

УДК 551.509.313+551.509.324.2+551.508.85

**Оперативная технология наукастинга осадков
на основе радиолокационных данных и сравнительные
результаты точечной верификации
для теплого и холодного периодов года**

А.В. Муравьев, Д.Б. Киктев, А.В. Смирнов, М.Ю. Зайченко

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
muravev@mecom.ru*

Представлены результаты испытаний оперативной системы наукастинга осадков Гидрометцентра России в холодный период года (ноябрь 2017 г. – март 2018 г.) на основе данных девяти радиолокаторов Европейской территории России. Эти результаты дополняют предыдущие испытания в теплый период (май – сентябрь 2017 г.). Основное внимание уделено точечной верификации прогностической продукции в сопоставлении с аналогичными оценками качества в теплый период. Показано, что в холодный период наукастинг осадков оказывается более информативным по коэффициенту корреляции (COR) и сопоставим по систематическому смещению (BIAS). Сопоставление по категориальным показателям Пирса – Обухова (PSS) и критического индекса успешности (ETS) привело к неоднозначным выводам для разных порогов интенсивности ввиду того, что в данный период интенсивность осадков была примерно вдвое слабее интенсивности в предыдущий теплый период. Отмечено более сильное влияние помех и иных особенностей радиолокации на результаты верификации в холодный период испытаний.

Ключевые слова: наукастинг осадков, радиолокационные оценки осадков, верификация прогнозов полей осадков, сравнительные характеристики качества прогнозов по теплым и холодным периодам года

**Operational precipitation nowcasting system
based on radar data and comparative pointwise verification
results for the warm and cold seasons**

A.V. Muravev, D.B. Kiktev, A.V. Smirnov, M.Yu. Zaichenko

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
muravev@mecom.ru*

The article presents the results of testing the operational precipitation nowcasting system of the Hydrometcentre of Russia during the cold season (November 2017 – March 2018) based on data of nine radars located on the European territory of Russia. These results supplement the earlier testing for the warm season (May – September 2017). Key attention is given to the pointwise forecast verification compared to the similar quality assessment for the warm period. It is demonstrated that the precipitation nowcasting during the cold season is more informative as against the warm period, when evaluated using the correlation coefficient (COR), and that it is comparable in terms of the systematic bias (BIAS). Given that in the examined period the precipitation intensity

was half the intensity observed in the previous warm season, the comparison based on categorical scores like the Pierce skill score (PSS) and the equitable threat score (ETS) has resulted in ambiguous conclusions for different intensity thresholds. Stronger effects of ground clutters and other radiolocation features on the verification results have been observed for the cold period.

Keywords: precipitation nowcasting, radar precipitation estimates, precipitation field forecast verification, comparative forecast quality characteristics for the warm and cold seasons

Введение

В опубликованной ранее статье [7] описаны особенности развернутой в Гидрометцентре России системы наукастинга осадков, основанной на радиолокационных полях осадков, поступающих от Центральной аэрولوجической обсерватории (ЦАО) [4], и приведены результаты точечной и пространственной верификации прогнозов по девяти радиолокаторам на Европейской территории России за период с 1 мая по 30 сентября 2017 года, условно названный «теплым» периодом года. Расчетным ядром системы является статистическая прогностическая схема STEPS (Short-Term Ensemble Prediction System), построенная как мультипликативный каскад с использованием технологии оптического потока [9].

Решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 01.12.2017 г. было рекомендовано внедрить в качестве основной технологии в оперативную практику Гидрометцентра России «Технологию наукастинга интенсивности осадков на срок до 90 мин в теплый период года». Методологические основы развернутой системы и оценки качества прогнозов были представлены на международной конференции, посвященной столетию со дня рождения академика А.М. Обухова [6].

В течение 2018 г. были проведены испытания схемы наукастинга осадков за период с 1 ноября 2017 г. по 31 марта 2018 г., который будем условно называть «холодным» периодом года, для той же сети из девяти радиолокаторов на Европейской территории России – Курск (RAKU), Тула (RATL), Внуково (RAVN), Воейково (RAVO), Брянск (RUDB), Кострома (RUDK), Смоленск (RUDL), Нижний Новгород (RUDN) и Валдай (RUWJ). Передача данных и прогностическая продукция остались неизменными. Так, прогнозы составлялись каждые 10 минут и представляли собой серии по 15 последовательных прогностических полей с 10-минутной дискретностью. Результаты прогнозов в графическом и цифровом виде накапливались на сервере Гидрометцентра России в виде полей в примерно двухкилометровом разрешении размером 256×256, а наложенные на географическую сетку прогностические поля размещались на веб-сайте Гидрометцентра России с опцией анимации. За отчетный период тестирования количество прогнозов по каждому локатору составило порядка 20 тысяч, примерно такое же, как и в теплый период тестирования, что сделало возможным статистически обеспеченное сопоставление соответствующих оценок.

Параллельно испытаниям по плану НИР в течение 2018 г. были проведены тестовые прогоны обновленной версии схемы STEPS, в которой размер и шаг определяются исходными полями произвольного размера. Возможность увеличения расчетной области за пределы исходной зоны покрытия каждого отдельного локатора позволяет пополнять и взаимно корректировать пересекающиеся области осадков. Был оценен рост затрат при различных факторах: расширениях расчетных областей, подключении новых радиолокаторов и увеличении объемов прогностических ансамблей в наличной вычислительной среде Гидрометцентра России.

В настоящее время проводятся эксперименты с данными 27 радиолокаторов в режиме оперативного поступления информации ДМРЛ-С, при этом расчеты прогнозов с заблаговременностью до 2 ч в области размером 504×504 км занимают не более 5 мин для каждого локатора. Так как данные наблюдений поступают каждые 10 мин, времени на расчет и прорисовку в среде сервера с 32 ядрами хватает для своевременной публикации текущих результатов в виде карт на сайте Гидрометцентра России с опцией анимации. Материалы для испытаний новой версии системы в теплый период планируется накопить в течение 2019 года.

В представленной статье большинство оценок качества сопоставляются по обоим периодам испытаний, однако это касается не всех ранее примененных показателей (например, индекс экстремальной зависимости EDI) и большее внимание уделено так называемому критическому индексу успешности (ETS). Анализ ограничен оценками точечной верификации наукастинга осадков, а объектно-ориентированные оценки, аналогичные предыдущим и рассчитанные также для холодного периода, в настоящую статью не включены. Дело в том, что в период испытаний в дополнение к прежним пространственным оценкам были разработаны и применены новые характеристики качества прогнозов: показатели качества для экстремальных по площади областей осадков (на основе распределения Парето) и для так называемых «пространственных долей» (на основе показателя FSS, Fractions Skill Score). Объем и новизна полученных результатов по пространственной верификации требуют отдельных публикаций.

1. Объемы данных и характеристики точечной верификации

В табл. 1 приведено точное количество накопленных и использованных полей наблюдений и прогнозов по всем радиолокаторам. Звездочкой отмечены локаторы с нарушением передачи данных из-за длительных технических аварий, устранение которых занимало иногда до 15 суток. Заметное снижение количества прогнозов в теплый период было вызвано недостатками организации оперативного счета на сервере Гидрометцентра России, такими как несинхронность потоков входных данных и нехватка оперативной памяти при параллельном счете прогнозов.

В оба периода испытаний качество точечных прогнозов интенсивности осадков оценивалось только для тех пар прогнозов и наблюдений,

в которых хотя бы одно значение превышало 0,05 мм/ч. Ограничение интенсивности сокращает объем выборки верификации до 10–15 % от полного объема, а ограничение верификации полем размера 126×126 – до 24 % точек общей области.

Таблица 1. Количество наблюдений (радарных полей) и прогнозов за теплый (01.05.2017 – 30.09.2017) и холодный (01.10.2017– 31.03.2018) периоды
Table 1. Number of observations (radar fields) and forecasts during warm (01.05.2017 – 30.09.2017) and cold (01.10.2017– 31.03.2018) periods

Локаторы	Теплый период		Холодный период	
	Максимальное количество сроков: 22032 = 153 сут × 144 обзора		Максимальное количество сроков: 21744 = 151 сут × 144 обзора	
	Количество	%	Количество	%
RAKU	21843/19436	99/88	21041/20793	97/96
RATL	*19124/16925	87/77	*20225/19860	93/91
RAVN	21866/19430	99/88	21539/21314	99/98
RAVO	*20322/17896	92/81	*19753/19507	91/90
RUDB	*19633/17367	89/79	21436/21261	99/98
RUDK	21803/19466	99/88	21327/21124	98/97
RUDL	21495/19118	98/87	21219/21014	98/97
RUDN	21846/19407	99/88	21183/21009	97/97
RUWJ	21879/19474	99/88	21451/21257	99/98

Примечание. * Сбои и аварии на локаторах максимальной длительностью до 15 суток. The asterisk denotes technical radar failures and breakdowns, with up to 15 days duration.

В представленной статье используются следующие показатели из трех групп характеристик, перечисленных в [7]:

1) общие статистические характеристики: **ACCU** – накопленная сумма осадков;

2) показатели для непрерывных предиктантов: **ME** – средняя ошибка; **COR** – коэффициент корреляции;

3) показатели для категоризованных предиктантов: **BIAS** – систематическое смещение; **PSS** – критерий Пирса-Обухова; **ETS** – критический индекс успешности относительно случайного попадания, или критерий Гилберта GSS).

Для простейшего описания пространственного распределения показателей качества используются суммарные статистики показателя по соответствующему полю: **min** – минимальное значение; **q25** – квантиль 25 % (первый квартиль); **med** – медиана (второй квартиль); **mean** – среднее арифметическое значение; **q75** – квантиль 75 % (третий квартиль); **max** – максимальное значение; **IQR** – интерквартильный размах ($q75 - q25$); **std** – стандартное отклонение; **NA's** – количество точек поля с вырожденными значениями (inf, NaN); **valid** – количество точек с невырожденными значениями.

Все перечисленные показатели рассчитываются с помощью модуля verification и встроенной функции summary языка R, а поля показателей качества визуализируются с помощью графического пакета Grads.

2. Поля и пространственное распределение показателей качества

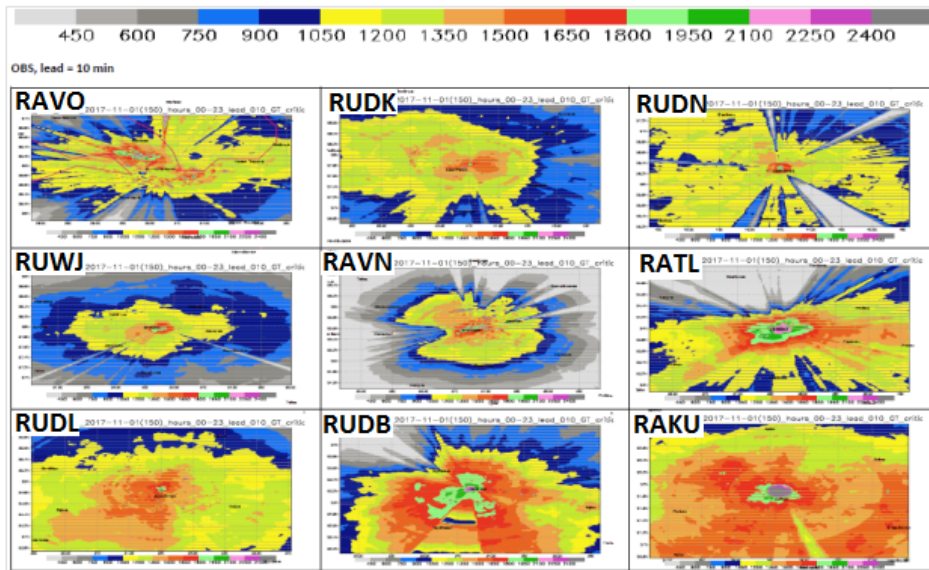
2.1. Накопленная сумма осадков (ACCU)

Накопленные за длительное время прогностические и фактические осадки являются важной климатологической характеристикой качества системы наукастинга и обычно используются для калибровки самих радиолокационных данных [4]. Ввиду того, что суммы радарных и прогностических осадков выражены в мм/ч (а обновление информации происходит каждые 10 мин), то для сравнения с реальной климатологией результаты суммирования должны быть уменьшены в шесть раз при расчете таких характеристик, как ACCU и ME.

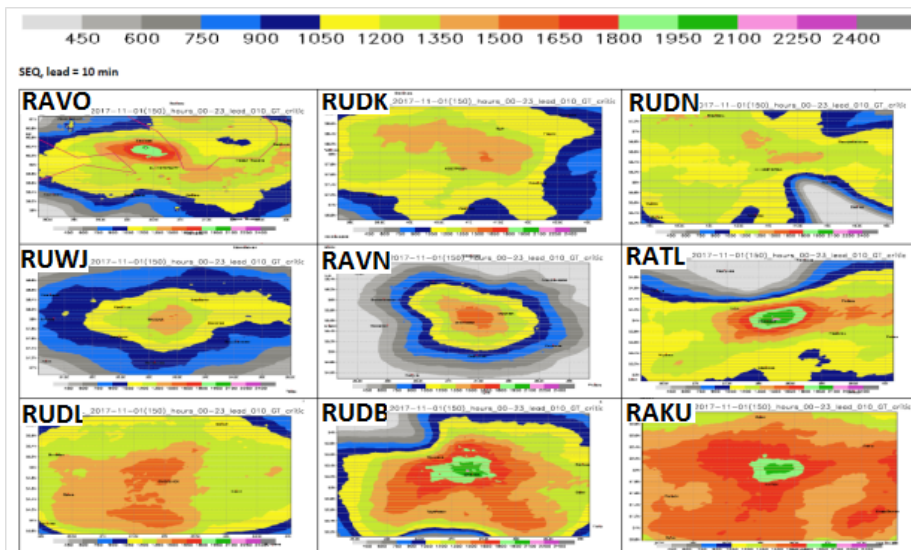
Рассмотрим накопленные за весь период суммы радиолокационных осадков и результаты прогноза на первые 10 мин (рис. 1).

Во-первых, отчетливо видно, что пространственная структура большинства зон осадков сильно искажена влиянием местных препятствий (местников). При этом пространственные структуры сходны с аналогичной графикой для теплого периода испытаний (рис. 1, [7]), а большее проявление местников в холодный период обусловлено, главным образом, примерно в два раза меньшей интенсивностью осадков в холодный период, как отчетливо видно на рис. 2 для локатора RAVN. Во-вторых, в холодный период практически повсеместным явлением оказывается наличие кольцевой структуры со снижением суммы осадков при удалении от координат локатора. Эти кольцевые структуры, проявляющиеся и в большинстве полей рассчитанных показателей, возможно, вызваны либо систематическим ослаблением радиоизлучения в осадках, зависящим как от физических свойств атмосферы, так и от длины пути прохождения радиолуча [3, 5], либо особенностями оценок интенсивности осадков в программном комплексе ГИМЕТ (ЦАО), либо какими-то иными причинами. В картах накопленных сумм за предыдущий (теплый) период похожие кольцевые структуры не просматриваются.

Сравнение значений сумм радарных осадков с фактической климатологией возможно только по небольшому количеству станций с приведением значений к сопоставимому временному интервалу. Здесь воспользуемся данными по московской станции ВДНХ, для которой суммы осадков за пять месяцев выделенного периода были равны последовательно 46,4; 86,0; 66,5; 63,5 и 30,6 мм, в сумме 293 мм [3]. Шестикратная сумма для пяти месяцев равна 1758 мм/ч, что попадает в интервал соответствующих значений в центральной части зоны обзора локатора Внуково, лежащих в интервале между 1350 и 1800 мм/ч (рис. 1а, б, панель RAVN).



а)



б)

Рис. 1. Накопленные суммы радарных (а) и 10-минутных прогностических (б) осадков (умноженные на 6) за период 01.10.2017 – 31.03.2018 по радиолокаторам на ЕТР. Единица измерения – [мм], градуировка палитры – [мм·6]. Суммирование проводится по тем срокам, для которых имеются синхронизированные прогнозы с заблаговременностью 10 мин.

Fig. 1. Accumulated radar (а) and 10-min forecast (б) precipitation (multiplied by 6) for the 01.10.2017 – 31.03.2018 period obtained from radars located on the European territory of Russia. The unit of measurement is [mm], the calibration of palette is [mm·6]. Sums are calculated over date and time instants with synchronized 10 min forecasts present.

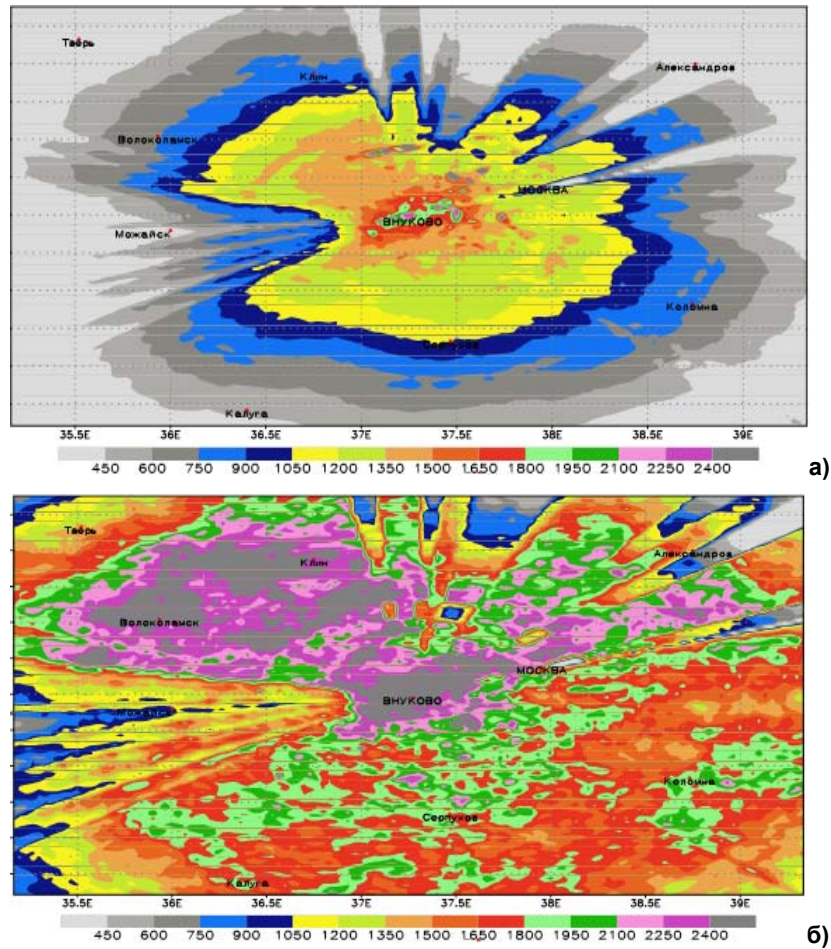


Рис. 2. Накопленные суммы радарных осадков (умноженные на 6) по локактору Внуково (RAVN) за холодный период 01.10.2017 – 31.03.2018 (а) и теплый период 01.05.2017 – 30.09.2017 (б). Единица измерения – [мм], градуировка палитры – [мм×6]. Суммирование проводится по тем срокам, для которых имеются синхронизованные прогнозы с заблаговременностью 10 мин.

Fig. 2. Accumulated radar precipitation (multiplied by 6) from Vnukovo radar (RAVN) for the 01.10. 2017 – 31.03.2018 period (a) and for the 01.05.2017 – 30.09.2017 period (b). The unit of measurement is [mm], the calibration of palette is [mm×6]. Sums are calculated over date and time instants with synchronized 10 minutes forecasts present.

Прогностические карты накопленных сумм за первые 10 мин прогноза (рис. 1б) демонстрируют заметный сглаживающий эффект двумерного фильтра Фурье, используемого для построения турбулентного каскада в схеме STEPS. При одновременной потере пространственных деталей такое спектральное сглаживание устраняет местники небольшого масштаба, что нельзя не считать вполне благоприятным эффектом.

2.2. Средняя ошибка (ME)

Если в качестве характеристики полезного прогноза использовать те же значения $|ME| \leq 0,5$ мм/ч, которые были эвристически рассчитаны для теплого периода, то можно прийти к следующим выводам: 1) до конца срока прогнозирования (150 мин) основная площадь обзоров всех радаров остается занятой «полезными» прогнозами; 2) с ростом заблаговременности возникают и растут области систематического занижения прогностической интенсивности (отрицательные ME); 3) области систематического занижения являются зачастую пространственно связными и могут быть объектом систематической коррекции, что, конечно же, требует дополнительного и более внимательного анализа.

Табл. 2, содержащая суммарные характеристики распределения значений ME по всем точкам усеченных полей, показывает, что ни одно максимальное значение не превысило 0,5, в то время как минимальные значения менее -0,5 объясняются, возможно, ошибками оценок осадков по радиолокационной отражаемости, например, данные локатора Внуково (RAVN).

Таблица 2. Суммарные характеристики полей средней ошибки (ME) прогноза осадков для синхронизированных радарных и прогностических данных с заблаговременностью 10 и 150 мин в холодный период. Выбросы (предположительно ошибки в радарных полях) выделены красным. Общее количество точек усеченного поля равно 15876 (126×126)

Table 2. Summary characteristics of precipitation mean error fields (ME) for synchronized radar and 10 and 150 min forecasts. Outliers (presumably radar field errors) are given in red. Total number of valid truncated field points equals 15876 (126×126)

Радар	lead	min	q25	med	mean	q75	max	IQR	std
RAKU	010:	-0.30	0.00	0.00	0.03	0.10	0.10	0.10	0.05
	150:	-0.40	-0.10	0.00	-0.04	0.00	0.20	0.10	0.10
RATL	010:	-0.10	0.00	0.00	0.02	0.10	0.20	0.10	0.06
	150:	-0.30	-0.10	0.00	0.00	0.10	0.40	0.20	0.13
RAVN	010:	-5.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00	0.06
	150:	-4.60	-0.10	-0.10	-0.03	0.00	0.30	0.10	0.11
RAVO	010:	-1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00	0.05
	150:	-1.00	-0.10	0.00	-0.03	0.00	0.20	0.10	0.07
RUDB	010:	-0.30	0.00	0.00	0.03	0.10	0.20	0.10	0.06
	150:	-0.30	-0.10	0.00	-0.03	0.10	0.30	0.20	0.13
RUDK	010:	-0.30	0.00	0.00	0.01	0.00	0.10	0.00	0.03
	150:	-0.30	-0.10	0.00	-0.01	0.00	0.10	0.10	0.08
RUDL	010:	-0.50	0.00	0.00	0.01	0.00	0.10	0.00	0.04
	150:	-0.40	-0.10	0.00	-0.03	0.00	0.10	0.10	0.08
RUDN	010:	-0.50	0.00	0.00	0.01	0.00	0.30	0.00	0.07
	150:	-0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.10
RUWJ	010:	-0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.02
	150:	-0.90	-0.10	0.00	-0.03	0.00	0.20	0.10	0.06

Так же, как и по полям оценок для теплого периода (см. табл. 3, [7]), видно несколько асимметричное распределение МЕ по первому и третьему квартилям (q_{25} , q_{75}) с большими областями нулевых значений (med , $mean$) и со слабым сдвигом в отрицательную область с ростом заблаговременности ($lead = 150$). Последнее наблюдение свидетельствует о небольшом систематическом ослаблении прогностической интенсивности с ростом заблаговременности для всех локаторов, кроме RUDN.

Как и следовало ожидать, в графическом изображении полей МЕ значения в интервале между $-0,5$ и $+0,5$ оказываются преобладающими в полях обзоров всех радаров (рис. 3а, б, в), без заметного изменения значений с ростом заблаговременности, но с появлением и увеличением одноцветных областей (в сторону завышения или занижения прогностической интенсивности) для отдельных локаторов (RATL, RAVN, RUDK, RUDL). При этом географическая локализация связанных зон систематического занижения или завышения прогнозов также имеет место, хотя и заметно слабее по сравнению с теплым периодом.

Как упоминалось выше, из-за меньшей климатической интенсивности осадков в холодный период года использование одинакового порога полезности для обоих периодов не совсем корректно. Его следовало бы выбрать также меньшим примерно вдвое, делая более мелкой и градуировку цветовой палитры около нуля в графических образах. Тем не менее в данном случае порог оставлен прежним для сохранения единообразия оценок качества, как и палитра цветов – для удобства предварительного сопоставления.

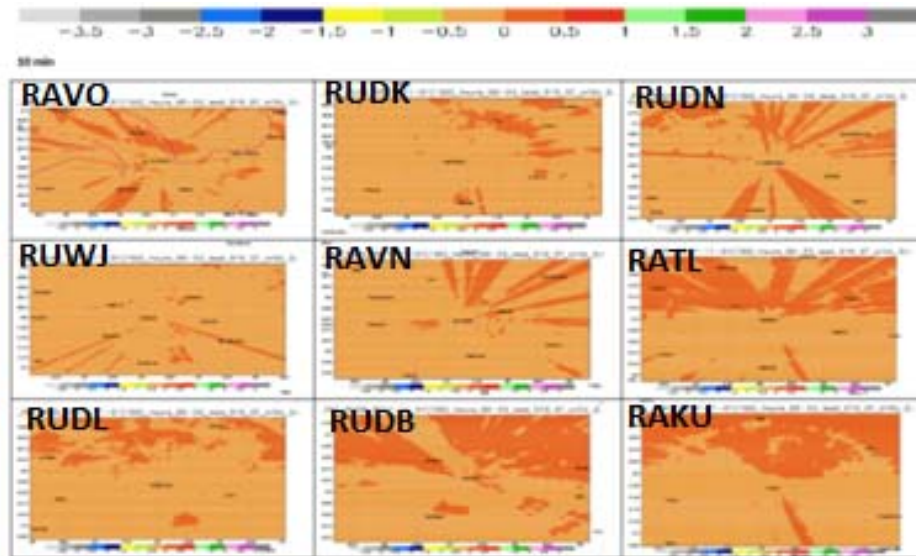
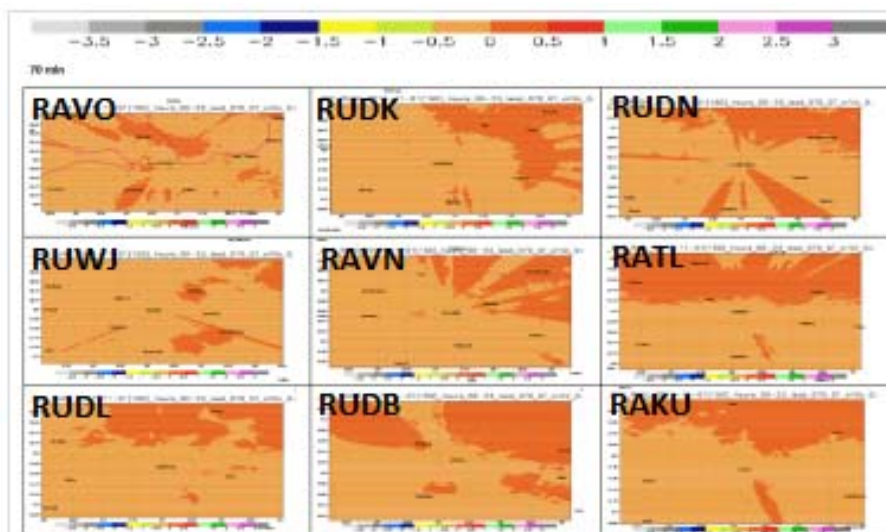
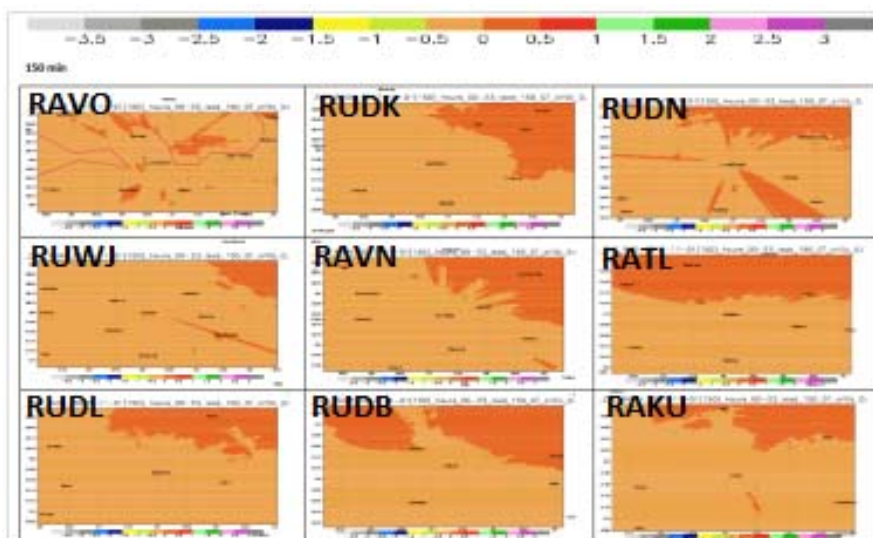


Рис. 3а.



б)



в)

Рис. 3. Средняя ошибка (МЕ) прогноза осадков с заблаговременностью 10 мин (а), 70 мин (б) и 150 мин (в) за период 01.10.2017 – 31.03.2018 для радиолокаторов на ЕТР. Единица измерения – [мм], градуировка палитры – [мм×6]. Оценка МЕ проводится по синхронизованным парам прогноз-наблюдение.

Fig. 3. Mean error (ME) of precipitation nowcasts 10 minutes (a), 70 minutes (б) and 150 minutes (в) ahead for the 01.10.2017 – 31.03.2018 period for radars on the ETR. The unit of measurement is [mm], the calibration of palette is [mm×6]. ME is calculated for synchronized forecast – observation pairs.

2.3. Коэффициент корреляции (COR)

Воспользуемся тем же эвристическим приемом выделения диапазона 0,1–0,15 значений COR в качестве нижнего порога значимости при нулевой теоретической корреляции и в предположении, что общее количество прогнозов составляет около 20 тыс., а типичное время эволюции мезомасштабных осадков в средних широтах равно примерно восьми часам [1, 2, 7].

На рис. 4 собраны поля COR для заблаговременностей 60 и 150 мин. Видно, что значения коэффициента корреляции существенно выше значений для теплого периода, кроме, возможно, расчетов по локатору Воейково (RAVO) (см. рис. 5 и рис. 6 [7]). При этом в полях оценок для холодного периода уже на ранних прогнозах наблюдается географическая локализация связанных областей высокой и низкой корреляции, которые трансформируются в некоторых случаях в отчетливые циклические структуры (рис. 4б), проявившиеся в картах накопленных осадков (рис. 1).

Табл. 3 содержит данные о «потенциальной информативности» системы наукастинга в виде общих характеристик распределения показателя COR по полю размером 126×126 точек. Зеленым цветом выделены значения $COR \geq 0,1$, розовым – значения $COR \geq 0,15$. Столбцы квантилей (q25, med, q75) выделяют соответственные доли от полной площади с указанными значениями COR. Характеристики (min, mean, max, IQR, std) дают важные дополнительные сведения о распределении показателя по точкам поля.

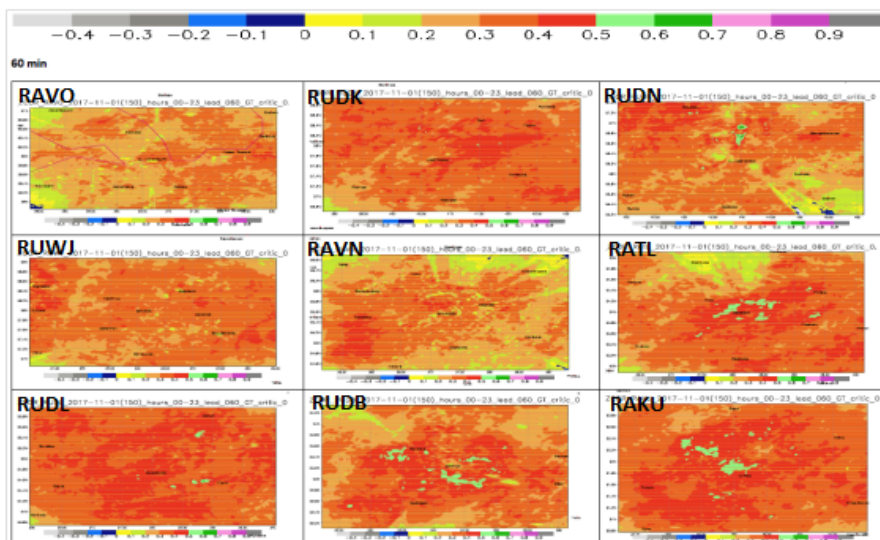
Оценки потенциальной информативности системы наукастинга по показателю COR в долях общей площади, содержащих значения COR не менее выделенного значимого уровня и с учетом заблаговременностей, собраны в табл. 4. Отчетливо видно, что по большинству локаторов прогноз осадков по критическому нижнему значению $COR = 0,15$ информативен вплоть до 2,5 ч на области, занимающей до 75 % общей площади обзора.

Таким образом, по показателям точечной верификации качество прогнозов в холодный период оказывается более высоким по коэффициенту корреляции, и практическая предсказуемость по этому же показателю для некоторых радаров достигает в этот период конца прогностического интервала (2,5 ч).

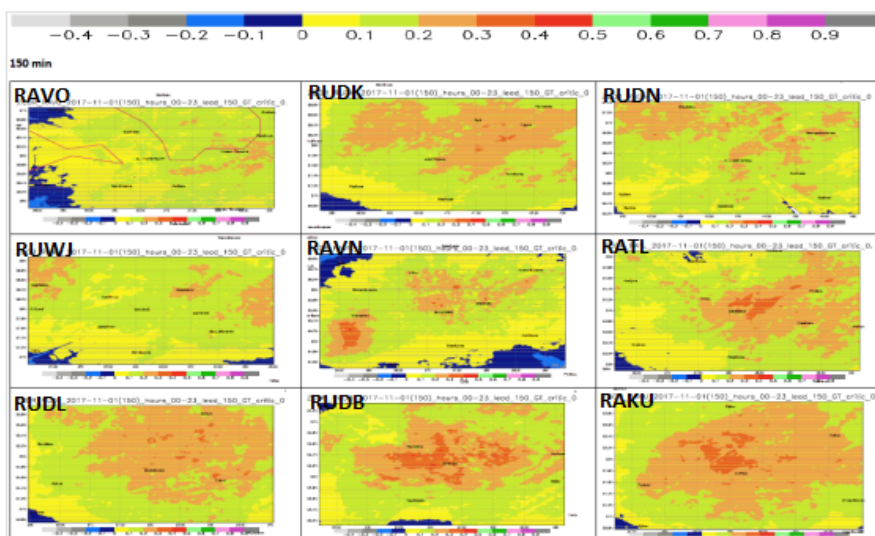
2.4. Систематическое смещение (BIAS)

Напомним, оценка BIAS (систематическое смещение, сдвиг) является отношением числа прогнозов данной категории к числу наблюдений этой же категории и изменяется в интервале $[0, +\infty]$ со значением $BIAS = 1$ для идеального прогноза. Возможно, точнее было бы называть данную характеристику отношением пространственных долей. Как и в работе [7], правилами обработки и интерпретации категоризованных показателей являются вначале а) определение максимального, статистически

обеспеченного порога категории для прогноза за первые 10 минут (по отсутствию вырожденных таблиц сопряженности), а затем б) оценка полезности прогноза выделенной категории по изменению показателя с заблаговременностью.



а)



б)

Рис. 4. Коэффициент корреляции (COR) прогностических осадков с заблаговременностью 60 мин (а) и 150 мин (б), за период 01.10.2017 – 31.03.2018 для радиолокаторов на ЕТР.

Fig. 4. Correlation coefficient (COR) of precipitation nowcasts 60 minutes (а) and 150 minutes (б) ahead for the 01.10.2017 – 31.03.2018 period for radars on the ETR.

Таблица 3. Суммарные характеристики полей коэффициента корреляции интенсивности осадков (COR) для синхронизированных радарных данных и прогнозов разной заблаговременности (**lead**) в холодный период. Критический уровень COR в диапазоне 0.1 (зеленый) – 0.15 (розовый)

Table 3. Summary characteristics of precipitation intensity correlation for synchronized radar and forecasts with varying lead-time (**lead**) in the cold period. Critical COR levels are given in the range of 0.1 (green) and 0.15 (pink)

Радар	lead	min	q25	med	mean	q75	max	IQR	std
RAKU	010:	0.01	0.53	0.57	0.57	0.60	0.74	0.07	0.05
	020:	0.01	0.49	0.52	0.52	0.55	0.73	0.06	0.05
	030:	0.01	0.44	0.48	0.48	0.51	0.69	0.07	0.05

	150:	-0.05	0.15	0.20	0.19	0.24	0.41	0.09	0.07
RATL	010:	0.03	0.48	0.54	0.52	0.58	0.73	0.10	0.10
	020:	0.01	0.43	0.49	0.47	0.53	0.70	0.10	0.10
	030:	-0.02	0.39	0.45	0.43	0.49	0.67	0.10	0.10

	120:	-0.02	0.15	0.21	0.20	0.25	0.43	0.10	0.08
	130:	-0.04	0.13	0.19	0.18	0.24	0.42	0.11	0.08
	140:	-0.06	0.12	0.18	0.17	0.22	0.40	0.10	0.08
150:	-0.05	0.10	0.16	0.15	0.21	0.40	0.11	0.08	
RAVN	010:	-0.02	0.44	0.50	0.48	0.55	0.72	0.11	0.11
	020:	-0.06	0.38	0.45	0.43	0.49	0.65	0.11	0.10
	030:	-0.09	0.34	0.40	0.38	0.45	0.59	0.11	0.10

	080:	-0.16	0.17	0.23	0.23	0.29	0.50	0.12	0.09
	090:	-0.17	0.14	0.21	0.20	0.27	0.48	0.13	0.09
	100:	-0.18	0.13	0.19	0.18	0.24	0.46	0.11	0.09
	110:	-0.19	0.11	0.17	0.17	0.23	0.44	0.12	0.09
	120:	-0.19	0.09	0.15	0.15	0.21	0.45	0.12	0.09
	130:	-0.21	0.07	0.13	0.13	0.20	0.43	0.13	0.09
	140:	-0.22	0.06	0.12	0.12	0.18	0.42	0.12	0.09
150:	-0.26	0.04	0.11	0.11	0.17	0.42	0.13	0.09	
RAVO	010:	0.00	0.45	0.49	0.48	0.52	0.71	0.07	0.08
	020:	-0.01	0.40	0.44	0.42	0.47	0.63	0.07	0.07
	030:	-0.03	0.35	0.39	0.38	0.42	0.62	0.07	0.07

	100:	-0.17	0.15	0.19	0.18	0.23	0.42	0.08	0.07
	110:	-0.18	0.13	0.17	0.16	0.21	0.39	0.08	0.07
	120:	-0.17	0.11	0.15	0.14	0.19	0.39	0.08	0.07
	130:	-0.19	0.09	0.13	0.13	0.17	0.39	0.08	0.07
	140:	-0.18	0.07	0.12	0.11	0.15	0.37	0.08	0.07
	150:	-0.22	0.06	0.10	0.10	0.14	0.30	0.08	0.07
RUDB	010:	0.04	0.49	0.55	0.54	0.59	0.78	0.10	0.08
	020:	0.03	0.44	0.49	0.49	0.54	0.73	0.10	0.08
	030:	0.03	0.39	0.45	0.44	0.50	0.66	0.10	0.08

	120:	-0.05	0.16	0.21	0.21	0.27	0.51	0.11	0.08
	130:	-0.06	0.14	0.20	0.20	0.25	0.52	0.11	0.08
	140:	-0.07	0.13	0.18	0.19	0.24	0.52	0.11	0.08
	150:	-0.10	0.12	0.16	0.17	0.22	0.44	0.10	0.08

RUDK	010:	0.05	0.52	0.56	0.55	0.59	0.77	0.07	0.05
	020:	0.04	0.47	0.50	0.50	0.54	0.72	0.07	0.05
	030:	0.04	0.42	0.45	0.45	0.49	0.66	0.07	0.05

	140:	-0.10	0.15	0.19	0.18	0.23	0.39	0.08	0.07
150:	-0.11	0.13	0.18	0.17	0.22	0.33	0.09	0.07	
RUDL	010:	0.11	0.55	0.58	0.58	0.61	0.77	0.06	0.05
	020:	0.07	0.50	0.53	0.53	0.56	0.75	0.06	0.05
	030:	0.07	0.46	0.49	0.49	0.52	0.72	0.06	0.05

	140:	-0.09	0.16	0.21	0.20	0.24	0.43	0.08	0.06
150:	-0.12	0.14	0.19	0.18	0.23	0.40	0.09	0.07	
RUDN	010:	-0.46	0.47	0.52	0.50	0.56	0.83	0.09	0.13
	020:	-0.27	0.42	0.47	0.45	0.51	0.84	0.09	0.12
	030:	-0.27	0.37	0.43	0.41	0.47	0.77	0.10	0.11

	120:	-0.06	0.15	0.19	0.19	0.24	0.42	0.09	0.06
	130:	-0.05	0.14	0.18	0.18	0.22	0.44	0.08	0.06
	140:	-0.05	0.13	0.16	0.16	0.20	0.52	0.07	0.06
150:	-0.06	0.11	0.15	0.15	0.19	0.37	0.08	0.06	
RUWJ	010:	-0.01	0.51	0.54	0.53	0.57	0.81	0.06	0.06
	020:	-0.01	0.45	0.48	0.48	0.52	0.75	0.07	0.06
	030:	-0.01	0.41	0.44	0.43	0.47	0.74	0.06	0.06

	120:	-0.20	0.15	0.19	0.18	0.22	0.38	0.07	0.06
	130:	-0.26	0.12	0.17	0.16	0.21	0.38	0.09	0.06
140:	-0.26	0.11	0.15	0.14	0.19	0.37	0.08	0.06	
150:	-0.29	0.09	0.13	0.13	0.17	0.30	0.08	0.06	

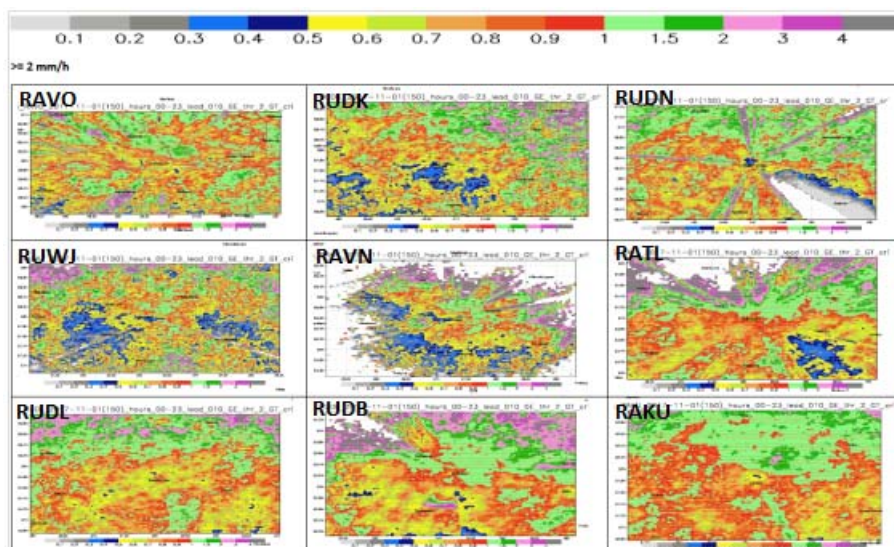
Таблица 4. Предел информативного прогноза системы наукинга (в десятках минут) и для заданной доли площади (в %) по показателю COR
Table 4. Informative forecast limit of the nowcasting scheme (in tens of minutes) and for the given area fraction (in %), based on COR

Радар	Критический уровень показателя COR*					
	0.10			0.15		
	Доля площади, занимаемой значениями COR не ниже критического уровня**					
	75%	50%	25%	75%	50%	25%
RAKU	150	150	150	150	150	150
RATL	150	150	150	120	150	150
RAVN	110	150	150	80	120	150
RAVO	120	150	150	100	120	140
RUDB	150	150	150	120	150	150
RUDK	110	150	150	80	120	150
RUDL	120	150	150	140	150	150
RUDN	150	150	150	120	150	150
RUWJ	140	150	150	120	140	150

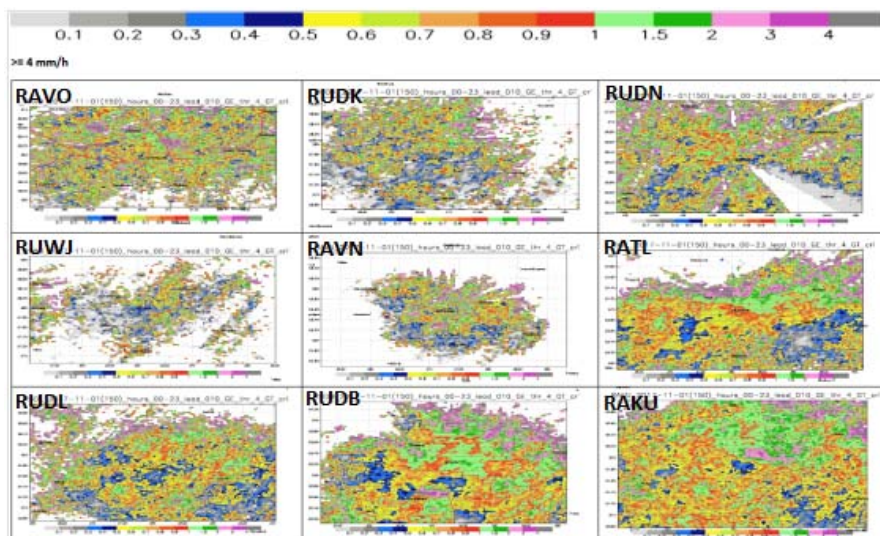
Примечание. *Critical COR level.

**Area fraction covered by COR values no less than the critical level.

На рис. 5 приводятся оценки BIAS прогноза на первые 10 мин для порогов 2 и 4 мм/ч.



а)



б)

Рис. 5. Систематическое смещение (BIAS) прогнозов на 10 мин интенсивности осадков ≥ 2 мм/ч (а) и ≥ 4 мм/ч (б) за период 01.10.2017 – 31.03.2018 для радиолокаторов на ЕТР.

Fig. 5. Systematic 10-minutes nowcast bias (BIAS) of precipitation intensity ≥ 2 mm/h (а) and ≥ 4 mm/h (б) for the 01.10.2017 – 31.03.2018 period for radars on the ETR.

Для порога 2 мм/ч видно влияние и местников (RATL, RUDB, RUDN), и ослабления луча (RAVN). Отчетливо разнообразие пространственных структур для разных локаторов, иногда с более или менее связными областями значений оценки BIAS по одну или другую сторону от единицы (RUDK, RUDN, RUDL, RUDB, RAKU), а иногда с неструктурированной пестротой (RUWJ, RAVN). Области белого цвета сигнализируют об отсутствии оценок для данной категории (наличие значений inf в таблицах сопряженности). Не приводя соответствующих рисунков заметим, что областей белого цвета, а также контрастных угловых секторов из-за местников в холодный период существенно больше, чем в теплый период. В частности, в теплый период на картах BIAS для порога 2 мм/ч вырожденные значения полностью отсутствуют для всех локаторов.

Карты для порога 4 мм/ч обнаруживают более сильное различие в пространственных структурах, большую пестроту и обширные области вырожденных значений. По результатам испытаний для теплого периода именно порог 4 мм/ч был признан по категориальным показателям статистически наиболее обеспеченным. Для холодного периода статистически обеспеченным порогом оказывается примерно вдвое меньшей интенсивности, т. е. около 2 мм/ч.

Суммарные пространственные характеристики поля показателя BIAS для прогноза на 10 мин содержатся в табл. 5, в которой видны как границы обеспеченных порогов, так и большое разнообразие характеристик по разным локаторам. Устойчивой (робастной) характеристикой среднего положения является медиана. В частности, медианное значение BIAS для порога 2 мм/ч оказывается для трех локаторов чуть больше 1, а в остальных – чуть меньше 1.

Красноречивой суммарной характеристикой оказывается столбец наличия вырожденных точек из $15876 = 126 \times 126$: с ростом порога в зонах обзора некоторых локаторов к порогу 4 мм/ч теряется не менее половины точек поля (RAVN). Наличие нулей в соответствующих таблицах сопряженности приводит к множеству значений Inf (infinite) и NaN (not a number), что сигнализирует о заметной потере статистической обеспеченности категориальных оценок.

Качество прогноза категории «не меньше 2 мм/ч» по показателю BIAS отражено на рис. 6. Помимо наличия областей влияния местников (RUDN, RATL, RUDB) и ослабления луча (RAVN), наблюдается некоторая пространственная структурированность областей значений BIAS по обе стороны от единицы. Так, проявляется некоторая «фронтальная полоса» приемлемых значений BIAS около единицы, сужающаяся с увеличением заблаговременности (RUDL, RUDB, RAKU). При этом прочие области заполняются либо существенным превышением, либо существенным занижением количества случаев прогноза выделенной градации. В то же время области, находящиеся под влиянием местников или близкие к ним, характеризуются значениями BIAS, лишенными всякого смысла (RUDN, RATL, RUDB).

Таблица 5. Суммарные характеристики полей смещения (BIAS) интенсивности осадков для синхронизированных радарных и прогностических данных с заблаговременностью 10 мин в холодный период для порогов (thr) 0.5, 1, 2, 4, 8, 12 мм/ч. Inf, NaN – нулевые ячейки в таблице сопряженности (infinite, not a number)

Table 5. Summary characteristics of precipitation intensity bias (BIAS) for synchronized radar and forecasts with 10-min lead-time in the cold period for thresholds (thr) of 0.5, 1, 2, 4, 8, 12 mm/h. Inf, NaN – zeros in contingency table entries (infinite, not a number)

Радар	thr	min	q25	med	mean	q75	max	IQR	std	NA's	valid
RAKU	0.5:	0.69	1.09	1.18	1.20	1.29	1.90	0.20	0.15	0	15876
	1:	0.53	1.06	1.18	1.24	1.38	2.34	0.32	0.25	0	15876
	2:	0.40	0.82	0.97	1.05	1.21	3.47	0.39	0.33	0	15819
	4:	0.00	0.62	0.86	Inf	1.25	Inf	0.63	NaN	0	15819
	8:	0.00	0.20	0.50	Inf	1.00	Inf	0.80	NaN	1519	14357
	12:	0.00	0.00	0.25	Inf	1.50	Inf	1.50	NaN	6975	8901
RATL	0.5:	0.37	1.03	1.17	Inf	1.41	Inf	0.38	NaN	0	15876
	1:	0.33	0.96	1.17	Inf	1.73	Inf	0.77	NaN	0	15876
	2:	0.00	0.74	0.98	Inf	1.65	Inf	0.91	NaN	42	15834
	4:	0.00	0.56	0.89	Inf	1.71	Inf	1.15	NaN	844	112182
	8:	0.00	0.12	0.50	Inf	1.40	Inf	1.28	NaN	3694	14357
	12:	0.00	0.00	0.29	Inf	1.50	Inf	1.50	NaN	8112	7764
RAVN	0.5:	0.06	0.80	1.00	Inf	1.27	Inf	0.47	NaN	0	15876
	1:	0.00	0.72	1.02	Inf	1.67	Inf	0.95	NaN	68	15808
	2:	0.00	0.51	1.00	Inf	2.78	Inf	2.27	NaN	1708	14168
	4:	0.00	0.43	1.00	Inf	Inf	Inf	Inf	NaN	5771	10105
	8:	0.00	0.00	1.00	Inf	Inf	Inf	Inf	NaN	10588	5288
	12:	0.00	0.00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	NaN	13268	2608
RAVO	0.5:	0.12	1.04	1.15	1.17	1.27	3.71	0.23	0.26	0	15876
	1:	0.06	0.98	1.14	1.19	1.32	6.00	0.34	0.39	0	15876
	2:	0.03	0.73	0.92	Inf	1.17	Inf	0.44	NaN	0	15876
	4:	0.00	0.50	0.90	Inf	1.50	Inf	1.00	NaN	250	15626
	8:	0.00	0.00	0.67	Inf	Inf	Inf	Inf	NaN	5297	10579
	12:	0.00	0.00	1.00	Inf	Inf	Inf	Inf	NaN	11221	4655
RUIDB	0.5:	0.48	1.05	1.19	1.36	1.41	15.80	0.36	0.75	0	15876
	1:	0.41	1.00	1.20	Inf	1.65	Inf	0.65	NaN	0	15876
	2:	0.00	0.77	1.02	Inf	1.67	Inf	0.90	NaN	1	15875
	4:	0.00	0.67	1.00	Inf	2.00	Inf	1.33	NaN	372	15504
	8:	0.00	0.31	0.75	Inf	2.00	Inf	1.69	NaN	3164	12712
	12:	0.00	0.00	0.67	Inf	3.00	Inf	3.00	NaN	6372	9504
RUIDK	0.5:	0.33	1.05	1.16	1.19	1.30	2.23	0.25	0.20	0	15876
	1:	0.34	0.95	1.12	1.19	1.36	3.69	0.41	0.36	0	15876
	2:	0.07	0.63	0.88	Inf	1.25	Inf	0.62	NaN	0	15819
	4:	0.00	0.33	0.78	Inf	2.00	Inf	1.67	NaN	1069	14807
	8:	0.00	0.00	0.00	Inf	3.00	Inf	3.00	NaN	8902	6974
	12:	0.00	0.00	0.00	Inf	Inf	Inf	Inf	NaN	13076	2800
RUIDL	0.5:	0.40	1.10	1.17	1.19	1.28	1.86	0.18	0.14	0	15876
	1:	0.21	1.01	1.13	1.19	1.33	2.40	0.32	0.25	0	15876
	2:	0.15	0.73	0.90	1.08	1.23	17.00	0.50	0.61	0	15876
	4	0.00	0.50	0.83	Inf	1.62	Inf	1.12	NaN	214	15662
	8	0.00	0.00	0.29	Inf	1.00	Inf	1.00	NaN	7334	8542
	12:	0.00	0.00	0.00	Inf	1.00	Inf	1.00	NaN	12724	3152

RUDN	0.5:	0.01	1.08	1.24	Inf	1.39	Inf	0.31	NaN	0	15876
	1:	0.00	1.02	1.23	Inf	1.55	Inf	0.53	NaN	28	15848
	2:	0.00	0.75	1.00	Inf	1.38	Inf	0.63	NaN	396	15769
	4:	0.00	0.50	0.83	Inf	1.50	Inf	1.00	NaN	844	15480
	8:	0.00	0.00	0.50	Inf	1.38	Inf	1.38	NaN	3942	11934
	12:	0.00	0.00	0.00	Inf	3.00	Inf	3.00	NaN	9204	6672
RUWJ	0.5:	0.48	1.02	1.15	1.18	1.29	6.82	0.27	0.30	0	15876
	1:	0.24	0.88	1.09	1.18	1.34	17.00	0.46	0.58	0	15876
	2:	0.00	0.53	0.79	Inf	1.17	Inf	0.64	NaN	1	15875
	4:	0.00	0.00	0.67	Inf	2.00	Inf	2.00	NaN	2918	12958
	8:	0.00	0.00	0.00	Inf	Inf	Inf	Inf	NaN	12159	3717
	12:	0.00	0.00	0.00	Inf	Inf	Inf	Inf	NaN	14666	1210

2.5. Критерий Пирса – Обухова (PSS)

Напомним, PSS для явлений с уменьшающейся частотой стремится к доле точных попаданий (Hit Rate, HR [7]), так как доля ложных тревог (False Alarm Rate, F [7]) чаще всего стремится к нулю, что и заставляет исследователей использовать те показатели, поведение которых не зависит критично от «выборочной климатологии» явления [10].

Рассмотрим поля PSS для 10-минутного прогноза порогов 2 и 4 мм/ч (рис. 7).

Для порога 2 мм/ч основные цвета – это светло-красный и красный (0,2–0,5) до 0,6 (зеленый), местами проявляются желтые цвета (снижение до 0). Имеются области с вырождением (значения NaN), особенно для лоатора Внуково (RAVN) и вкрапления отрицательных значений (синий цвет).

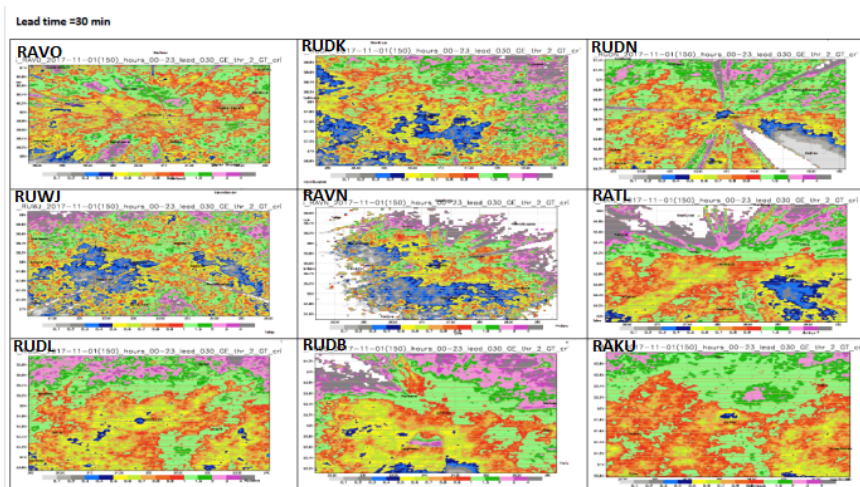
Карты для порога 4 мм/ч отличаются намного большим разнообразием в пространственных структурах и в значениях. При этом сохраняются области высоких значений (островки зеленого цвета до 0,7, в полях лоаторов RUDN, RATL, RUDB, RAKU), а по краям поля появляются и отрицательные значения, и вырожденные случаи (RAVN).

2.6. Критический индекс успешности (ETS)

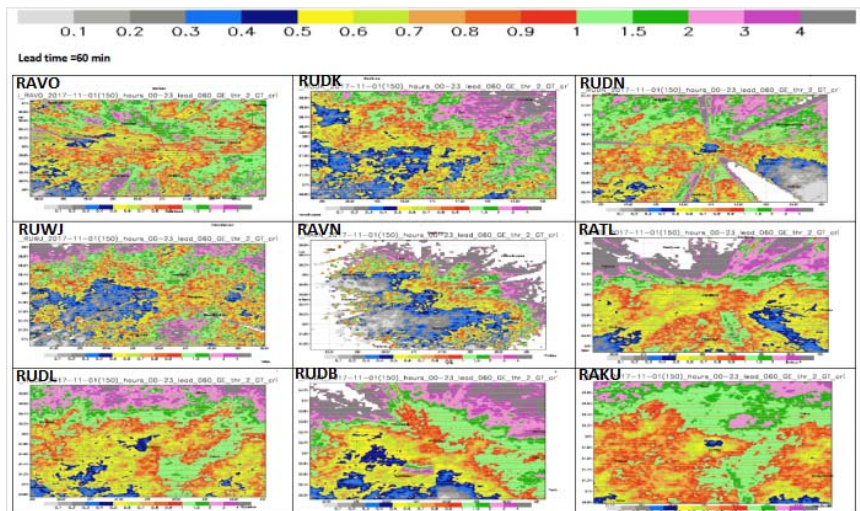
Показатель ETS (Equitable Threat Score, или показатель Гилберта, GSS), представляющий собой индекс успешности относительно случайного попадания [7], традиционно используется для оценки качества прогноза редких явлений. Он изменяется в интервале $[-1/3, 1]$ и равен единице в случае идеального прогноза.

Прилагательное equitable (справедливый, объективный, беспристрастный) было присвоено данному показателю в 90-х годах прошлого века за минимизацию оценок случайных и постоянных прогнозов, что лишает прогнозистов возможности перестраховок, позволяющих искусственно завышать качество [10]. Как известно, среди характеристик (2×2)-таблиц сопряженности свойством «беспристрастности» обладает критерий Пирса – Обухова (PSS). Следует, однако, отметить, что

при уменьшении вероятности выделенного события показатель ETS может стремиться как к нулю, так и к индексу успешности TS (Threat Score [7]), а заявленная беспристрастность сказывается только при существенных объемах исходной выборки; т. е. при малых выборках на случайных прогнозах этот показатель нулю в общем не равен, ввиду чего по справедливости должен называться другим именем, например именем Гилберта, GSS [10]. Наши выборки имеют «средний» размер, поэтому здесь оставим старое обозначение в предположении, что показатель ETS для случайного прогноза близок к нулю, и чем он больше, тем его качество выше именно случайного прогноза.

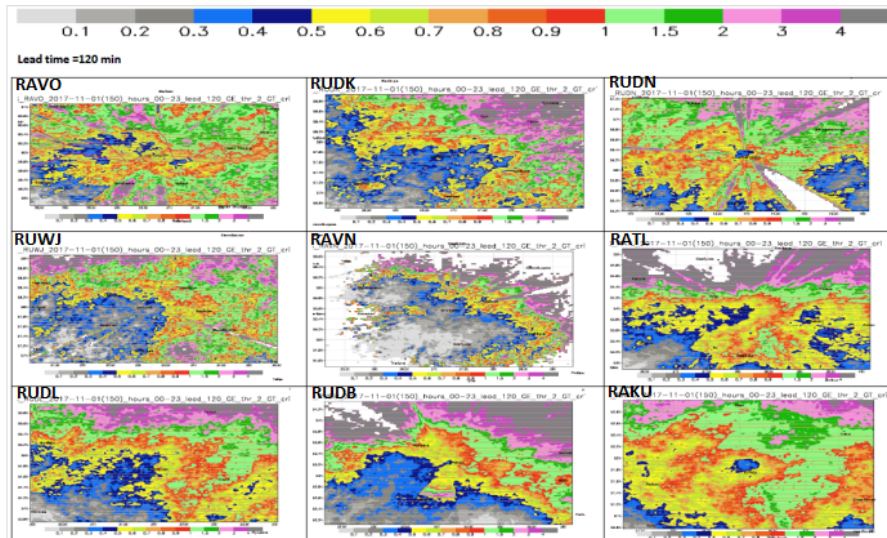


а)



б)

Рис. 6а, б.



в)

Рис. 6. Систематическое смещение (BIAS) прогнозов интенсивности осадков ≥ 2 мм/ч заблаговременности 30 мин (а), 60 мин (б) и 120 мин (в) за период 01.10.2017 – 31.03.2018 для радиолокаторов на ЕТР.

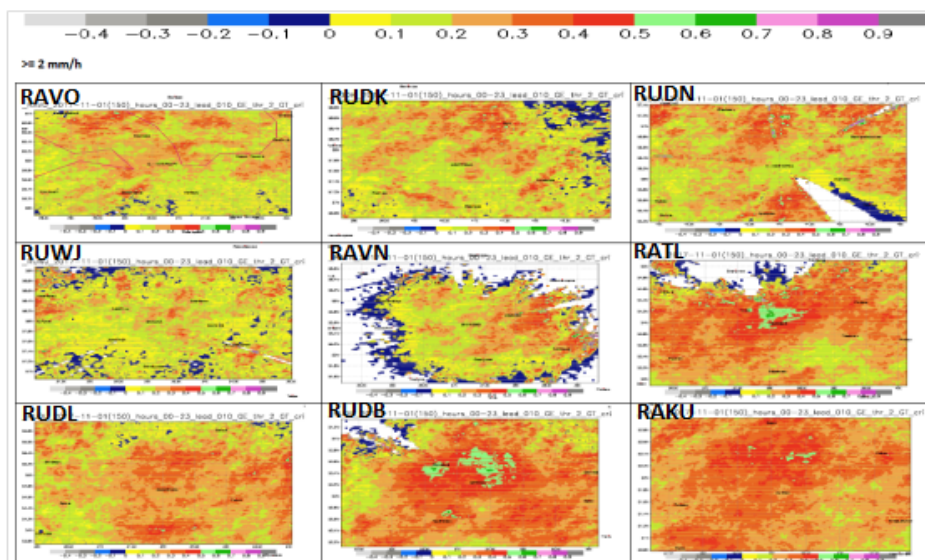
Fig. 6. Systematic bias (BIAS) of precipitation intensity ≥ 2 mm/h nowcasts 30 minutes (a), 60 minutes (б) and 120 minutes ahead (в) for the 01.10.2017 – 31.03.2018 period for radars on the ETR.

В полях показателя ETS для небольших порогов также проявляются общие, не устраненные структурные особенности, порождаемые техническими или методологическими проблемами радиолокационных оценок осадков. При увеличении порогов общая структура поля показателя сильно деградирует из-за роста количества вырожденных значений показателя, маскируя все прочие особенности.

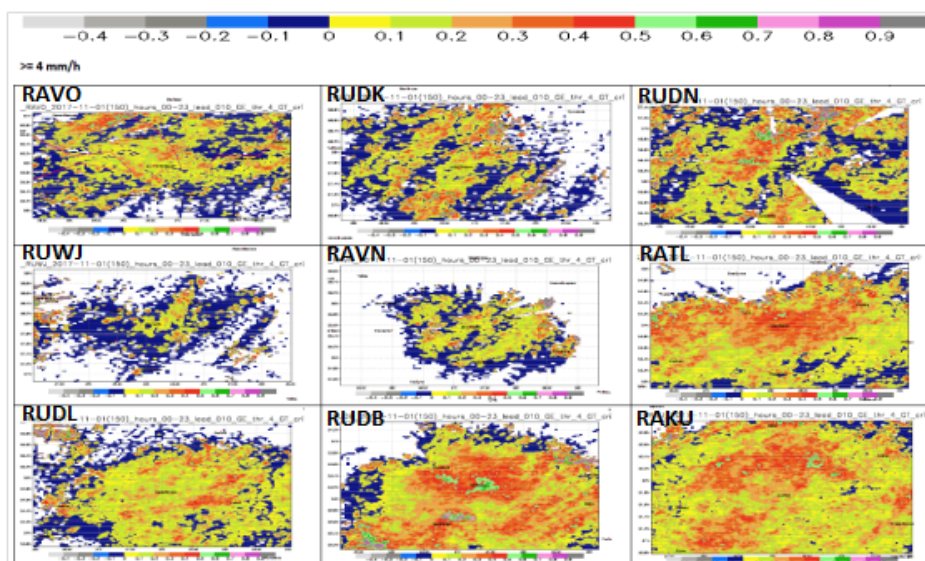
На рис. 8 приведены поля ETS для тех же порогов, что и для PSS (рис. 7).

Сразу бросается в глаза общее пространственное сходство с полями показателя PSS. Так, качество прогноза интенсивности осадков не менее 2 мм/ч заметно выше по данным локаторов RATL, RUDB, RAKU, хотя в поле ETS локатора RUDL это свойство менее заметно. При этом в зонах обзора указанных локаторов просматриваются сходные циклические структуры. Общими оказываются и области отрицательных значений, вызванных, несомненно, влиянием местников и ослаблением луча (RAVN, RUDN, RATL, RUDB).

При переходе к полям категории 4 мм/ч сходство полей ETS и PSS еще более усиливается. Основное свойство полей данного порога – сильная деградация пространственной структуры из-за вырождения значений показателей, что подтверждает оцененную по предыдущим показателям информативность прогноза для порогов не выше 2 мм/ч для локаторов RAVO, RUDK, RUWJ, RAVN.



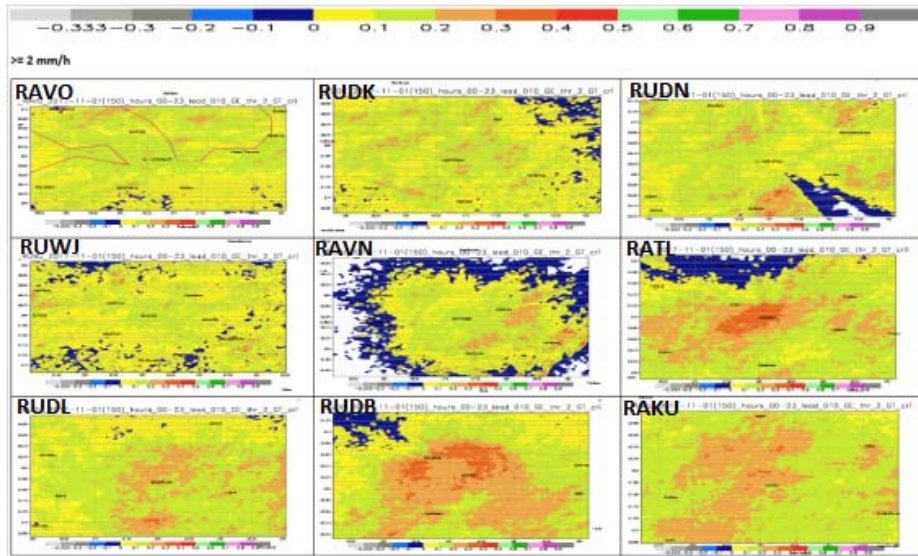
а)



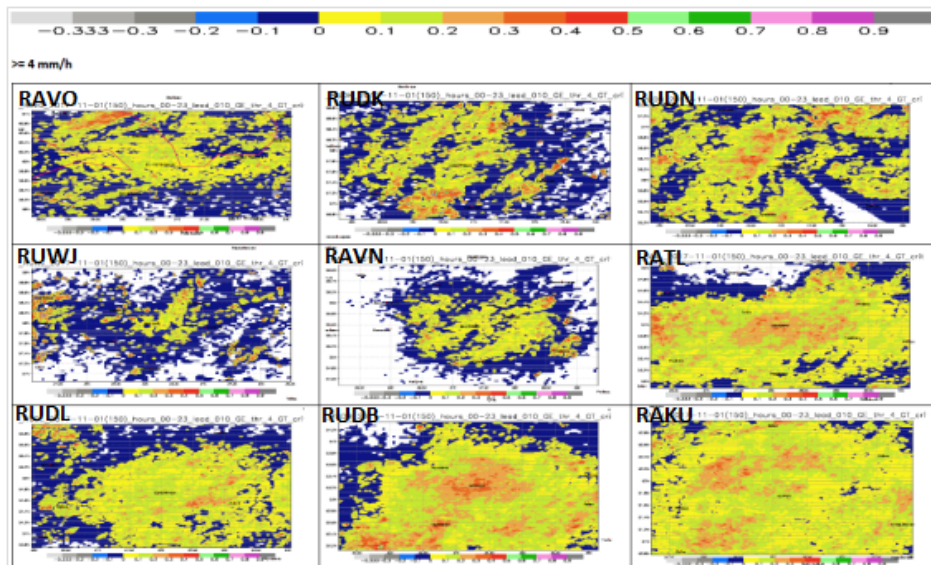
б)

Рис. 7. Критерий Пирса-Обухова (PSS) прогнозов на 10 мин интенсивности осадков ≥ 2 мм/ч (а) и ≥ 4 мм/ч (б) за период 01.10.2017 – 31.03.2018 для радиолокаторов на ЕТР.

Fig. 7. Peirce-Obukhov skill score (PSS) of 10-min nowcasts of precipitation intensity ≥ 2 mm/h (a) and ≥ 4 mm/h (б), for the 01.10.2017 – 31.03.2018 period for radars on the ETR.



а)



б)

Рис. 8. Критический индекс успешности (ETS) прогнозов на 10 мин интенсивности осадков ≥ 2 мм/ч (а) и ≥ 4 мм/ч (б) за период 01.10.2017 – 31.03.2018 для радиолокаторов на ЕТР.

Fig. 8. Critical success index (ETS) of 10-min nowcasts of precipitation intensity ≥ 2 mm/h (a) and ≥ 4 mm/h (b), for the 01.10.2017 – 31.03.2018 period for radars on the ETR.

В зонах обзора остальных локаторов существуют связанные области довольно высоких значений ETS и PSS, что делает прогнозы вполне полезными и для более высоких порогов: для порога 4 мм/ч по локаторам RATL, RUDL, RUDB, RAKU, для порога 8 мм/ч – по RATL, RUDB, RAKU.

Сходство с полями PSS для порога 4 мм/ч и по пространственной структуре, и по значениям, заметно усиливающееся для порогов 8 и 12 мм/ч, свидетельствует о сходимости показателей PSS и ETS к величине, близкой к доле попаданий (HR), когда при увеличении порога одновременно стремится к нулю и количество ложных тревог.

Проведем сравнение практической полезности наукастинга для теплого (S) и холодного (W) периодов года на основе суммарных по всему полю характеристик показателя ETS, воспользовавшись порогом полезности в $ETS = 0,2$, эвристически определив его как среднее значение между соответствующими порогами полезности PSS и EDI, определенными в [7].

В табл. 6 собраны значения заблаговременности в минутах с раскраской соответствующих значений для обоих периодов при совпадении полезности (серый цвет), при превышении полезности прогноза в теплый период (желтый цвет) и превышении полезности прогноза в холодный период (голубой цвет). По столбцам для обоих периодов расположены значения экстремалей, квантилей и количества невырожденных значений (valid). Ввиду того, что ETS, как правило, растет от min к max и падает с ростом заблаговременности, оценка практической полезности может интерпретироваться как оценка предсказуемости для выделенной квартильным анализом доли области обзора каждого радиолокатора. А так как соответствующий квантиль задает нижнюю границу этой доли («не менее, чем...»), то большой интервал предсказуемости в столбце max может оказаться случайным и дезинформирующим, сигнализируя о высоком значении ETS в малом количестве точек, вплоть до одной единственной.

Рассмотрим часть таблицы для категории ≥ 1 мм/ч. По значениям valid статистическая обеспеченность может считаться удовлетворительной. Для не менее четверти территории зимой прогнозы лучше на более длительный срок, чем летом (до получаса по q75, и до часа по значению max) для локаторов RAKU, RATL, RUDB, RUDL. При этом зоны обзора RAKU и RUDB на 75 % и 50 % территории обеспечены лучшим прогнозом и на более длительный срок зимой по сравнению с летом. В теплый период на площади не менее половины от общей прогнозы лучше, хотя и на очень короткие сроки (не более получаса). В холодный период качество прогноза со значением $ETS \geq 0,2$ может сохраняться на более длительном прогностическом интервале (вплоть до 150 мин), чем в теплый период, однако на территории, не превышающей 25 % общей площади (в частности, это может быть всего одна единственная точка поля!).

Таблица 6. Сравнительная оценка практической полезности прогнозов осадков для теплого и холодного периодов (в минутах заблаговременности) по значениям критического индекса успешности (ETS) более 0,2 для категорий «не менее 1 мм/ч» и «не менее 2 мм/ч»

Table 6. Comparative assessment of practical precipitation forecast utility for the warm and cold periods (in lead-time minutes) using the ETS values greater than 0.2 mm/h for categories “no less then 1 mm/h” and “no less then 2 mm/h”

Категория ≥ 1 мм/ч												
Радары	min		q25		med		q75		max		valid	
	S	W	S	W	S	W	S	W	S	W	S	W
RAKU	0	0	20	20	20	30	30	50	90	150	15876	15876
RATL	0	0	20	0	30	20	30	40	70	150	15876	15876
RAVN	0	0	20	0	20	0	30	0	70	150	15876	~15825
RAVO	0	0	10	0	20	0	30	10	70	70	15876	15876
RUDB	0	0	20	0	30	30	30	60	70	150	15876	15876
RUDK	0	0	20	0	30	0	30	20	80	90	15876	15876
RUDL	0	0	20	10	30	20	40	40	70	120	15876	15876
RUDN	0	0	10	0	20	10	30	20	60	120	15876	15876
RUWJ	0	0	30	0	30	0	40	0	80	140	15876	15876
Категория ≥ 2 мм/ч												
Радары	min		q25		med		q75		max		valid	
	S	W	S	W	S	W	S	W	S	W	S	W
RAKU	0	0	0	0	10	0	20	10	70	110	15876	15876
RATL	0	0	0	0	10	0	20	10	70	110	15876	~15876
RAVN	0	0	0	0	10	0	20	0	60	150	15876	~14300
RAVO	0	0	0	0	0	0	10	0	60	50	15876	15876
RUDB	0	0	10	0	20	0	30	20	70	150	15876	15876
RUDK	0	0	0	0	0	0	10	0	50	80	15876	15876
RUDL	0	0	0	0	10	0	20	0	70	140	15876	15876
RUDN	0	0	0	0	0	0	0	0	40	120	15876	15876
RUWJ	0	0	10	0	20	0	20	0	70	150	15876	~15876

Примечание. Буквами S и W выделены столбцы для теплого и холодного периодов соответственно. В ячейке таблицы указана максимальная заблаговременность (в десятках минут), до которой сохраняется значение $ETS > 0.2$ в долях радарного поля, отделенных соответствующим квантилем. Серым цветом отмечено совпадение полезности для теплого и холодного периодов, желтым – преимущество практической полезности в теплый период, голубым – преимущество полезности прогнозов в холодный период. Letters S and W label columns for the warm and the cold period, correspondingly. Each table entry contains the maximum lead-time (in minutes) which retains the $ETS > 0.2$ inequality in radar field fractions defined by the corresponding quantile. Gray color indicates equal utility for both periods, yellow color favors the practical forecast utility in the warm period, whereas the blue color favors the utility in the cold period.

Для прогноза категории ≥ 2 мм/ч ситуация сходная, но в некотором смысле более обостренная: максимальное значение ETS достигается на более длительном прогностическом интервале (примерно в двое большем) в холодный период. Однако это возможно в области не более 25 % от общей площади.

Таким образом, показатели качества категоризованных прогнозов уже для первых порогов 1 и 2 мм/ч не свидетельствуют безоговорочно в пользу прогнозов в холодный период и по практической предсказуемости, и по площади областей полезных уровней, как это было проявлено в полях коэффициента корреляции.

На фоне отчасти противоречивых оценок качества по COR, с одной стороны, и по PSS и ETS, с другой, полезность прогнозов по показателю BIAS может считаться вполне сравнимой по обоим периодам.

3. О возможности синоптического анализа и статистической коррекции прогнозов

Использование суммарных характеристик, учитывающих лишь количество тех точек зоны обзора, в которых отмечены значения показателя не ниже определенного уровня, скрывает особенности пространственного распределения выделяемых точек. Так, малое количество точек заданных значений показателя может представлять собой компактную, связную область, в то время как большое количество аналогичных точек может быть равномерно и несвязно рассеяно по всей зоне обзора. В то же время наличие компактных, односвязных областей синоптически значимого пространственного масштаба дает полезную информацию о свойствах и локатора, и прогностической системы, открывая тем самым возможность как синоптического анализа качества прогноза в зоне обзора данного локатора, так и статистической коррекции прогнозов при эксплуатации данной системы наукастинга.

Для иллюстрации возможностей более детального пространственного или, точнее, географического анализа рассмотрим поля ETS для локатора Курска (RAKU), построенные по результатам испытаний системы наукастинга в оба периода.

На рис. 9 размещены панели с полями показателя ETS в зависимости от заблаговременности для категории ≥ 2 мм/ч: в левом столбце – для теплого периода, в правом – для холодного периода. Видно, что на начальном сроке (10 мин) области значений $ETS \geq 0,2$ более обширны в полях теплого периода, однако в холодный период к сроку 60 мин северо-западнее Курска образуется связная область значений $ETS \geq 0,1$ (светло-зеленая), слабо сохраняющаяся вплоть до срока 120 мин, к которому в летнем поле ETS уже возникают и растут области отрицательных значений.

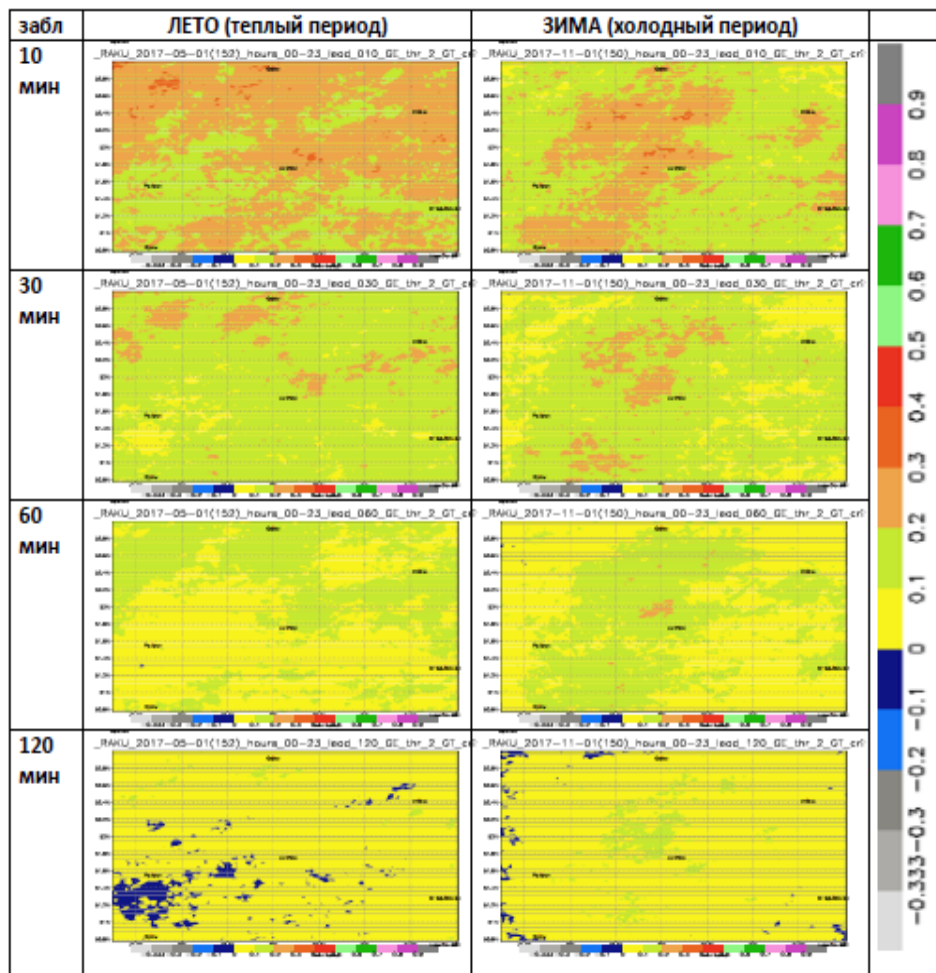


Рис. 9. Критический индекс успешности (ETS) наукастинга осадков для радиолокатора Курск (RAKU) заблаговременности 10 мин, 30 мин, 60 мин, 120 мин за период 01.05.2017 – 30.09.2017 (левый столбец) и за период 01.10.2017 – 31.03.2018 (правый столбец).

Fig. 9. Critical success index (ETS) of precipitation nowcasts for Kursk radar (RAKU), 10, 30, 60 and 120 minutes ahead for the 01.05.2017 – 30.09.2017 period (left column) and for the 01.10.2017 – 31.03.2018 period (right column).

Сами значения ETS к концу прогностического интервала ожидаемо невелики, однако сохраняющиеся очаги положительных значений могут содержать дополнительную информацию об особенностях и систематических ошибках каждого отдельного радиолокатора.

Выводы

Результаты точечной верификации наукастинга осадков для холодного периода и систематическое сопоставление с аналогичными оценками качества наукастинга в теплый период года позволяют сформулировать следующие основные выводы.

1. Качество прогнозов в холодный период оказывается более высоким по коэффициенту корреляции и практическая предсказуемость для некоторых радаров достигает конца прогностического интервала (2,5 ч). По систематической ошибке (BIAS) качество прогнозов для двух периодов года сходное. Однако, ввиду примерно вдвое меньшей интенсивности, качество прогнозов выделенных категорий по критериям PSS и ETS более высокое в холодный период лишь в областях, не превышающих четверти общей площади обзора радаров.

2. Статистически значимые категориальные характеристики качества (т. е. обеспеченные достаточным объемом соответствующих выборок) в холодный период относятся к интенсивностям осадков не выше 2 мм/ч, в то время как для теплого периода тестирования данный порог равен 4 мм/ч. Отметим, что и в холодный период система прогнозирует высокие значения интенсивности осадков вплоть до экстремальных, однако такие случаи, во-первых, существенно более редки и требуют больших объемов данных для устойчивости оценок, а во-вторых, точечная верификация и стандартные оценки качества не всегда приводят к корректным оценкам полезности мезомасштабных прогнозов и должны быть дополнены иными методами верификации, в первую очередь пространственными.

3. В ходе отчетных испытаний схемы наукастинга выяснилось, что качество радиолокационных данных в холодный период заметно уступает качеству данных в теплый период из-за более выраженных помех и возникающих кольцевых структур, вызванных либо техническими свойствами радиолокации, либо методологическими особенностями оценок радиолокационных осадков. Все эти обстоятельства критически влияют на показатели верификации по холодному периоду испытаний.

Благодарность

Авторы глубоко признательны А.Р. Ивановой за ценные замечания по содержанию и по стилю нашей статьи.

Список литературы

1. *Абдуллаев С.М.* Жизненный цикл мезомасштабных конвективных систем: концепция, климатология и прогноз: дис. ... докт. геогр. наук. М, 2010. 408 с.
2. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. 416 с.

3. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России, ВНИИГМИ-МЦД: Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394.
4. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического локатора ДМРЛ-С в синоптической практике: 2-я редакция. М.: Росгидромет, 2017. 121 с.
5. Довиак Р., Д. Зрнич. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 512 с.
6. Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Смирнов А.В. Прогнозирование осадков с помощью модели мультипликативного каскада: опыт радарного наукастинга // Международная конференция «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», посвященная 100-летию со дня рождения академика А.М. Обухова, Москва, 16-18 мая 2018. Тезисы докладов. С. 27.
7. Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В. Оперативная технология наукастинга осадков на основе радарных данных и результаты верификации для теплого периода года (май-сентябрь 2017) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 1 (367). С. 6-38.
8. Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Бундель А.Ю., Дмитриева Т.Г., Смирнов А.В. Верификация прогнозов метеорологических явлений со значительными воздействиями в районе проведения Олимпиады «Сочи-2014». Часть I. Детерминированные прогнозы в тестовый период // Метеорология и гидрология. 2015. № 9. С. 31-48.
9. Bowler N., Pierce C., Seed A. STEPS: A probabilistic precipitation forecasting scheme which merges an extrapolation nowcast with downscaled NWP // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2006. Vol. 132. P. 2127-2155.
10. Forecast Verification. A Practitioner's Guide in Atmospheric Science // I.T. Jolliffe, D.B. Stephenson (Eds). John Wiley & Sons Ltd, 2012. 274 p.

References

1. Abdullaev S. M. Zhiznennyj cikel mezomasshtabnykh konvektivnykh sistem: koncepciya, klimatologiya i pro-gnoz: dissertacii kandidata geograficheskikh nauk. Moscow, 2010, p. 408 [in Russ.].
2. Bol'shev L. N. Tablicy matematicheskoy statistiki. Moscow, Nauka Publ., 1983, p. 416 [in Russ.].
3. Bulygina O., Razuvaev V., Korshunova N., Shvets N. Opisaniye massiva dannykh mesyatchnykh sum osadkov, RIHMI-WDC. State Data Base Registration № 2015620394 [in Russ.].
4. Vremennyye metodicheskie ukazaniya po ispol'zovaniyu informacii doplerovskogo meteorologicheskogo lokatora DMRL-S v sinopticheskoy praktike: 2 redakciya. Moscow, Rosgidromet, 2017, 121 p. [in Russ.].
5. Doviak R. J., and D. S. Zrnic, Doppler Radar Weather Observations, 2nd Edition, Academic Press, London/San Diego, 1993.
6. Kiktev D. B., Murav'ev A. V., Smirnov A. V. Precipitation forecasting based on multiplicative cascade model: radar nowcasting experience. Proceedings of the Int. Conference "Turbulence, atmosphere and climate dynamics", dedicated to centenary of acad. A. M. Obukhov, Moscow, May 16-18, 2018, p. 27. [in Russ.].
7. Murav'ev A. V., Kiktev D. B., Smirnov A. V. Operational precipitation nowcasting system based on radar data and verification results for the warm period of the year (May-September 2017). Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2018, vol. 367, no. 1, pp. 6-38 [in Russ.].
8. Murav'ev A. V., Kiktev D. B., Bundenel' A. Yu., Dmitrieva T. G., Smirnov A. V. Verification of high-impact weather event forecasts for the region of the Sochi-2014 Olympic Games.

Part I: Deterministic forecasts during the test period. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 9, pp. 584-597. DOI: 10.3103/S1068373915090034.

9. Bowler N., Pierce C., Seed A. STEPS: A probabilistic precipitation forecasting scheme which merges an extrapolation nowcast with downscaled NWP. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2006, vol. 132, pp. 2127-2155, doi: 10.1256/qj.04.100.

10. *Forecast Verification. A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*. I.T. Jolliffe, D.B. Stephenson (Eds). John Wiley & Sons Ltd Publ., 2012, 274 p.

Поступила в редакцию 06.04.2019 г.

Received by the editor 06.04.2019.