

Наукастинг метеорологических параметров и явлений и опыт его практической реализации

Киктёв Д.Б., Гидрометцентр России

09.06.2026

- Термином **«наукастинг»** в 80-х годах прошлого века английский метеоролог Кит Браунинг обозначил прогноз осадков на основе экстраполяции последовательности радиолокационных изображений.
- Это исходное определение подчеркивало роль наблюдений как информационной основы наукастинга и роль экстраполяции наблюдаемых тенденций как его методологической основы.

Ориентировочные требования к наблюдательной сети по данным ресурса OSCAR WMO

OSCAR Application Areas

- 1.1 Sun, Heliosphere and Solar Wind Forecasting and Monitoring
- 1.2 Energetic Particle and Magnetosphere Forecasting and Monitoring
- 1.3 Ionosphere, Thermosphere and Geomagnetic Field Forecasting and Monitoring

- 2.1 Global Numerical Weather Prediction and Real-time Monitoring
- 2.2 High-Resolution Numerical Weather Prediction
- 2.3 Nowcasting / Very Short-Range Forecasting
- 2.4 Sub-Seasonal to Longer Predictions
- 2.5 Atmospheric Climate Monitoring
- 2.6 Atmospheric Composition Forecasting and Monitoring
- 2.7 Atmospheric Composition Information Services in Urban and Populated Areas
- 2.8 Aeronautical Meteorology
- 2.9 Agricultural Meteorology

- 3.1 *Ocean Forecasting and Real-Time Monitoring*
- 3.2 *Coastal Forecasting*
- 3.3 *Oceanic Climate Monitoring and Services*
- 3.4 Tsunami Monitoring and Detection
- 3.5 Marine Environmental Emergency Response
- 3.6 Maritime Safety (ports to open ocean)
- 3.7 Ocean Biogeochemical Cycles

- 4.1 Hydrological Forecasting and Real-time Monitoring
- 4.2 Hydrological and Terrestrial Climate Monitoring
- 5.1 Terrestrial Cryosphere Forecasting and Monitoring
- 5.2 Sea-Ice Forecasting and Monitoring
- 5.3 Cryospheric Climate Monitoring

- 6.1 Earth System Forecasting and Monitoring
- 6.2 Understanding Earth System Processes

**(OSCAR = Observing Systems
Capability Analysis
and Review Tool)**

<https://space.oscar.wmo.int/applicationareas>

Перечень параметров наукастинга и сверхкраткосрочного прогноза по данным ресурса OSCAR BMO

Subdomain	Variables		
Basic atmospheric	Air temperature (near surface) Integrated Water Vapour (IWV) Wind speed (near surface)	Atmospheric temperature Height of the tropopause Temperature of the tropopause Wind vector (near surface)	Height of the top of PBL Specific humidity Wind (horizontal) Wind (vertical)
Clouds and precipitations	Accumulated precipitation Cloud top height Precipitation intensity at surface (liquid or solid) Cloud to Ground lightning density	Cloud base height Cloud top temperature Precipitation intensity at surface (solid)	Cloud cover Cloud type Total lightning stroke density
Aerosols and radiation	Aerosol column burden Earth surface albedo	Downward short-wave irradiance at Earth surface	Downward long-wave irradiance at Earth surface
Ocean	Dominant wave direction Sea surface temperature	Dominant wave period	Ocean surface currents (vector)
Land surface	Fire fractional cover Normalised Difference Vegetation Index (NDVI)	Fire temperature Snow cover Wind gust	Land surface temperature Soil moisture at surface Snow depth
Sea Ice	Sea-ice concentration		

В реестре OSCAR задается диапазон требований к наблюдательной сети – от минимальных до целевых перспективных значений

Требования для наукастинга осадков и ветра

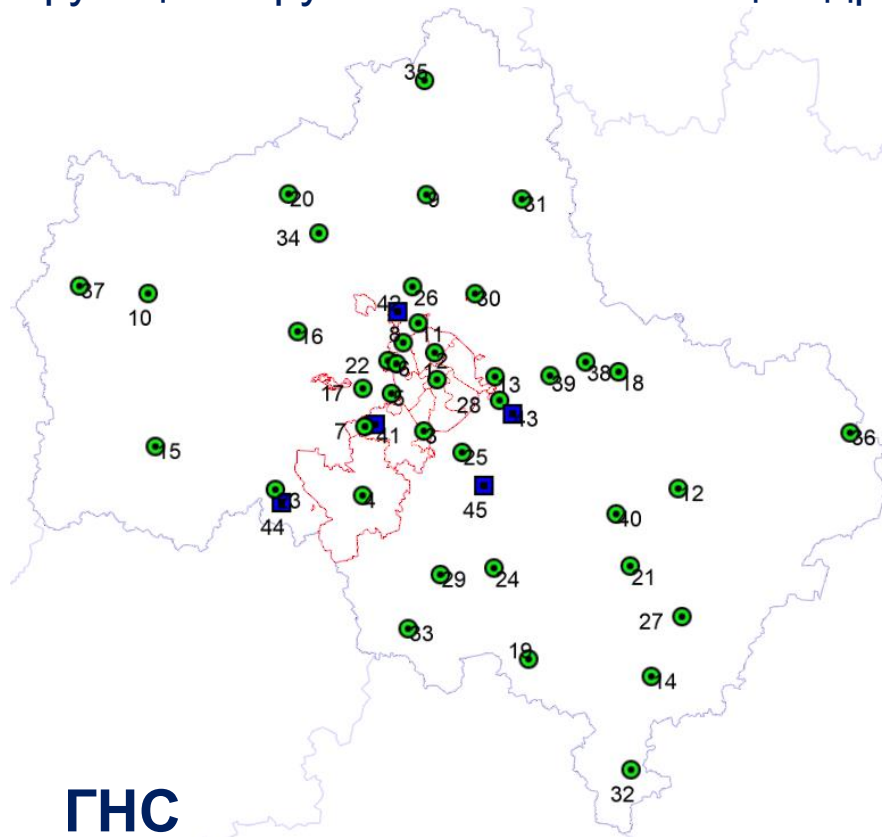
(<https://space.oscar.wmo.int/applicationareas>)

Variable	Horizontal Resolution	Observing Cycle	Uncertainty
Air temperature (near surface)	1 km	10 min	0.5 K
	5 km	30 min	0.7 K
	20 km	60 min	2 K
Precipitation intensity at surface (liquid or solid)	1 km	5 min	0.1 mm/h
	5 km	10 min	0.3 mm/h
	30 km	60 min	1 mm/h
Precipitation intensity at surface (solid)	1 km	10 min	0.1 mm/h
	10 km	30 min	0.3 mm/h
	50 km	3 h	1 mm/h
Wind speed (near surface)	1 km	5 min	1 m/s
	5 km	15 min	1.4 m/s
	20 km	60 min	3 m/s
Wind gust	1 km	60 sec	1 m.s ⁻¹
	5 km	10 min	1.7 m.s ⁻¹
	20 km	60 min	5 m.s ⁻¹

Примечание: три строки на параметр – это целевой, «продвинутый» и минимальный уровни

В какой степени имеющаяся сеть удовлетворяет требованиям OSCAR ?

Государственная наблюдательная сеть (ГНС): 9 станций в Москве и 36 в МО. Помимо ГНС ЦУГМС установило 11 АМС на территории Москвы и 53 АМС на территории МО при поддержке Правительства Москвы. В городе и МО также функционируют несколько станций других ведомств



ГНС

Расстояние между станциями:
на территории Москвы ~ 16.9 км,
в МО (вне Москвы) ~ 35 км.



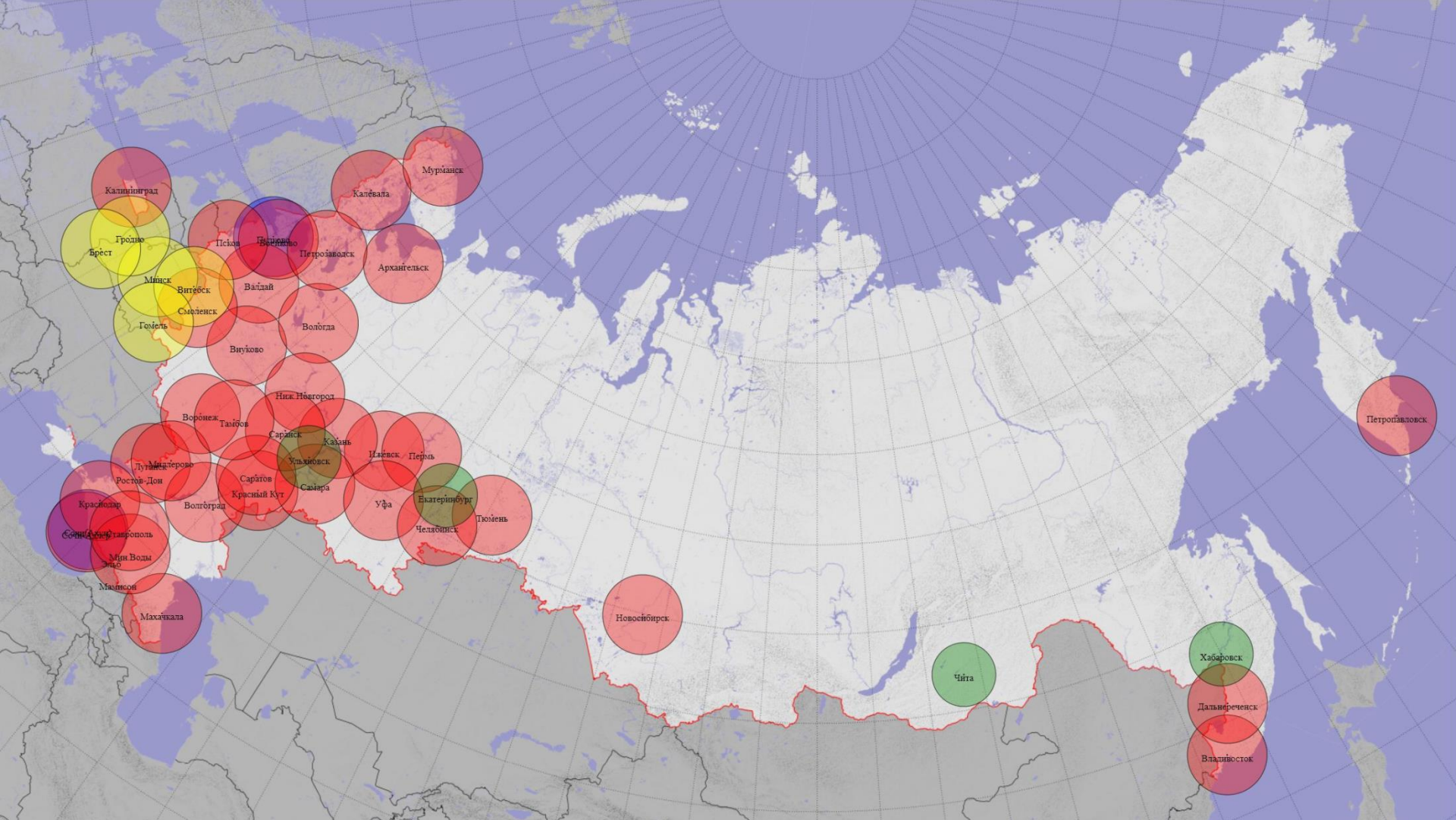
Объединенная сеть

Расстояния между станциями:
на территории Москвы ~ 10.8 км,
в МО (вне Москвы) ~ 22.3 км.

В какой степени имеющаяся объединенная сеть удовлетворяет требованиям OSCAR ?

	Москва	Московская область
Мониторинг климата	Уверенный «продвинутый» уровень. Приближается к целевому уровню для приземной температуры, относительной влажности, приземного ветра и давления	«Продвинутый» уровень для атмосферных параметров
Глобальный ЧПП и мониторинг в реальном времени	Целевой уровень для приземных температуры и ветра, давления, влажности. <u>«Продвинутый» уровень для интенсивности осадков</u> и накопленных осадков.	«Продвинутый» уровень для приземной температуры, накопленных осадков, ветра, давления и относительной влажности.
ЧПП с высоким разрешением (1-5 км)	«Продвинутый» уровень для приземных температуры и ветра, атмосферного давления, влажности. <u>Базовый уровень для интенсивности осадков</u> и накопленных осадков.	Базовые требования выдерживаются только для вектора приземного ветра и давления.
Наукастинг и сверхкраткосрочный прогноз	<u>Базовый уровень требований – для интенсивности осадков, порывов ветра, скорости и вектора приземного ветра, приземной температуры</u>	<u>Базовый уровень - для интенсивности осадков</u> и вектора приземного ветра

Схема размещения метеорологических радиолокаторов



На ЕТР сегодня 36 ДМРЛ (было 55).

Некоторые особенности радарного композитного поля

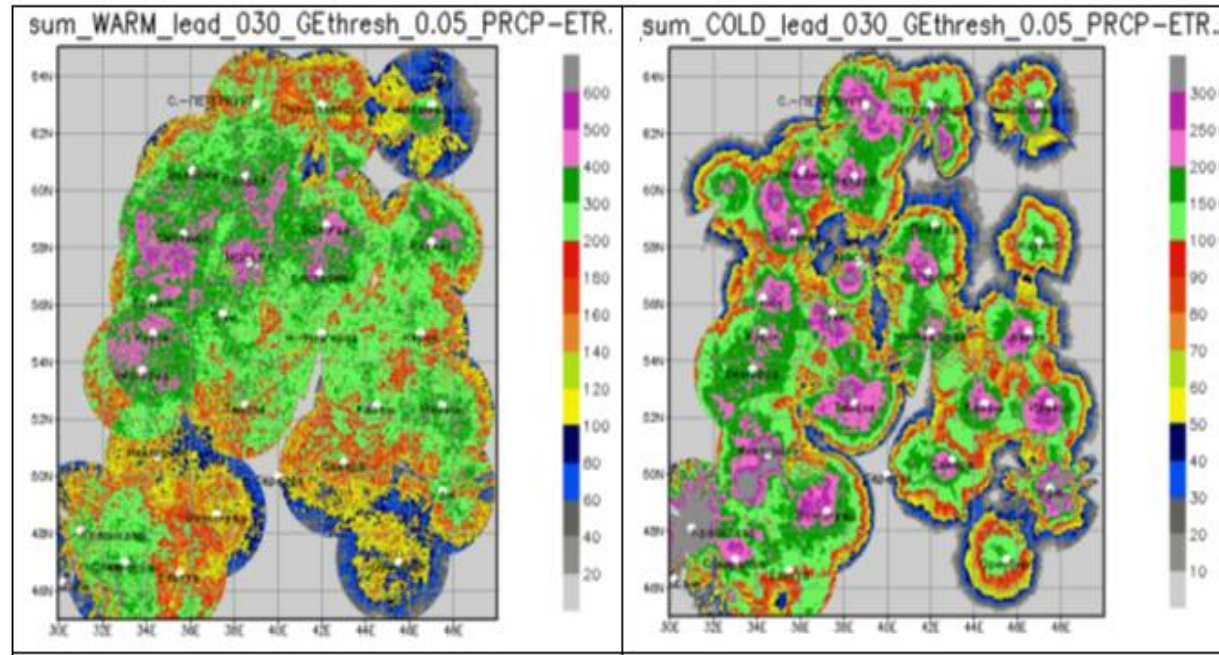


Рис. **Накопленные суммы** радиолокационных осадков:
слева - за **теплый сезон** (май-сентябрь 2020 г.);
справа – за **холодный сезон** (ноябрь-март 2021-2022 гг.)

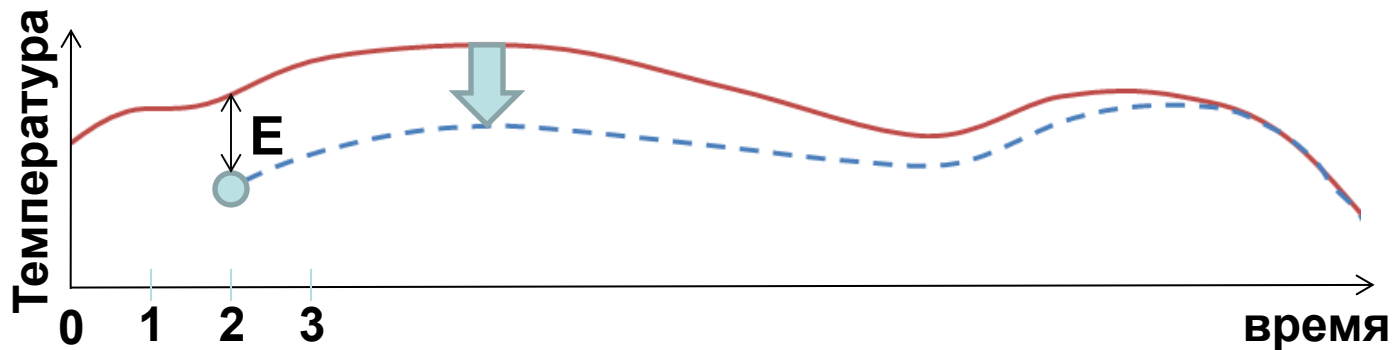
- Наиболее заметное межсезонное различие - разрушение связности композитного поля с концентрацией очагов осадков вокруг локаторов в холодный период.
- В холодный период осадки часто идут из низкой облачности, из-за чего за пределами 100-120 км от локатора осадки могут оказаться не обнаруженными.
- Нужно большее перекрытие зон видимости ДМРЛ-С

Многообразие видов наукастинга

- Широкий спектр систем с различным соотношением статистической экстраполяции наблюдений и численного моделирования;
- Наукастинг «традиционных» метеорологических переменных и специализированный наукастинг (авиация, автодороги и др.);
- «Летний» наукастинг (конвективные явления) и «зимний» наукастинг (тип осадков, видимость и т.д.);
- Наукастинг непрерывных метеорологических переменных и наукастинг полей перемежающихся метеорологических параметров (осадки);
- Локальный наукастинг, наукастинг метеорологических полей, объектно-ориентированный наукастинг;
-

Простой пример локального наукастинга: Коррекция ЧПП по последним наблюдениям

Красная кривая – (мульти-)модельный прогноз температуры от 00 ч.
Синий пунктир – прогноз, скорректированный по наблюдению за 02 ч.
 $E(t)$ – ошибка прогноза с заблаговременностью t .



Прогноз может обновляться с каждым новым наблюдением

Наукастинг полей осадков: Лагранжева инерция и оптический поток

$$R(x_0; t + \tau) = R(x_0 - \alpha(\tau); t), \quad R - \text{интенсивность осадков}$$

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\partial R}{\partial t} + u \frac{\partial R}{\partial x} + v \frac{\partial R}{\partial y}, \quad u = \frac{dx}{dt}, \quad v = \frac{dy}{dt}, \quad dR/dt = 0$$

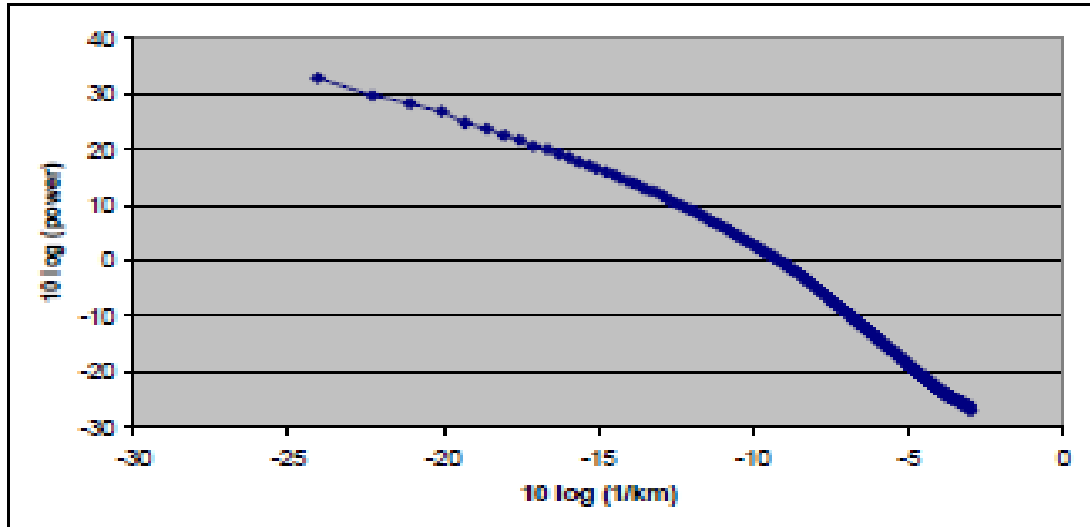
В методах оптического потока u и v оцениваются для заданного местоположения путем численного решения уравнения на основе последовательности полей интенсивности осадков.

После оценки поля движения поле осадков экстраполируется с помощью схемы адвекции.

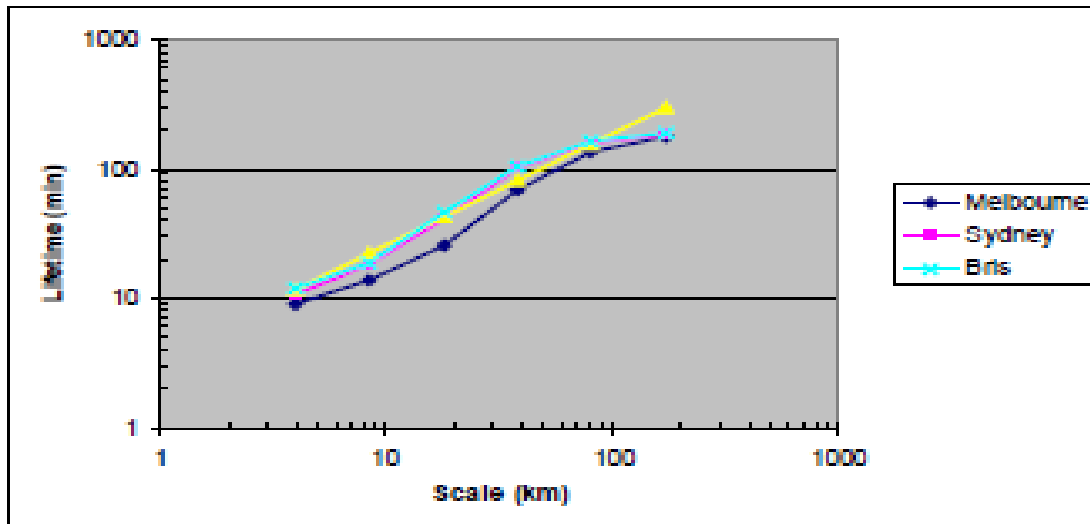
Источники неопределенности

- Ошибки оценки начального состояния: поле осадков и поле скоростей
- Ошибки модели: ограничения лагранжевой инерции

Самоподобие в статистической структуре осадков



Связь масштабов и спектральной мощности

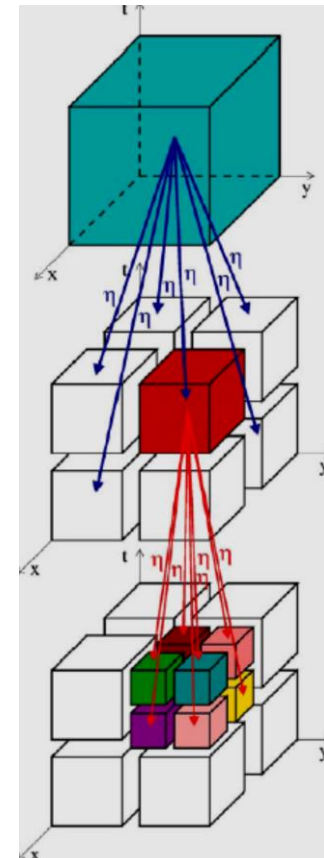
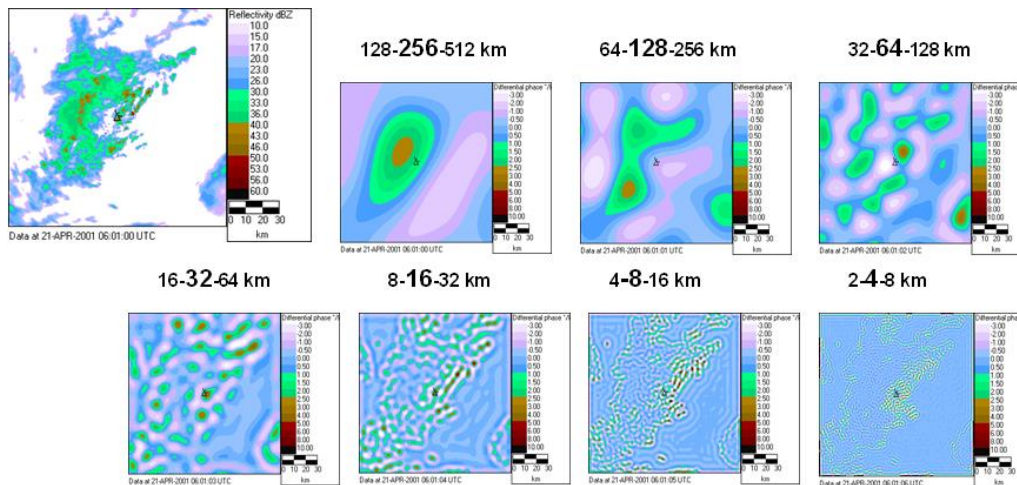


Связь продолжительности существования конвективного облака и его размера.

Такие процессы удобно описывать мультипликативными каскадными моделями.

Схема STEPS: Элементы алгоритма

- Оценка поля адвекции по последовательности смежных по времени радарных полей для экстраполяции переноса;
- Спектральное разложение полей осадков на каскадные составляющие с использованием полосовых фильтров;
- Прогноз временной эволюции для всех каскадных уровней с помощью иерархического набора AR моделей с последующей «сборкой» композитного прогностического поля;
- Прогностический ансамбль строится на основе возмущений интенсивности осадков и поля скоростей.



Более подробно: (S. Pulkkinen et al., 2019), (Bowler N., C.Pierce and A.Seed, 2006)

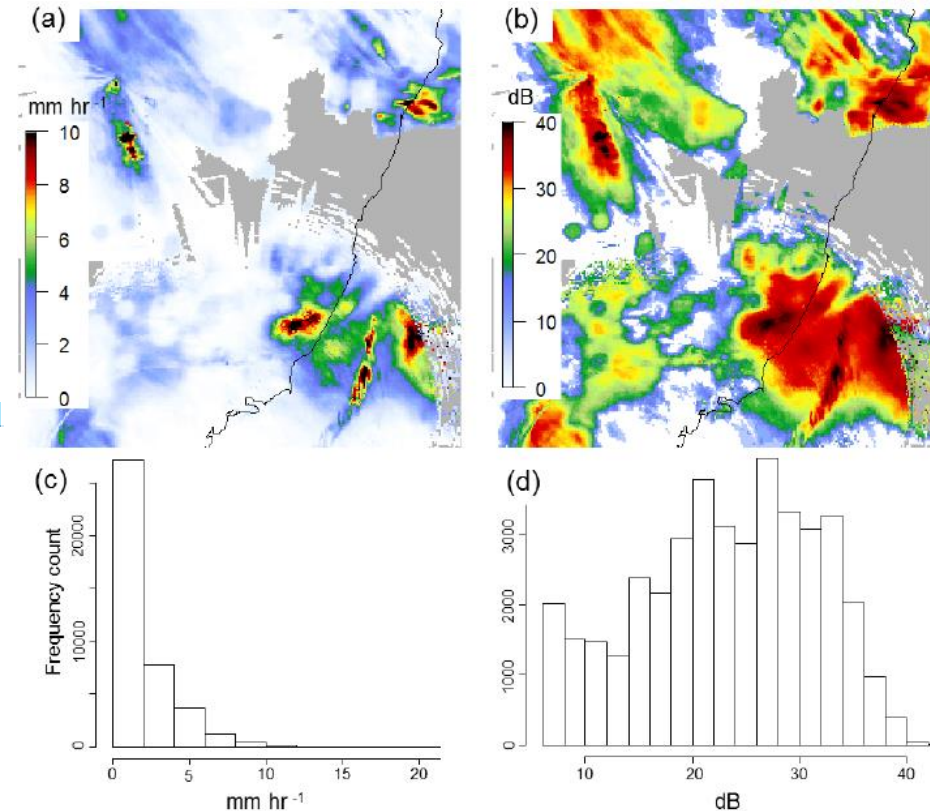
Преобразование данных об интенсивности осадков к логарифмически нормальному распределению

Статистическое распределение интенсивности осадков не является гауссовым. Это затрудняет использование стохастических моделей, предполагающих гауссовость.

$$R_j(x, y, t) = \sum_{k=1}^p \phi_{j,k} R_j(x, y, t - k \Delta t) + \phi_{j,0} \varepsilon_j(x, y, t)$$

Обходной путь - подходящее преобразование данных:

$$R \rightarrow \begin{cases} 10 \log_{10} R, & \text{if } R \geq 0.1 \text{ mm h}^{-1} \\ -15, & \text{otherwise} \end{cases}$$



Общая информация о системе наукастинга осадков

Объект прогноза: Интенсивность и суммы осадков

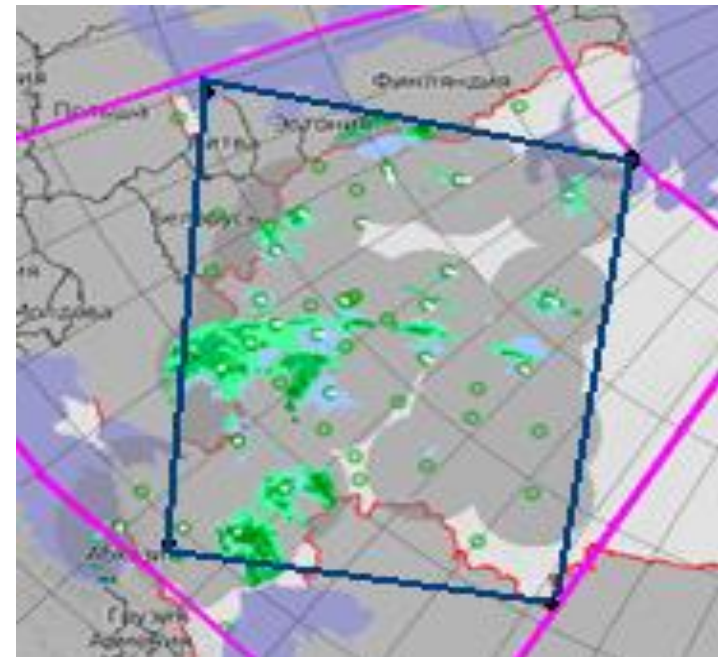
Прогнозы на 2.5 часа с 10-минутной детализацией выпускаются каждые 10 мин.

Ансамбль: 10-20 прогностических реализаций

Расчетное ядро: ruSTEPS

Сетка: шаг 1 км, 2151*1951 узлов

«Эталон» для валидации –
композитные поля данных ДМРЛ-С.



Точечная верификация полей осадков

Пространственная особенность, которая предсказана, но сдвинута относительно наблюдения, приводит к 'двойному штрафу' – за наблюждённое, но не предсказанное, и за предсказанное, но не наблюждённое событие.

«Эталон» – поля данных р/л зондирования.

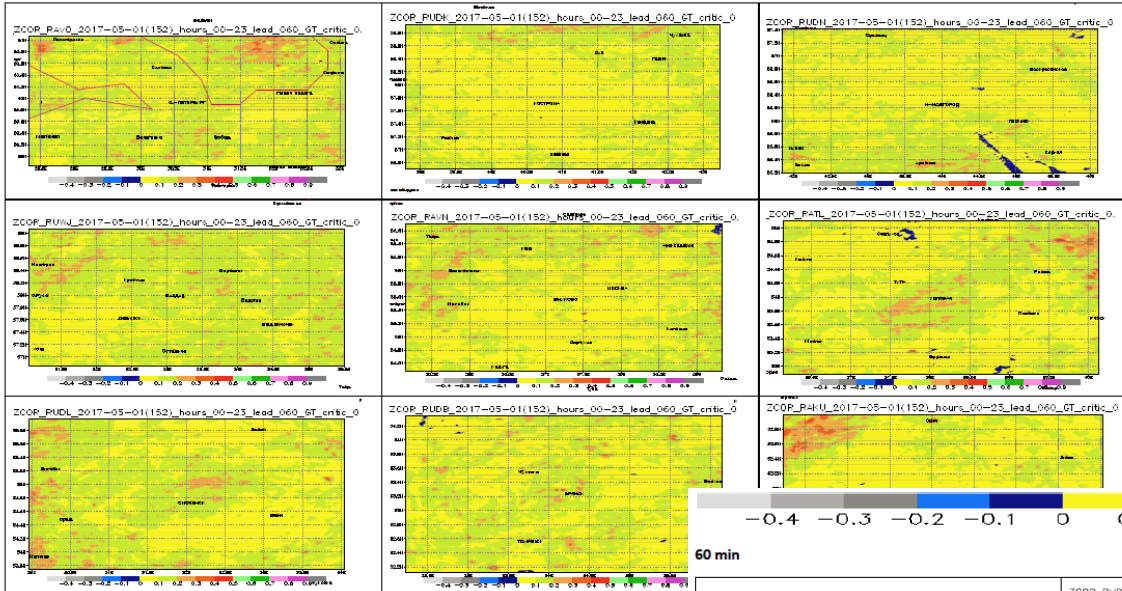
Условная верификация: исключение пар «прогноз-наблюдение» при условии < 0.05 мм/ч для наблюдения и прогноза.

Критический уровень 0.05 мм/ч оставляет 10-15% наблюдений, превращая осадки в относительно редкое явление.

Коэффициент корреляции COR. Заблаговременность – 60 мин.

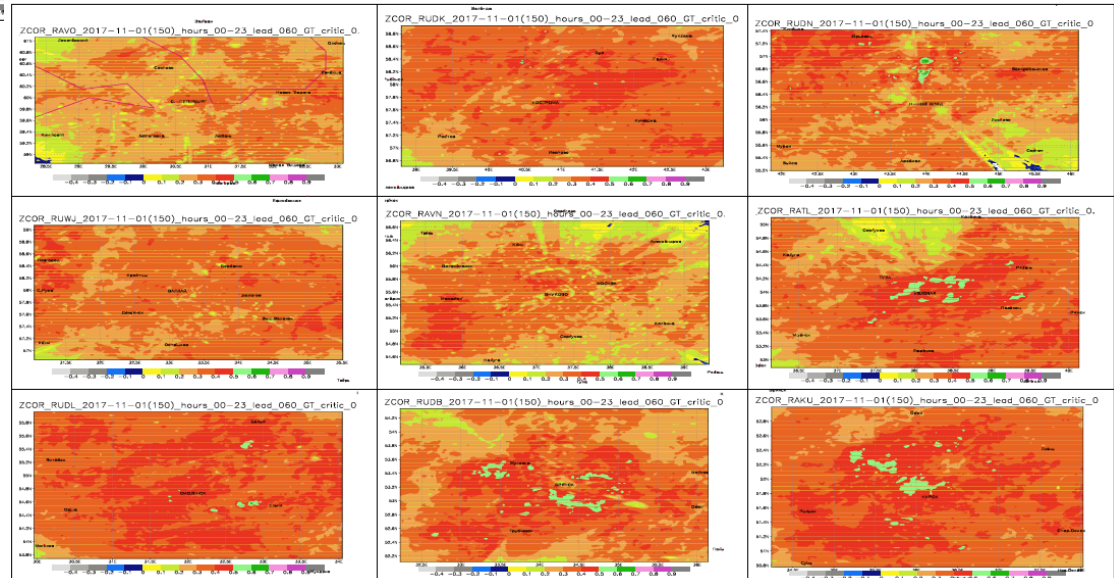


60 min



Лето 2017:
Преобладают значения 0 – 0.2, хотя встречаются и области с уровнем 0.3-0.5...

60 min



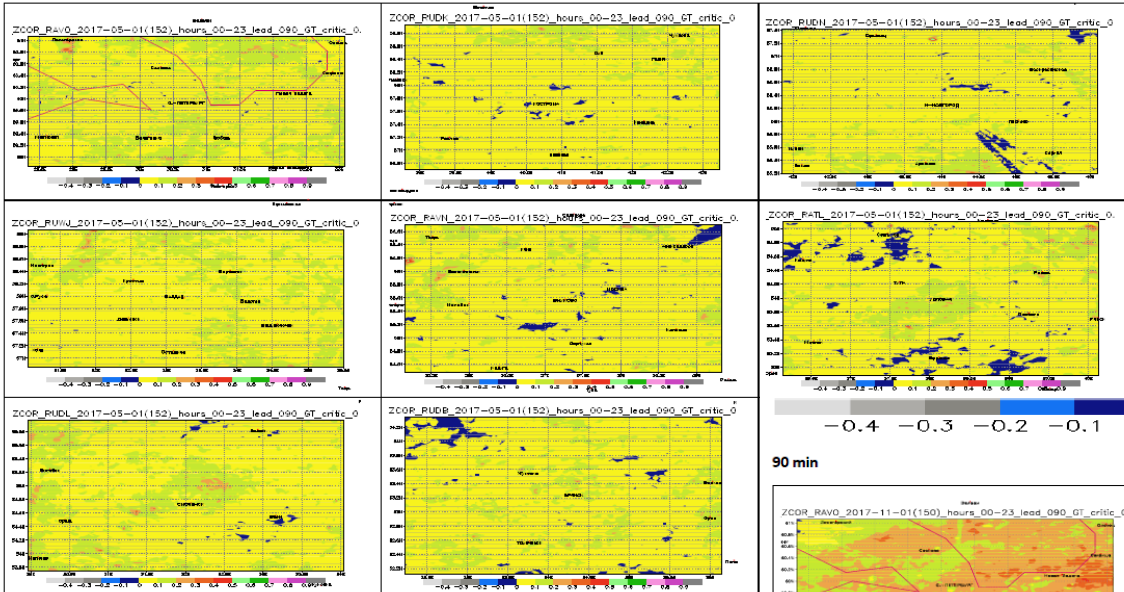
RAVO Воейково	RUDK Кострома	RUDN Н.Новгород
RUWJ Валдай	RAVN Внуково	RATL Тула
RUDL Смоленск	RUDB Брянск	RAKU Курск

Зима: Основные значения в диапазоне 0.1 – 0.5.

Коэффициент корреляции COR. Заблаговременность – 90 мин



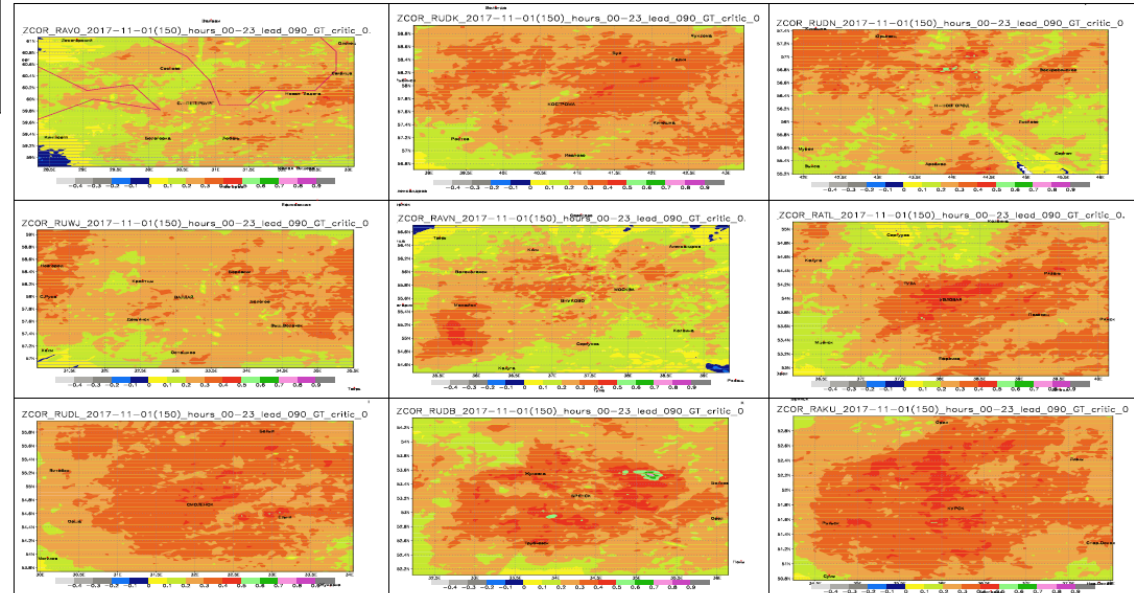
90 min



Лето 2017: Появляются области отрицательных значений



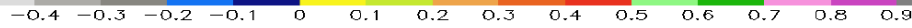
90 min



RAVO Воейково	RUDK Кострома	RUDN Н.Новгород
RUWJ Валдай	RAVN Внуково	RATL Тула
RUDL Смоленск	RUDV Брянск	RAKU Курск

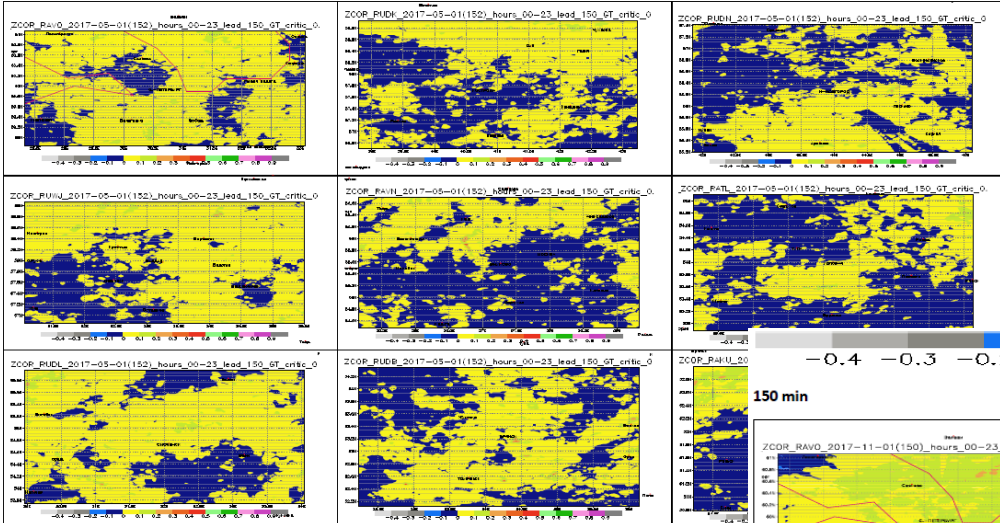
Зима: Преобладают значения 0 – 0.4, хотя встречаются и области с уровнем 0.3-0.5 и выше...

Коэффициент корреляции *COR*. Заблаговременность – 150 мин.

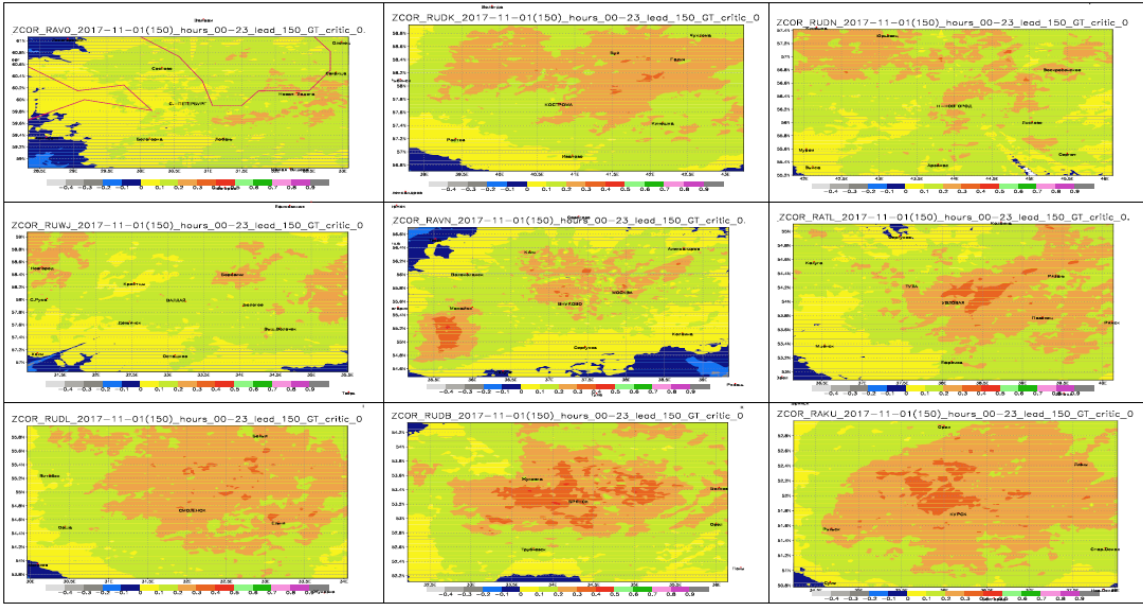


Лето 2017: Практически все поле залито значениями - 0.1...+0.1...

150 min



150 min



RAVO Воейково	RUDK Кострома	RUDN Н.Новгород
RUWJ Валдай	RAVN Внуково	RATL Тула
RUDL Смоленск	RUDB Брянск	RAKU Курск

Зима: Основные значения 0 – 0.3. На углах областей обзора (нет наблюдений!) появляются области отрицательных значений.

MAE для среднего и контрольного членов ансамбля Холодный период: карта показателя

Холодный период

Теплый период

Среднее по ансамблю

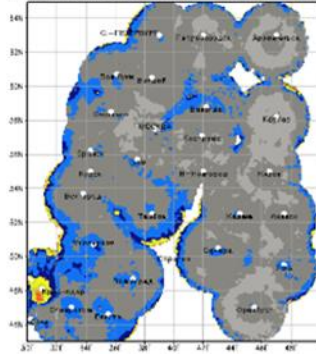
Контрольный член ансамбля

Среднее по ансамблю

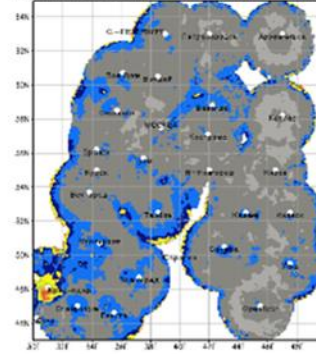
Контрольный член ансамбля

Прогноз на 30 мин

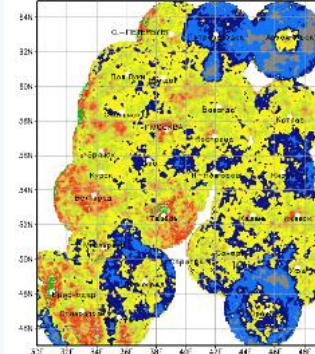
score_mae_COLD_lead_030_imemb_100_new.bin



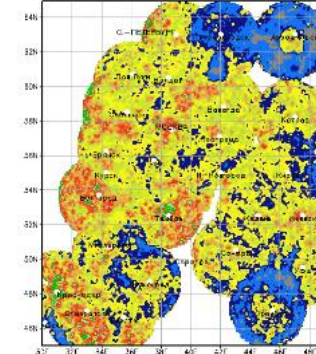
score_mae_COLD_lead_030_imemb_101_new.bin



score_mae_WARM_lead_030_imemb_100_new.bin

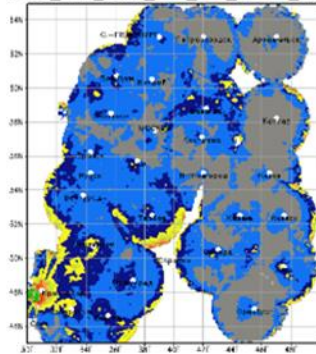


score_mae_WARM_lead_030_imemb_101_new.bin

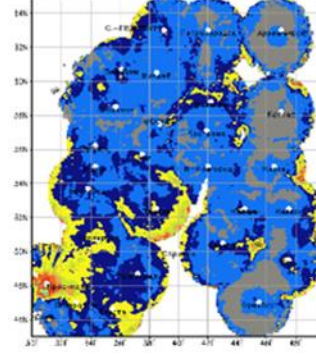


Прогноз на 150 мин

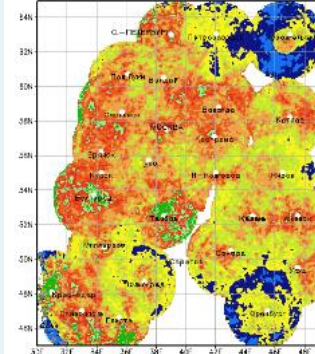
score_mae_COLD_lead_150_imemb_100_new.bin



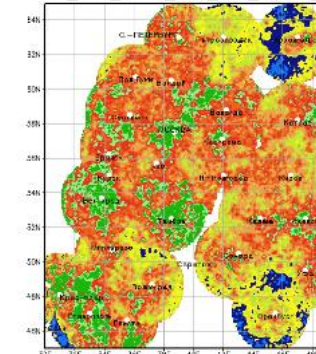
score_mae_COLD_lead_150_imemb_101_new.bin



score_mae_WARM_lead_150_imemb_100_new.bin



score_mae_WARM_lead_150_imemb_101_new.bin



- Рост ошибки (в сторону красного цвета) – с ростом заблаговременности
- Основные ошибки заметно растут по краям
- Ошибка MAE для среднего поля ансамбля немного лучше (больше серого цвета)
- Ошибки в теплый период намного больше, чем в холодный

Критерий Пирса-Обухова (PSS) (на примере порога 0.5 мм/час)

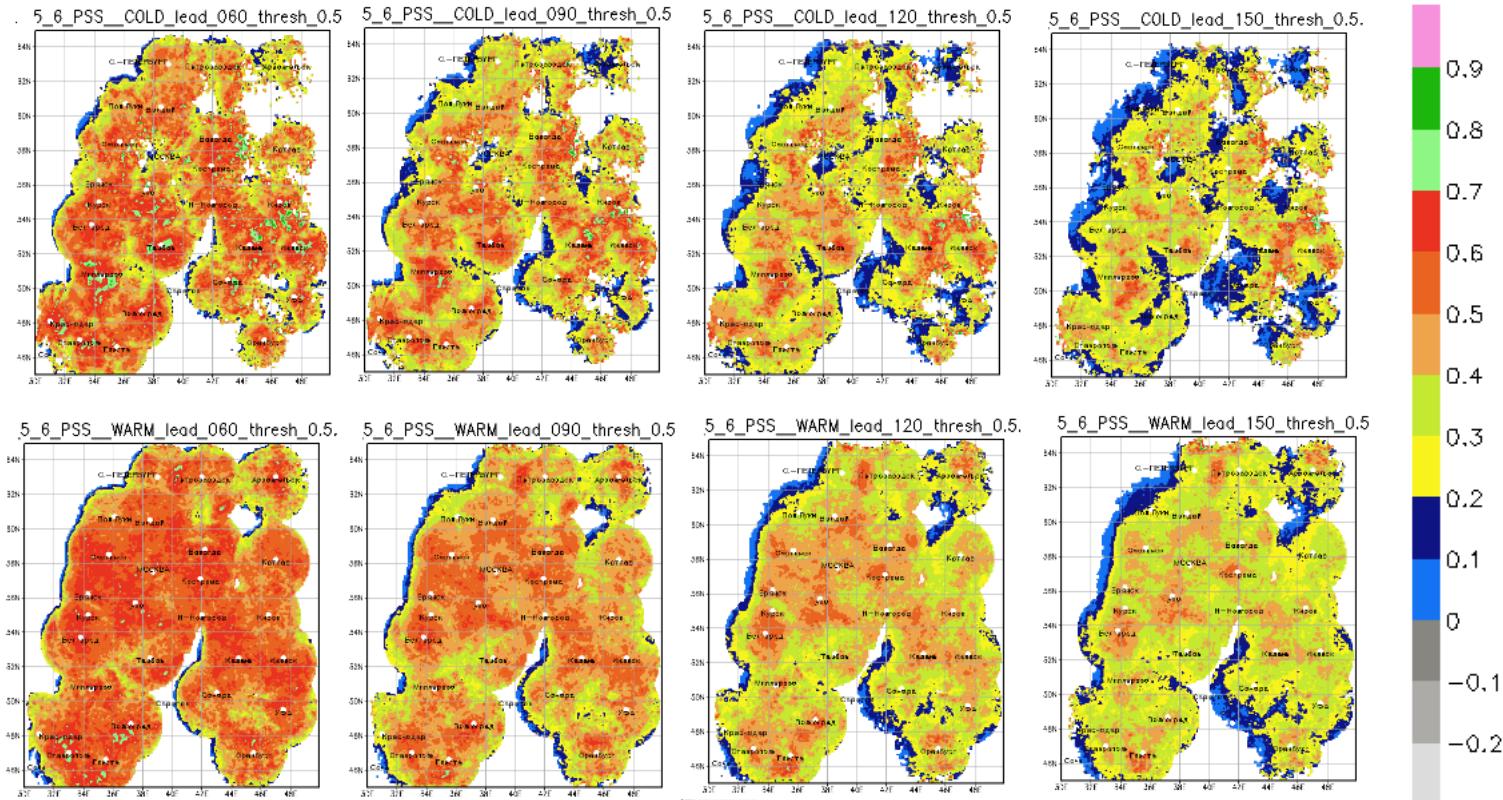
Заблаговременность: 60 мин

90 мин

120 мин

150 мин

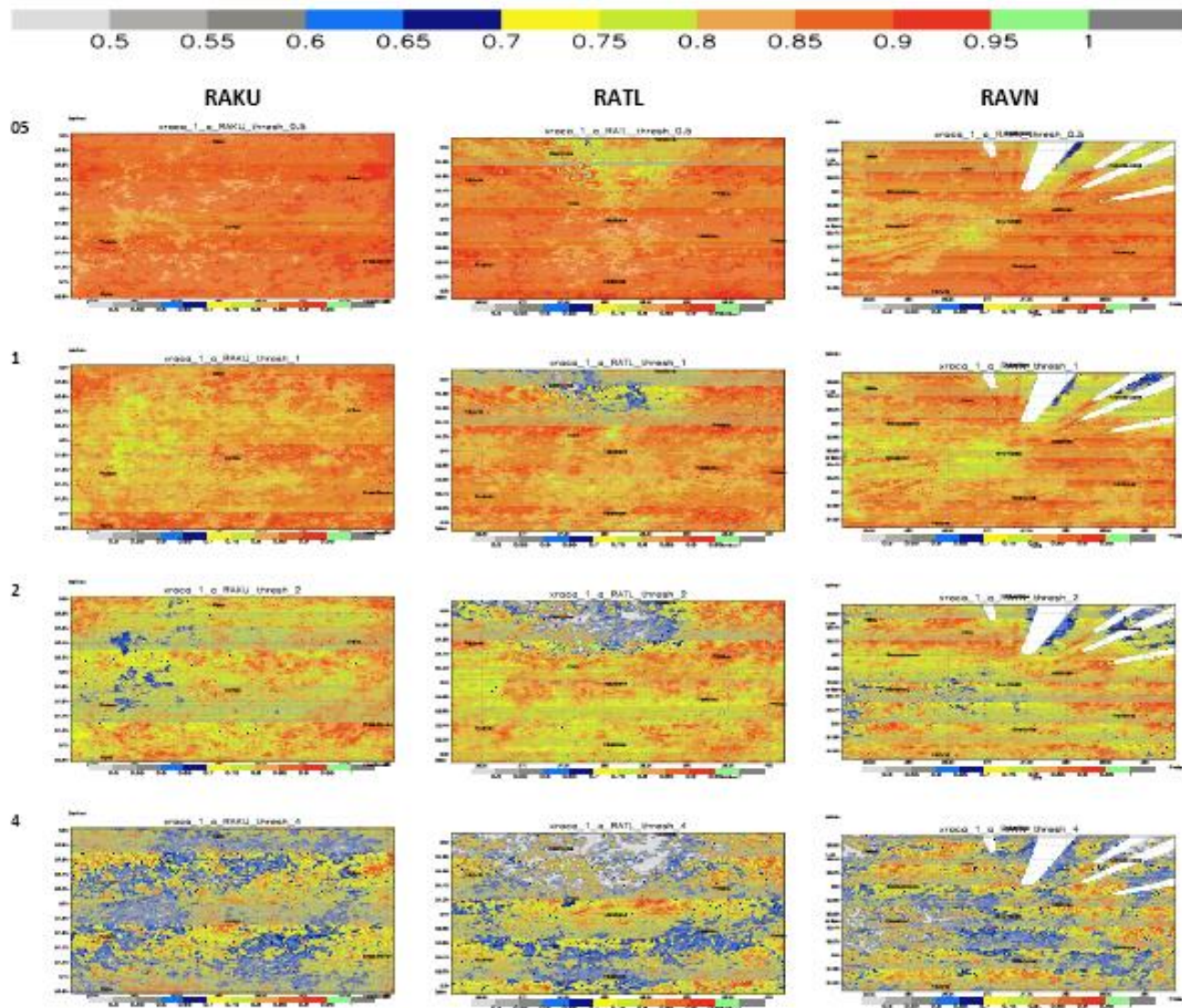
Холодный
период



Теплый
период

С ростом заблаговременности сильнее проявляются граничные эффекты в западной части - рост количества НА вверх по потоку.

Оценки ROC вероятностного наукастинга количества осадков за период 0-60 мин. (май-октябрь 2019 г.)



Сверху вниз –
пороги
0.5, 1, 2, 4 мм/час.

Столбцы
соответствуют
ДМРЛ-С Курск, Тула,
Внуково.

Пояснение: Чем ближе к 1, тем прогноз лучше.
Уровень успешности случайного прогноза = 0.5.

Пространственная верификация: Окрестная оценка качества прогнозов *FSS* - (*Fractions Skill Score*)

- Нельзя принимать буквально детерминированную информацию на тех масштабах, которые являются непредсказуемыми для заданной заблаговременности.
- Оценка *FSS* дает детализированную информацию о прогностических особенностях системы наукастинга на разных масштабах окрестных областей.

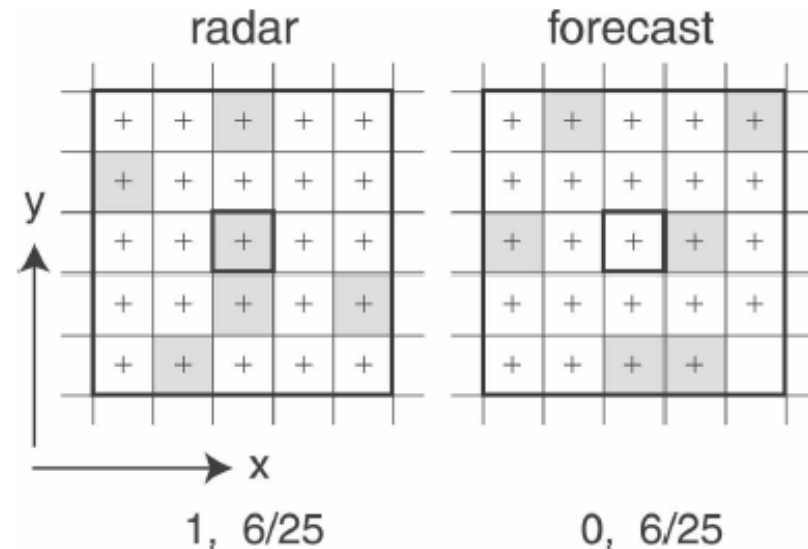


FIG. 2. Schematic example of radar and forecast fractions (see text).

FSS для прогнозов на 60 минут по случайно выбранным 200 срокам из набора «существенных» ситуаций

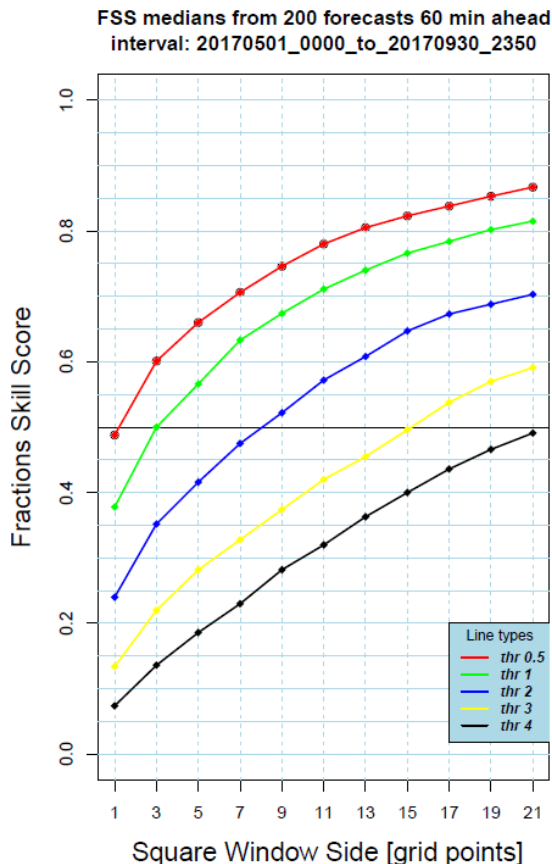
- Выделена горизонталь 0.5 («целевое качество»)

ПРИМЕР анализа для радара RAKU (Курск)

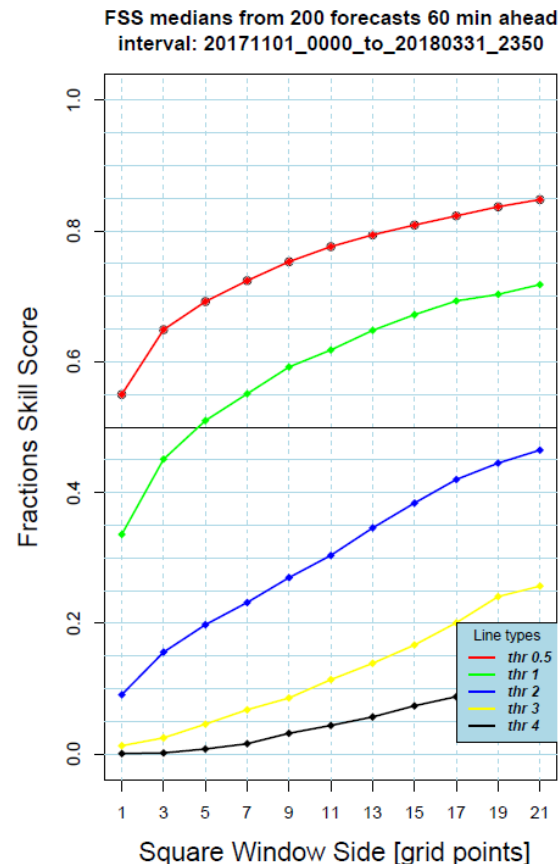
- Для прогноза на 60 мин, порогов интенсивности 0.5, 1, 2, 3, 4 мм/ч и окон со стороной от 1 до 21 точек сетки выявлено заметное превышение качества прогноза в теплый период года для порогов интенсивности от 1 мм/ч и выше над прогнозами в холодный период.

- Оценки по порогу 0.5 мм/ч для обоих периодов сопоставимы.

лето



зима



*Сравнение – чем больше, тем лучше.

Краткое резюме о радарном наукастинге осадков на базе технологии STEPS

- В ходе проведенных испытаний выявлены возможности и ограничения технологии наукастинга STEPS - для теплого и холодного сезонов года получены оценки практической предсказуемости полей интенсивности осадков.
- Интервал полезного прогноза в холодный период составляет в среднем 2-3 часа, в летний период – до 2 ч.

Радарный наукастинг vs Наукастинг на базе ЧПП

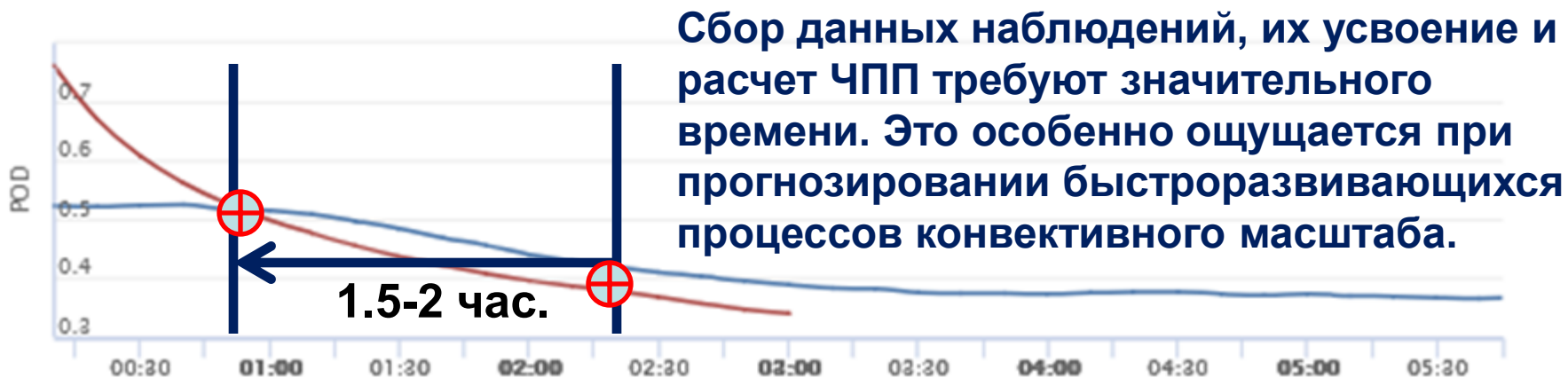
Для наукастинга и сверхкраткосрочного прогноза погоды в Гидрометцентре России подготовлена технология ежечасного выпуска сверхкраткосрочных ЧПП для ЕТР на основе модели COSMO-Ru2By с усвоением данных наземной наблюдательной сети, включая ДМРЛ.

Системы наукастинга на базе ЧПП позволяют прогнозировать эволюцию активной конвекции с использованием фундаментальных законов динамики жидкостей и воспроизводить физические процессы, которые не могут быть представлены в технологиях простой экстраполяции.

Оценки успешности прогноза осадков на базе систем COSMO-Ru2 и STEPS в случае одновременного старта



Оценки практической успешности прогноза осадков на базе прогнозов систем COSMO-Ru2 и STEPS



Некоторые особенности валидации результатов радарного наукастинга осадков

Набор доступных радарных данных может меняться во времени.

Наличие пропусков заставляет использовать маркеры отсутствия числовых значений в радиолокационных полях и в полях прогнозов.

В композитных полях наблюдений среднее количество пропусков равно ~1 млн точек, количество числовых значений ~3,200,000 точек.

Пропуски в полях наблюдений наследуются полями прогноза, переносятся на каждом шаге прогноза и обычно размножаются с ростом заблаговременности. В свою очередь адвекция точек поля с числовыми значениями позволяет заполнять осадками области, которые исходно оказывались «пустыми».

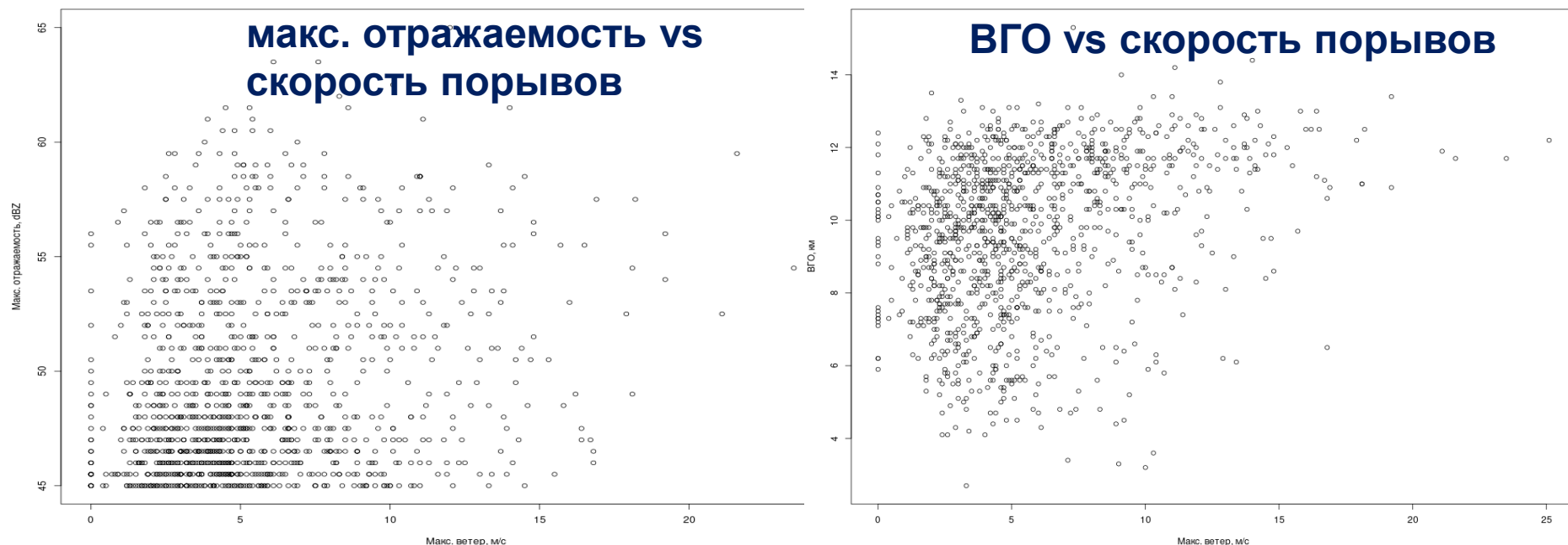
Объемы выборок для верификации могут меняться внутри расчетной области.

Шквалистые усиления ветра: Сложность диагноза и прогноза

Сложность прогноза шквалистых усилений ветра начинается со сложности их диагноза по имеющимся данным наблюдений.

- Приземный слой не попадает в зону видимости радаров.
- Фиксируемые на станциях скорости ветра при порывах могут сильно варьировать от случая к случаю при, казалось бы, близких значениях влияющих параметров (высоты ВГО, отражаемости, влагосодержания и др.) в их окрестности.
- Фиксируемое радаром наличие активной конвекции с весьма высокими значениями радиолокационной отражаемости и высоты верхней границы облачности часто не сопровождается сколько-нибудь существенными порывами ветра на ближайших станциях.

Данные ДМРЛ-С Внуково vs измерения 10-минутных порывов на АМС в зоне его видимости



На сетке данных локатора с шагом 1 км отобраны случаи, когда в радиусе 1.5 км от АМС (порядка ста станций) встречались значения максимальной отражаемости ≥ 45 dBZ. Период – июль-сентябрь 2022 г.

Возможные причины отмечаемого несоответствия между данными:

- Особенности структуры конвективного облака, где области повышенного радиоэха и области максимальных шквалистых усиления скорости ветра пространственно разнесены (так, возникающий при перемещении фронтальных *Cb* фронт порывистости может опережать передний край зоны ливневых осадков на 10–15 км);
- В диагностических алгоритмах остаются неучтенными надлежащим образом какие-то эффекты, связанные со структурой конвективных облаков и их окружением («окружение» включает и подстилающую поверхность);
- Погрешности пространственно-временной привязки радарных данных

Диагноз шквалов в программном комплексе ГИМЕТ-2010

Настройки метеоявлений

Метеоявления Шквалы

Шквал слабый

	Нвго-Нтр	Z3	Zmax
1	0	55	59
2	1	50	59
3	2	45	59
4	3	42	59
5	4	39	59

Шквал сильный

	Нвго-Нтр	Z3	Zmax
1	0	65	62
2	1	60	62
3	2	55	62
4	3	52	62
5	4	49	62

Шквал умеренный

	Нвго-Нтр	Z3	Zmax
1	0	60	60
2	1	55	60
3	2	50	60
4	3	47	60
5	4	44	60

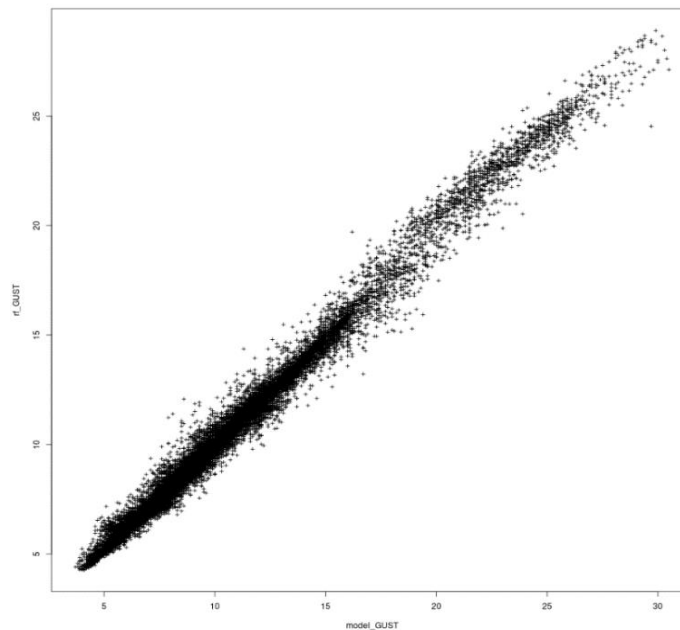
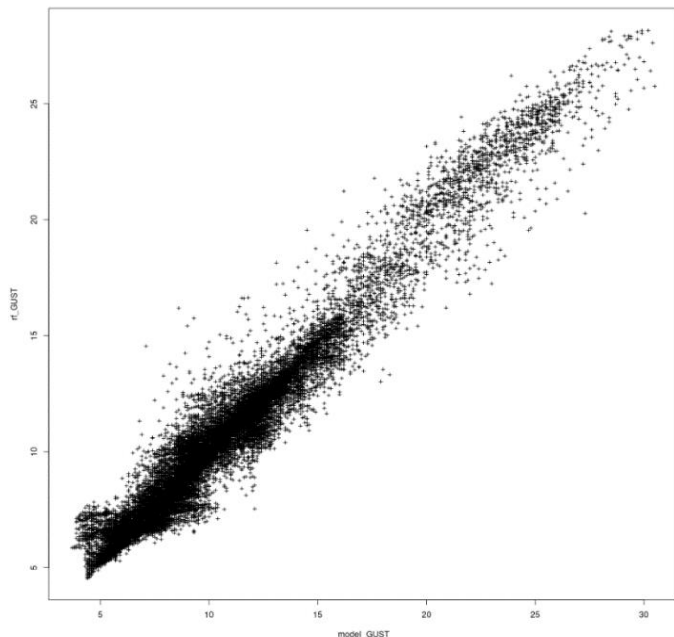
Смерч (торнадо)

Нвго-Нтр	3
Zmax	90
dV	40

Шквалы диагностируются, если отражаемость Z3 на уровне изотермы -15° , максимальная отражаемость в столбе Zmax и высота верхней границы облачности Нвго относительно уровня тропопаузы превышают предписанные пороговые значения.

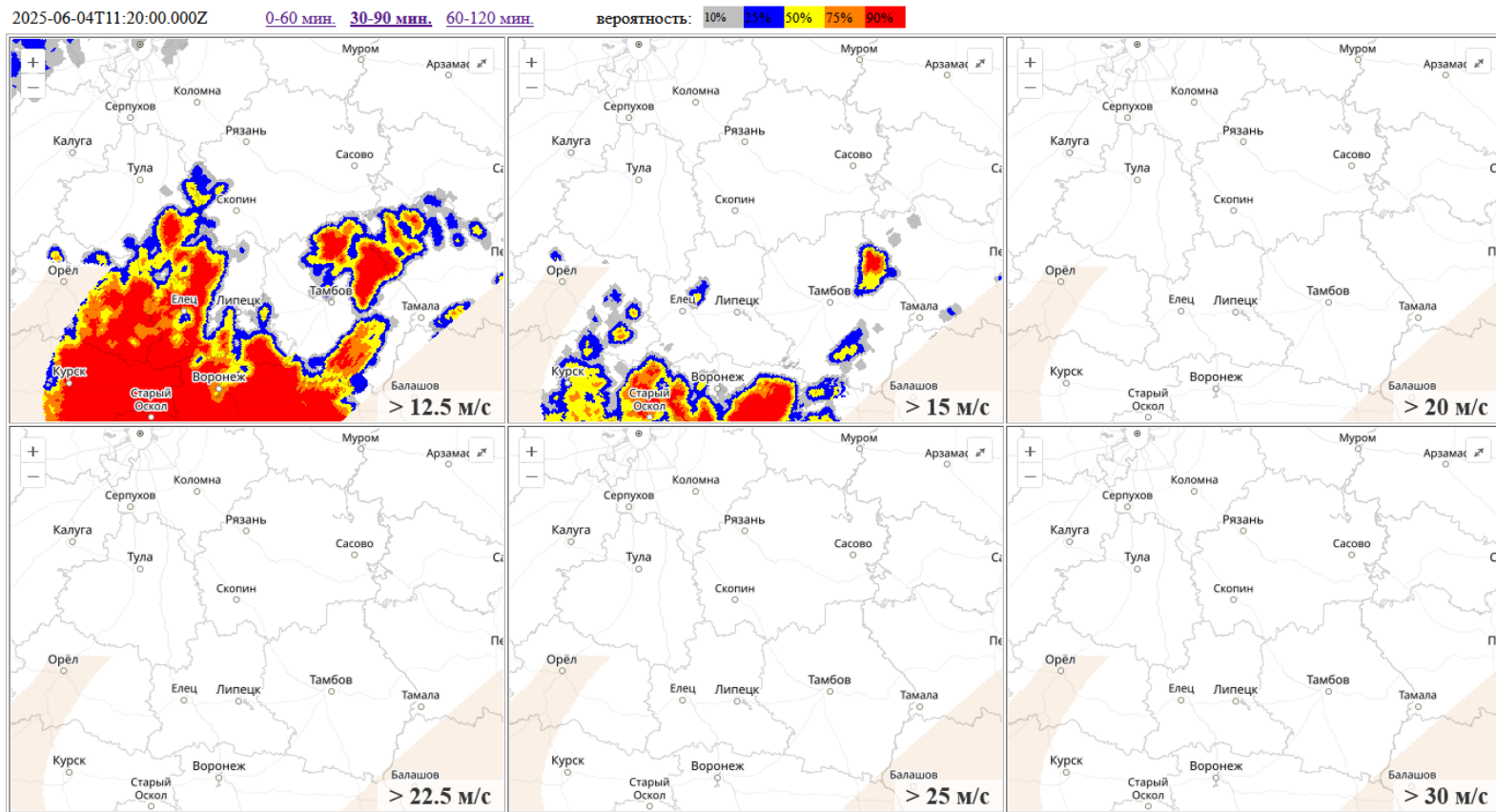
- В ситуации многообразия влияющих факторов и дефицита понимания их взаимосвязей представляется уместным опробовать возможности машинного обучения в задачах диагноза и прогноза шквалов.
- Привлекательной (хотя и неоднозначной) выглядит также возможность заменить скудно представленную наблюдениями «истину» сеточными данными мезомасштабного ЧПП о потенциальных предикторах шквалистых усилений ветра. В предположении, что связь этих модельных предикторов со скоростью порывов отражает реальные связи в атмосфере, можно построить диагностические процедуры средствами машинного обучения на основе выходной продукции ЧПП с тем, чтобы затем использовать построенные связи в задачах радарного диагноза и наукастинга.

Обучение диагностических алгоритмов в предположении «модельной реальности» дает возможность в первом приближении оценить информативность различных потенциальных предикторов шквалов



Точками на диаграммах показаны «спаренные» значения скорости порывов, рассчитанные моделью COSMO-Ru2 (вдоль оси абсцисс), и синхронные значения скорости порывов, восстановленные с помощью машинного обучения (вдоль оси ординат). Слева – без учета ветра на 1 км, справа – с учетом ветра

Пример продукции наукастинга скорости порывов



В качестве предикторов для прогноза используются:

- результаты радиолокационного наукастинга (максимальной отражаемости, скорости и направления ее переноса воздушным потоком, влажность, высоты верхней границы облаков);
- прогнозы фоновых характеристик атмосферы по модели COSMO-Ru2 (высота нулевой изотермы, скорость ветра на различных высотах).

О возможностях валидации прогноза порывов по сообщениям АМС Росгидромета (на примере лета 2024 г. в ЦФО)

Среди примерно 20600 10-минутных сроков обнаружено:

549 сроков с порывами более 15 м/с (менее 3%), в 78% сроков существенные порывы фиксировались только на одной АМС, на двух АМС - в 12% сроков, на трех станциях - в 19-ти сроках и т.д.

119 сроков с порывами более 20 м/с (менее 0.1%), порывы только на одной АМС отмечены в 111 сроках (93% случаев), на двух АМС - в 4-х сроках, на трех и четырех АМС - в двух сроках.

При проверке первой летней серии прогнозов относительно собственных начальных полей при 1-часовом обобщении по времени и пространственном обобщении по окрестностям размером до 40 км, интервал полезной заблаговременности (FSS > 0.5) для порывов более 20 м/с ограничивался прогнозом на скользящий час с 30-минутной заблаговременностью.

Вместо заключения

- Вряд ли наукастинг в его изначальной форме статистической экстраполяции недавних наблюдений можно считать отдельной самостоятельной ветвью прогнозирования. Исторически это, скорее, временное (ad hoc) решение в условиях, когда развитие потенциально более совершенных инструментов усвоения данных и ЧПП не поспевает за потребностями практики.**
- Тем не менее, благодаря простоте реализации и использования, по всей видимости, это «временное решение» окажется весьма долгоживущим.**

Спасибо за внимание !