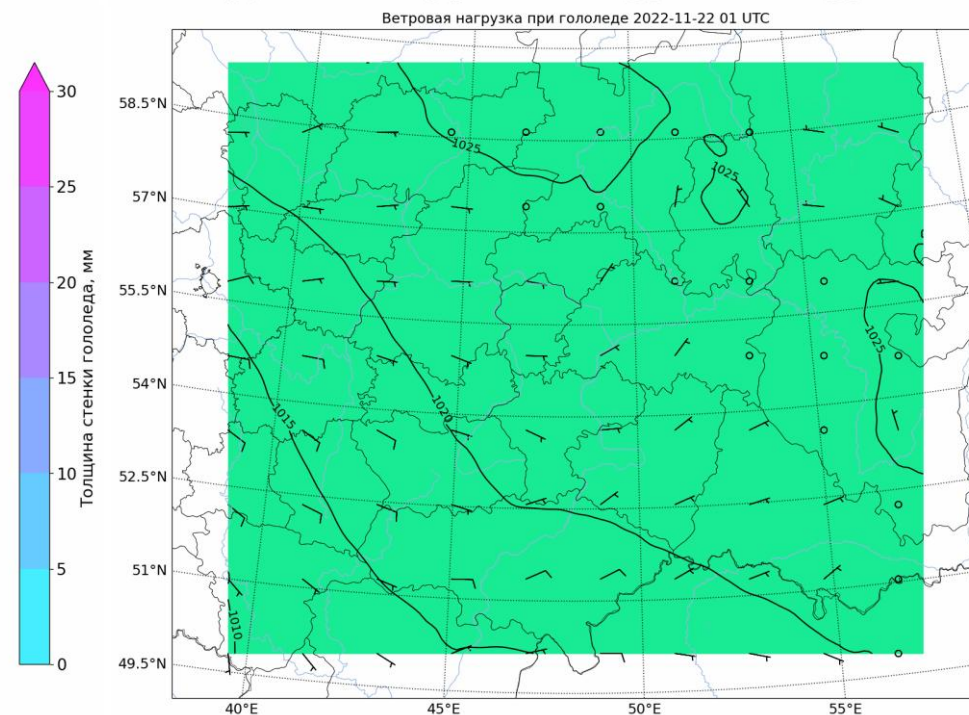


Ветровое давление, Па

Толщина
стенки
гололеда
приведенная
к плотности
900 кг/м³,
мм



Толщина стенки гололеда, мм

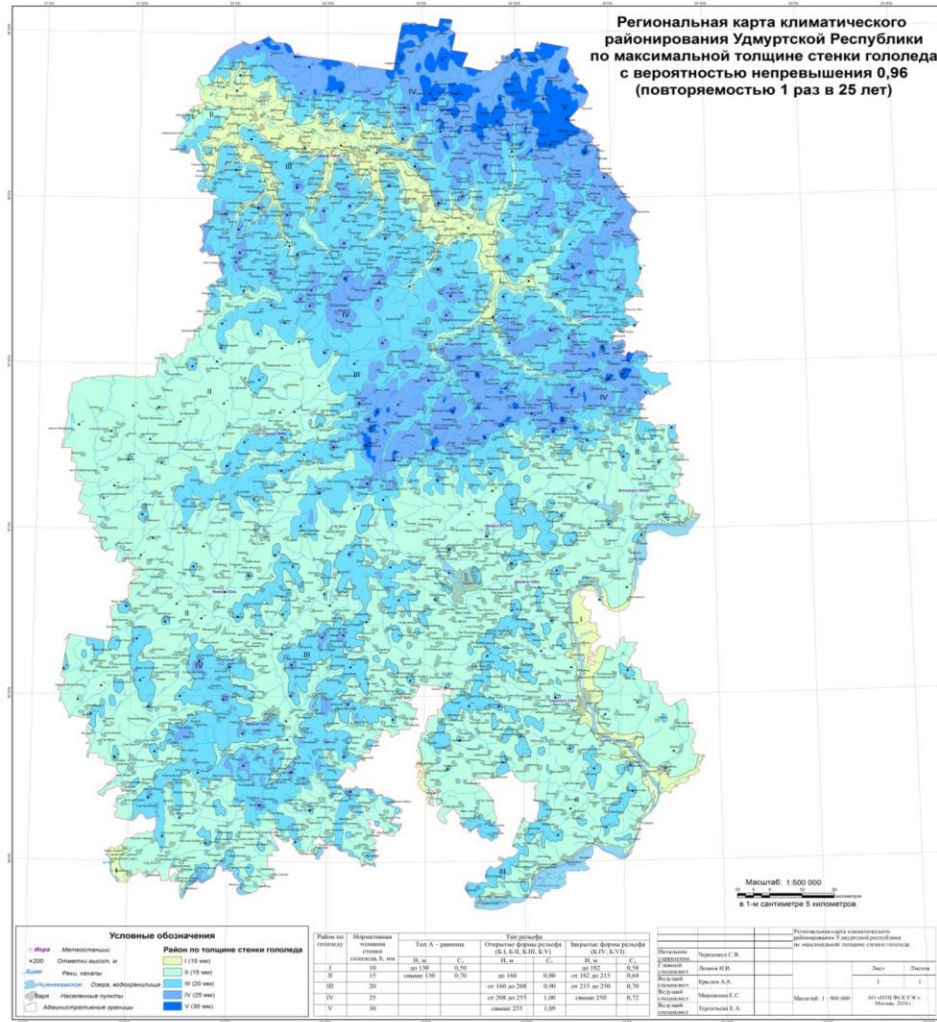


Ветровая нагрузка при гололеде, Н/м

Ветровое
давление,
Па

Ветровая
нагрузка
при
гололеде,
Н/м

Региональная карта климатического районирования по максимальной толщине стенки гололеда



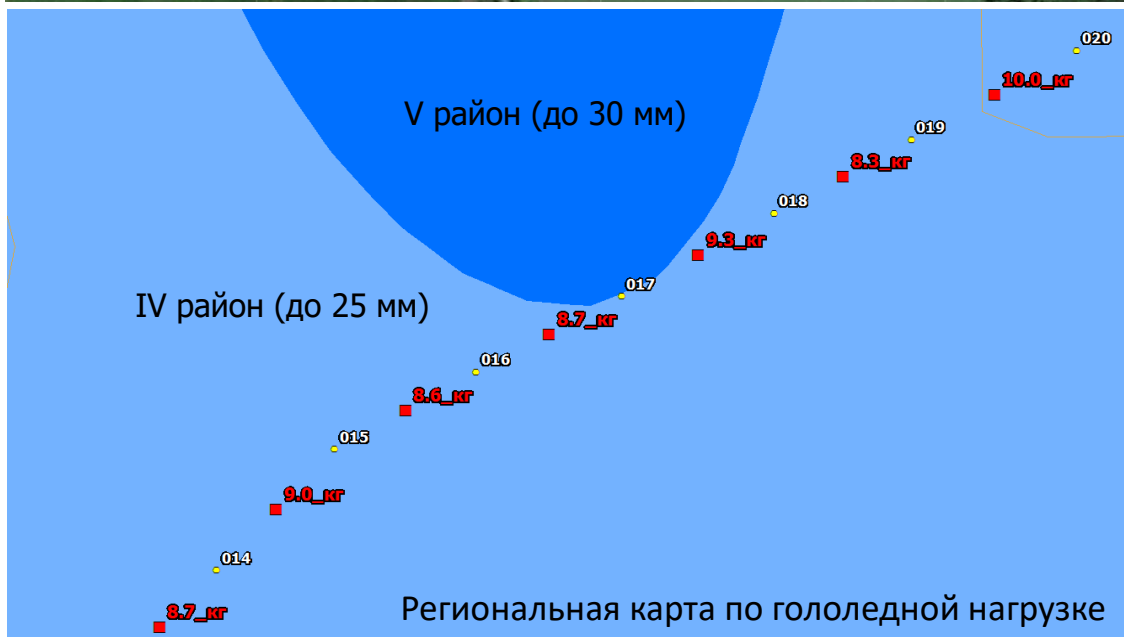
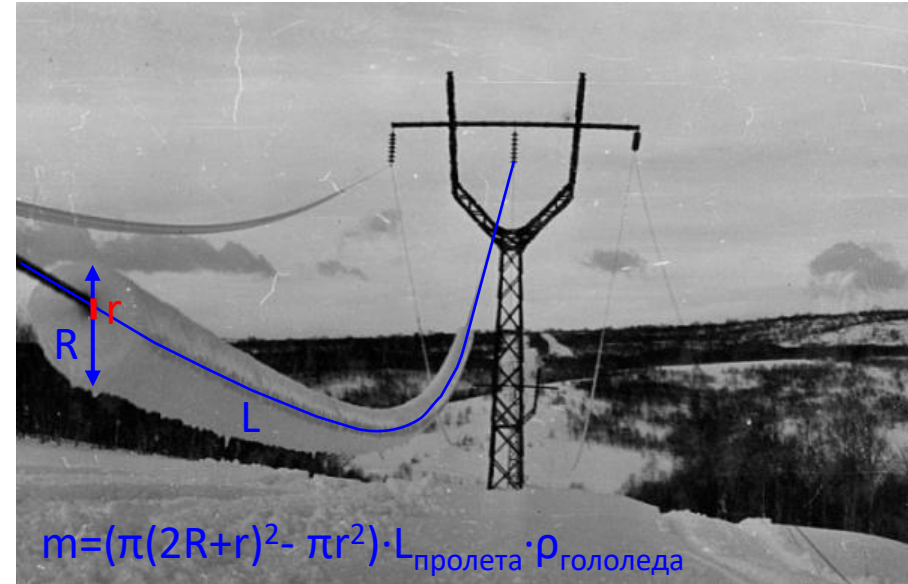
Надежность и живучесть энергообъектов, в том числе подстанций и линий электропередачи, непосредственно зависит от принятых расчетных климатических нагрузок.

При проектировании энергообъектов должны учитываться климатические условия: ветровое давление (скорость ветра), толщина стенки гололеда, ветровая нагрузка при гололеде, температура воздуха, интенсивность грозовой деятельности. От величины принятых при проектировании климатических нагрузок зависит выбор конструктивных решений по ВЛ.

Стандарт организации ФСК ЕЭС СТО 56947007-29.240.01.189-2014
«Методические указания по применению альбомов карт климатического районирования территории по субъектам РФ»
включает в себя :

- методические указания по применению региональных карт климатического районирования ;
- региональные карты климатического районирования по скорости ветра с вероятностью не превышения 0,96 (повторяемостью 1 раз в 25 лет);
- региональные карты климатического районирования по толщине стенки гололеда с вероятностью не превышения 0,96 (повторяемостью 1 раз в 25 лет);
- региональные карты климатического районирования по ветровой нагрузке при гололеде с вероятностью не превышения 0,96 (повторяемостью 1 раз в 25 лет);

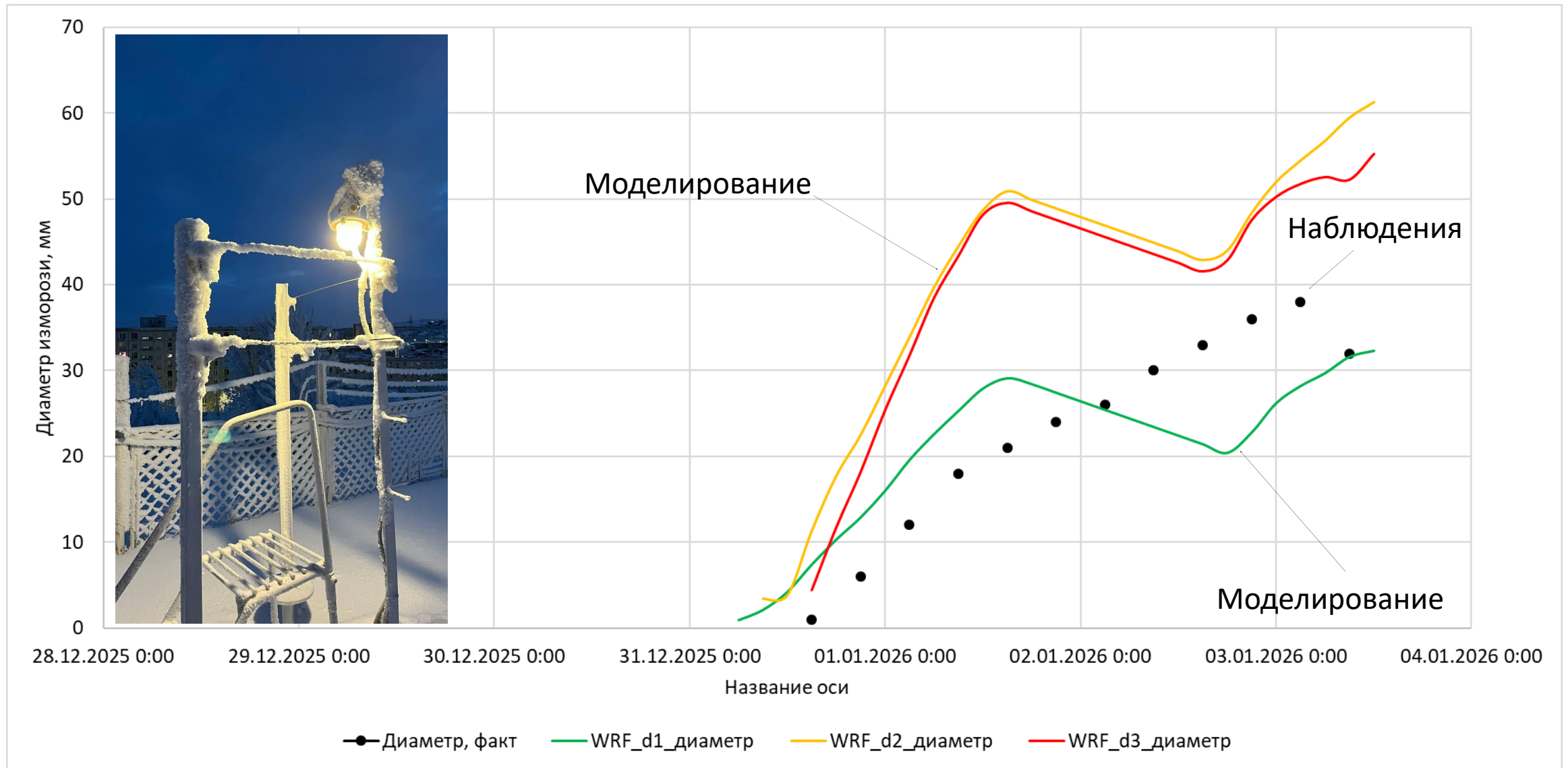
Расчет толщины и массы гололеда для определенных объектов электросетевого комплекса
(пролеты ВЛ)

[illegible]

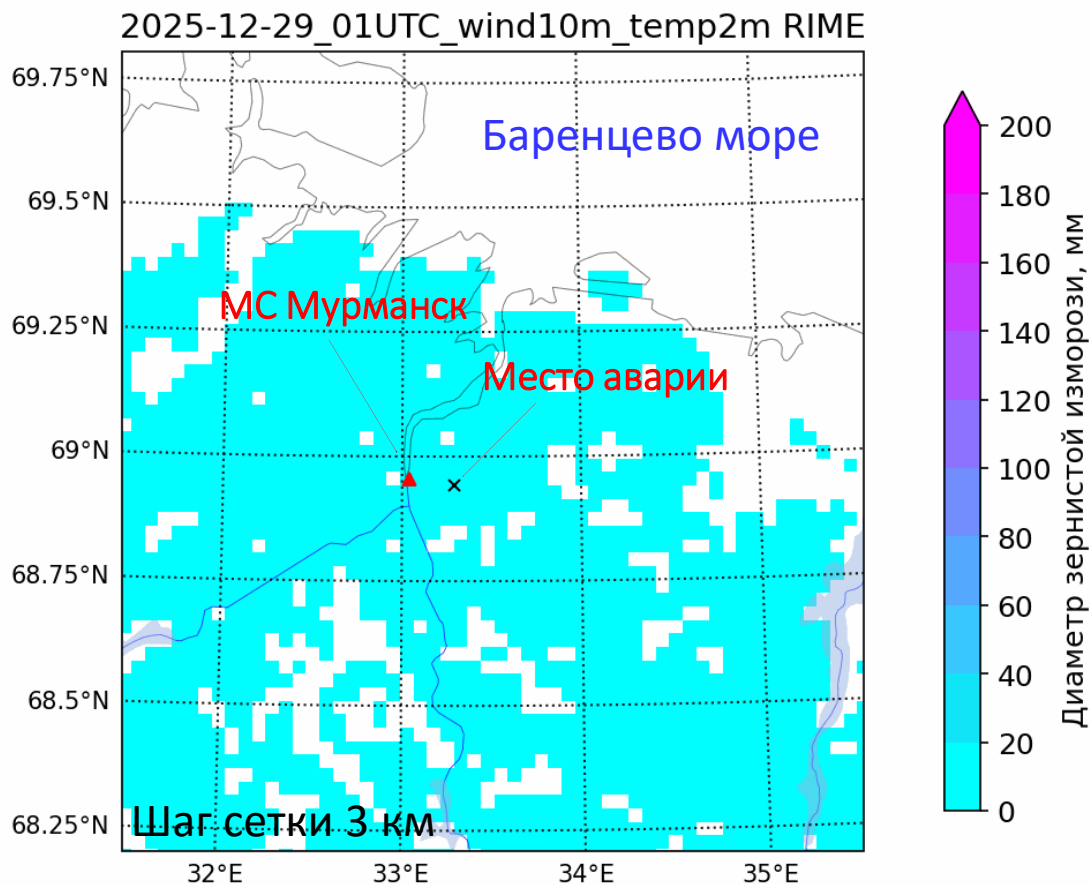


15 января 2026 года,
Метеостанция Мурманск

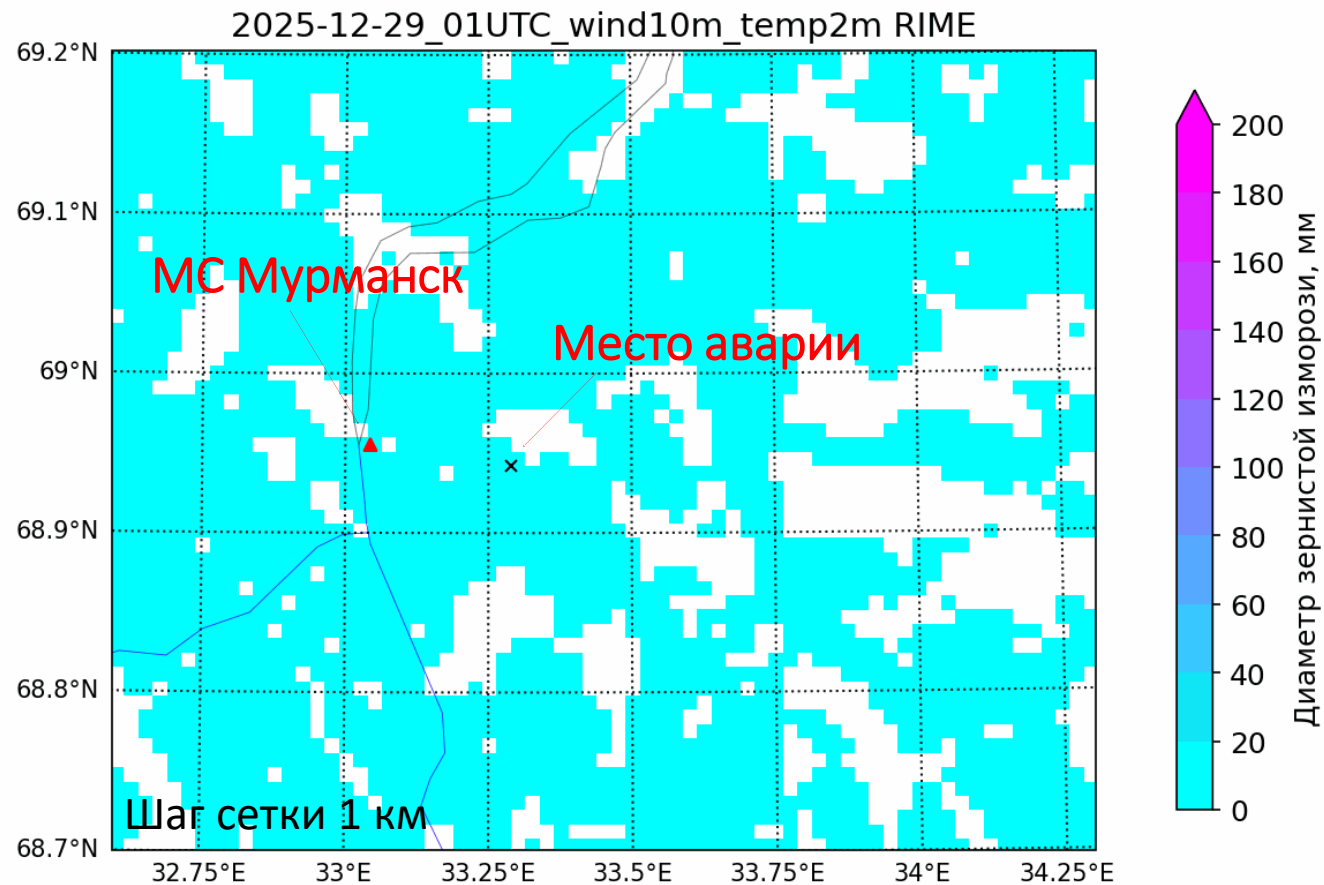
толщина стенки гололеда	bэ=	10.43	мм	
толщина стенки гололеда с учетом малого димаетра	bэ=	8.27	мм	
диаметр провода, мм	d=	5		
масса отложения, кг	m=			
плотность г-и отложения, г/см3	ρ=	0.2		
большой диаметр, мм	A=	70		
малый диаметр, мм	C=	30	C(расчетный)=	42



Сравнение данных наблюдений на метеостанции Мурманск и данных численного моделирования с использованием WRF-ARW. 28 декабря – 4 января 2026 года.



толщина стенки гололеда	bэ=	43.05	мм	
толщина стенки гололеда с учетом малого димаэтра	bэ=	34.65	мм	
диаметр провода, мм	d=	5		
масса отложения, кг	m=			
плотность г-и отложения, г/см3	ρ=	0.2		
большой диаметр, мм	A=	250		
малый диаметр, мм	C=	100	C(расчетный)=	150
скорость ветра, м/с	Vr=			



Результаты моделирования зернистой изморози, образовавшейся на территории Кольского полуострова в конце декабря-начале января 2026 года.

Спасибо за внимание!