

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-3-6-58>

УДК 551.509.313+551.509.324.2+551.508.85

## Оценка радиолокационного наукастинга полей осадков

*А.В. Муравьев, Д.Б. Киктев, А.В. Смирнов*

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

Рассматривается метод "окрестной" оценки радиолокационного наукастинга полей осадков с помощью показателя FSS (Fractions Skill Score). Основная особенность метода состоит в оценках качества не в точках (или ячейках) полей, а в окрестностях этих точек (или ячеек). Верификация прогнозов полей приобретает вероятностный характер, благодаря чему устраняется известная опасность "двойного штрафования" при переходе от грубых расчетных сеток к более мелким. Более того, метод позволяет выделить такой интервал масштабов, в котором испытываемая модель порождает прогнозы, приемлемые или полезные как для синоптика-прогнозиста, так и для стороннего потребителя прогностической продукции.

Особенности и достоинства показателя FSS демонстрируются на данных радиолокационного наукастинга осадков в теплый и холодный периоды 2017–2018 гг. Использован информационный архив полей наблюдений и прогнозов в зонах обзора девяти радиолокаторов ДМРЛ-С на территориях ЦФО и СЗФО. Ввиду больших временных затрат на расчеты показателя протестирована возможность получения суммарных оценок по случайным выборкам. На основе выходной табличной и графической оценочной продукции сформулированы содержательные общие и частные выводы, стратифицированные по периодам года, радиолокаторам, порогам превышения интенсивности осадков и заблаговременности прогнозов.

*Ключевые слова:* наукастинг полей осадков, радиолокационные наблюдения, пространственная верификация прогнозов, окрестный метод оценки качества, показатель на основе пространственных долей (FSS)

## Verification of the radar precipitation nowcasting

*A.V. Muravev, D.B. Kiktev, A.V. Smirnov*

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

The application of the Fraction Skill Score (FSS) to the radar nowcasting of precipitation fields is considered. The main feature of the method is that the quality is estimated not at the points (or cells) of the fields, but in their neighborhoods. Verification of field forecasts acquires a probabilistic character, due to which the well-known "double penalty" danger is eliminated when advancing from coarse computational grids to finer ones. Moreover, the method makes it possible to distinguish such range of scales within which the tested model generates forecasts that are acceptable or useful for both weather forecasters and third-party consumers of forecast products. The features and advantages of the FSS are demonstrated using the data of radar precipitation nowcasting in the warm and cold seasons of 2017–2018. An information archive of observation and forecast fields in the

coverage areas of nine DMRL-C radars on the territory of the Central and Northwestern federal districts was used. Due to the large time spent to calculate the skill score, the possibility of obtaining summary estimates based on random samples was tested. Based on the output tabular and graphical verification products, meaningful general and partial conclusions are formulated that are stratified by seasons, radars, thresholds for exceeding the precipitation intensity, and the forecast lead time.

*Keywords:* precipitation field nowcasting, radar observations, spatial forecast verification, neighborhood verification method, Fractions Skill Score (FSS)

## Введение

В последние годы в исследовательских и оперативных метеорологических центрах большую популярность приобрела оценка качества прогноза метеорологических полей, предложенная в 2008 г. в статье [67] под названием Fractions Skill Score (FSS), что можно перевести словосочетанием "оценка качества с помощью пространственных долей". Основную причину широкого распространения в метеорологическом сообществе оценки FSS автор статьи [57], один из разработчиков и активный популяризатор этого показателя, видит в его "интуитивной ясности и простоте расчета". Благодаря упомянутым обстоятельствам, к настоящему времени хорошо известны достоинства и недостатки FSS, список которых можно найти в авторитетных статьях последних 15 лет [38, 39, 56–59, 66, 72, 73, 75]. Напомним, что пространственные методы верификации разрабатывались и внедрялись в дополнение и в противовес к стандартным точечным мерам качества для подавления "двойного штрафа" (double penalty) и для учета ошибок "почти промаха" (near miss errors) [2, 39, 45, 74].

При описании окрестных методов авторы [30] упоминают о многолетнем использовании в геофизике и геостатистике таких характеристик пространственной когерентности, как структурные функции и вариограммы. Добавим к этому, что простота оценки по долям достигнута на фоне глубоких и иногда замысловатых соотношений пространственно-временных масштабов в геофизике и метеорологии [1, 3, 5, 7, 16, 17, 49, 64], в геостатистике [6, 14, 44, 65]. В речной гидрологии известны соотношения между слоем осадков, площадью охвата и продолжительностью ливней [4, 78, 79], а в некоторых системах оперативного наукастинга осадков реализованы пространственные и динамические соотношения масштабов в облачных и дождевых системах, установленные около полувека назад [29, 68, 69].

Сильно расширилась и область приложения оценки FSS, вначале состоявшая почти исключительно из полей *осадков* и значительно реже из полей *скорости ветра*. К настоящему времени имеются примеры приложений к таким величинам и объектам, как *экстремальные осадки*, *облачность* [37, 52, 80], *горный ветер*, *шквалы*, *спиральность восходящего потока* [35, 43, 74, 76], *молниевая активность* [28], *положение кромки льда* [55], *нефтяной разлив* на морской поверхности [70].

Развитие моделей численного прогноза погоды (ЧПП) с разрешением конвекции вызвало потребность в стандартах оценок качества. Формат предложенной *оценочной карты* (scorecard) был описан в 2019 г. в статье [19], содержащей рекомендацию применения "метрики" FSS к таким метеорологическим параметрам, как *осадки, нижняя граница облачности, видимость, отражаемость и спиральность восходящего потока*.

Наконец, благодаря метрическим и статистическим свойствам, показатель FSS был использован как *функция потерь* для глубокого обучения модели наукастинга конвекции по спутниковым наблюдениям [51].

В настоящее время место показателя FSS определено в группе *окрестных методов* (*neighbourhood*) *пространственной верификации*, ранее именовавшихся *нечеткими* (*fuzzy*) [2, 9, 34, 38, 45]. Несколько работоспособных окрестных методов было предложено уже к концу первого десятилетия этого века (в обзоре 2008 г. [38] перечислено 12 "нечетких" методов). Часть из них довольно быстро превратилась в регулярные оценки прогноза осадков высокого разрешения в национальных службах погоды, например, в Великобритании, Франции, Австралии, Германии, Финляндии и т. д. [38, 39].

Развитию пространственных методов верификации способствовали такие факторы, как доступность новых источников данных (например, от радиолокаторов и спутников), возросшие специфические потребности пользователей прогностической продукции, развитие моделей и прогнозов высокого пространственного и временного разрешения [34].

Идеальным полигоном испытания новых методов являются международные исследовательские и прогностические демонстрационные проекты, осуществляемые под руководством ВМО, как, например, проект FROST-2014 для метеорологического обеспечения Олимпиады в Сочи в 2014 г. [8, 50]. Для применения новых методов оценки прогнозов имелись все условия, перечисленные в обзоре [34]. Во-первых, метеорологическая сеть была насыщена новейшими аппаратными средствами, включая поляризационный радиолокатор на г. Ахун. Во-вторых, были четко сформулированы специфичные требования руководства соревнований к точности и своевременности прогнозов сверхвысокого разрешения. Наконец, задействованные отечественные и зарубежные гидродинамические модели отвечали наивысшим научно-техническим критериям того времени. В частности, прогнозы поступали в расчетных сетках с шагом от 7 км до 200 м. В общей сложности были развернуты системы трех типов прогнозов: наукастинг на ближайшие часы, краткосрочный прогноз на первые сутки и ансамблевый краткосрочный прогноз [8].

Одним из первых отечественных приложений пространственных методов верификации было сопоставление в районе Сочи прогностических полей осадков от моделей ЧПП с полями радиолокационных оценок осадков [60, 61]. Применялись объектно-ориентированный (CRA, Contiguous Rain Area [38]) и окрестный (FSS) методы верификации, реализованные

в программном комплексе SpatialVx в среде языка R [46]. Приобретенные знания и умения были использованы в проекте INSPECT консорциума COSMO, стартовавшем в 2015 г. с целью тестирования и усовершенствования тех методов и компьютерных средств, которые активно исследовались в ходе выполнения международного проекта MesoVICT (Mesoscale Verification Inter-Comparison over Complex Terrain, 2014–2019 гг.) [27].

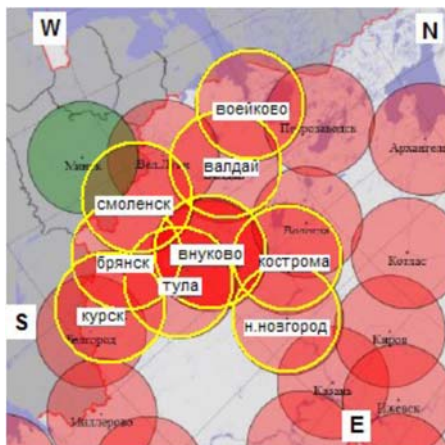
В 2015 г. в Гидрометцентре России начались работы по созданию системы наукастинга осадков на основе радиолокационных данных отечественной сети ДМРЛ-С. После 2016 г. пространственные оценки качества системы наукастинга осадков проводились в рамках научно-исследовательских тем Росгидромета (с 2017 г.) и научного проекта консорциума COSMO под названием AWARE (Appraisal of Challenging Weather forecasts, 2019–2020 гг.) [48]. В докладах на семинарах COSMO [31–33] изложены результаты объектно-ориентированной оценки наукастинга осадков в теплый период 2018 г. с помощью метода CRA. Содержание и значение международных научных проектов по пространственной верификации, а также примеры приложений методов в отечественной практике детально описаны в обзорной статье [2].

В Гидрометцентре России – по инициативе Н.Ф. Вельтищева – также рассчитывались пространственные оценки прогнозов оперативных мезомасштабных моделей по данным сетей ДМРЛ-С и станционных наблюдений [11–13]. Первые результаты приложения объектно-ориентированной методики [36] к отечественным прогностическим данным были опубликованы В.З. Кисельниковой в 2013 году.

Сделаем общее замечание об объектно-ориентированном и окрестном методах верификации. В упомянутой классификации [45] они отнесены в различные категории методов *смещения* и методов *фильтрации* соответственно (displacement and filtering methods). Применение окрестного метода заключается в *фильтрации* исходных полей с выделением пространственного масштаба и последующим расчетом произвольной оценки различия как функции масштаба. Если внимание фокусируется не на пространственном масштабе, а на связных областях (*объектах*), выделяемых пороговым значением величины, то речь идет об *объектно-ориентированных* методах верификации [36]. Пространственные объекты в полях радиолокационных осадков были исследованы в наших работах в связи с оценками качества статистического наукастинга [19–21, 23] и будут частично использованы в данной статье.

В работе представлены окрестные оценки прогноза осадков системой наукастинга Гидрометцентра России в 2017–2018 гг. В это время расчетным ядром системы служила модель STEPS версии 2017 г. [29], которая эксплуатировалась в параллельном режиме на продукции девяти радиолокаторов ДМРЛ-С (рис. 1). На вход системы наукастинга подавались "плоские карты", или *поля осадков* в разрешении  $1 \times 1$  км в сетке  $504 \times 504$  [15].

Методология прогнозирования построена на спектральном разложении полей радиолокационных осадков в каскады и на статистической экстраполяции каскадов методом оптического потока [10]. В настоящее время эксплуатируется версия модели STEPS (ruSTEPS) [63], обрабатывающая объединенное радиолокационное поле осадков размером  $1951 \times 2151$  в километровом разрешении. Композит строится на наблюдениях около 30 ДМРЛ-С, развернутых на Европейской территории России [24]. Несмотря на довольно гладкое "сшивание" отдельных кругов обзора в единое поле, особенности радиолокаторов (концентричность полей в зонах обзора, теневые зоны, местные помехи, специфика калибровок по наземным данным и т. д) продолжают проявляться в статистических характеристиках этих полей и в полях точечных показателей качества. Именно по этой причине важно рассчитывать, накапливать и по возможности учитывать характеристики наукастинга по индивидуальным радиолокаторам объединенной системы.



**Рис. 1.** Расположение девяти радиолокаторов ДМРЛ-С системы ЦАО (выделены желтыми окружностями) на территории ЦФО с указанием местоположений в центрах кругов обзора радиуса 250 км. Буквами N, S, W и E указаны условные направления на стороны света.

**Fig. 1.** Positioning of nine ДМРЛ-С radars of the CAO network (yellow circles) on the CFD territory with settlements at centers of the survey circles of 250 km radius. The letters N, S, W and E indicate the conditional directions to the cardinal points.

## 1. Архив данных, особенности полей осадков и планирование экспериментов

Условия и результаты испытаний системы наукастинга в "теплый" и "холодный" периоды года (май–сентябрь 2017 г. и ноябрь 2017 – март 2018 г. соответственно) были опубликованы в [23, 25], здесь приведем лишь основные сведения.

Начальные данные и контрольные поля для верификации поставлялись с девяти радиолокаторов (р/л) Центрального федерального округа (ЦФО) в следующих местоположениях (рис. 1): Курск (RAKU), Тула (RATL), Внуково (RAVN), Воейково (RAVO), Брянск (RUDB), Кострома (RUDK), Смоленск (RUDL), Нижний Новгород (RUDN) и Валдай (RUWJ); в скобках указаны идентификаторы р/л. Радиолокационные поля использованы в качестве контрольных из-за отсутствия независимых данных сопоставимого пространственно-временного разрешения.

Прогнозы на 2.5 часа через 10 минут обновлялись каждые 10 минут по мере поступления вторичной радиолокационной информации с серверов Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО). Исходные поля радиолокационных осадков имели размер  $504 \times 504$  (разрешение 1 км), но начальные и прогностические поля для модели STEPS переводились прореживанием на сетку  $256 \times 256$  (разрешение около 2 км). Угловые точки поля вне вписанных кругов обзора заполнялись в ЦАО либо данными смежных локаторов, либо фиктивными нулевыми значениями, которые позже стали заполняться метками отсутствующих данных и в таком формате учитываться в процедурах наукастинга и оценок качества [19].

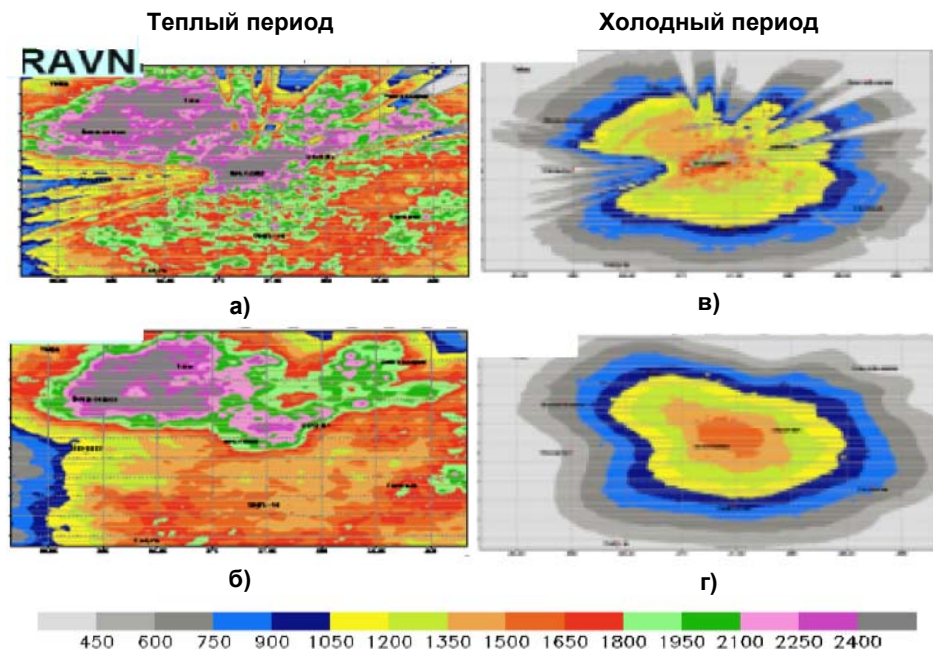
Количество прогнозов по большинству р/л составило порядка 20 тысяч в каждый период, что сделало возможным сопоставление соответствующих оценок качества.

Было отмечено несколько систематических пространственных особенностей прогностических полей и полей показателей качества. Приведем для локатора Внуково (RAVN) карты суммарных осадков полей наблюдения ( $504 \times 504$ ) (рис. 2а, в) и 10-минутного прогноза ( $256 \times 256$ ) (рис. 2г, д), а также карты показателя Пирса-Обухова по трем категориям осадков для прогноза на 10 минут (рис. 3).

Во-первых, в оба периода происходит заметное сглаживание благодаря предварительной пространственной интерполяции и двумерному фильтру Фурье на этапе выделения каскадов; на рис. 2в и 2г этот эффект виден в полях прогноза на первые 10 минут. Спектральное сглаживание вместе с подавлением деталей реального поля заполняет числовыми данными некоторые теневые области (рис. 2а, в).

Во-вторых, в холодный период в прогностических полях и, менее контрастно, в полях показателей качества проявляются круговые структуры, почти незаметные в аналогичных полях теплого периода года (рис. 2 и 3). Это явление объясняется в первую очередь известным ограничением радиолокационного метода метеонаблюдений в этот период – подъемом луча локатора из-за кривизны Земли выше верхней границы низких слоистообразных облаков на дистанциях больше 120–150 км [15]. Именно это порождает круговые области уменьшающихся значений интенсивности и метрик качества: сумма осадков и качество прогноза оказываются функциями расстояний от локатора – чем дальше, тем сумма меньше и качество "хуже"

(рис. 2в, г и рис. 3г, д) [26]. На рис. 3д и 3е края обзора заполнены отрицательными значениями показателя Пирса-Обухова – здесь доля ложных тревог превышает долю попаданий.



**Рис. 2.** Накопленные суммы радиолокационных (а, в) и прогностических (б, г) осадков на 10 мин за теплый (а, б) и холодный (в, г) периоды года по р/л на ЕТР. Единица измерения – [мм/ч], градуировка палитры – [мм·6/ч]. Суммирование проводится по синхронизированным срокам прогнозов заблаговременностью 10 мин.

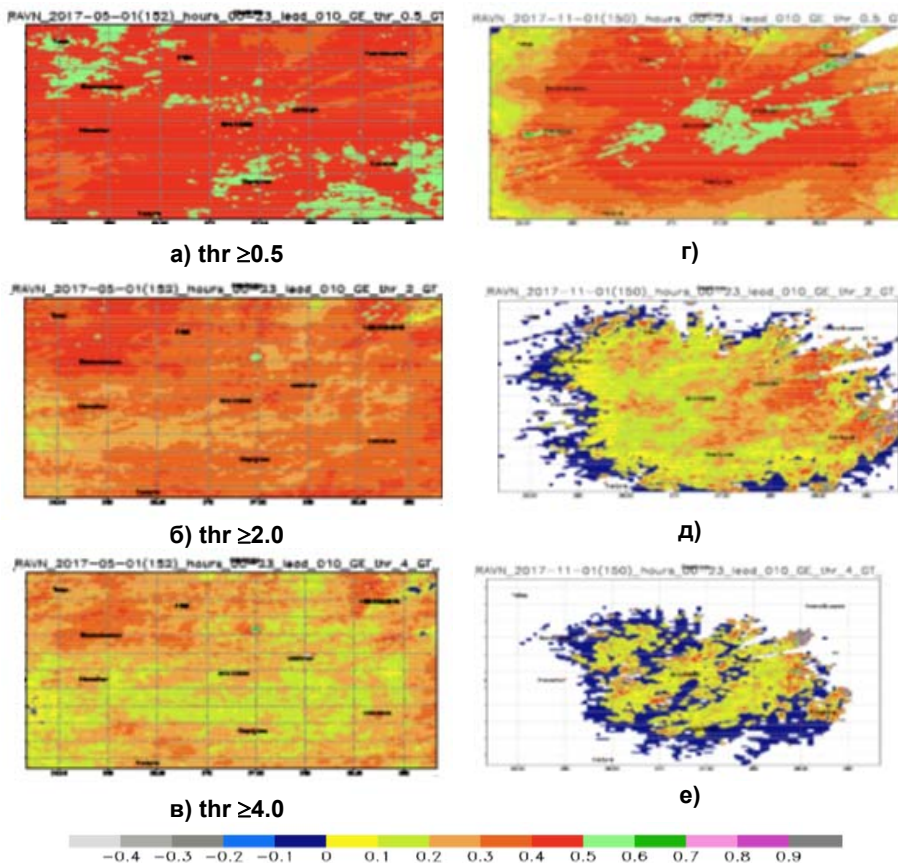
**Fig. 2.** Accumulated sums of radar (а, в) and 10-min forecast (б, г) precipitation for the warm (а, б) and cold (в, г) periods of the year obtained from radars located on the European territory of Russia (ETR). The unit of measurement is [mm/h], the calibration of palette is [mm·6/h]. Sums are calculated over synchronized sequence with 10 minute forecasts.

Наконец, в холодный период из-за быстро уменьшающихся объемов выборок на высоких порогах интенсивности происходит существенная потеря связности полей категориальных показателей (рис. 3д, е). В дополнение к рис. 3 заметим, что в поле попаданий и в поле промахов для порога 4 мм/ч примерно 75 % точек были нулевыми; очевидно, велико пересечение, в котором ноль делится на ноль. Следует также учитывать, что в холодный период интенсивность осадков примерно вдвое ниже интенсивности в теплый период, поэтому в категориальных оценках качества сравнение рекомендуется проводить для разных порогов, например, на рис. 3 – это пары 4 мм/ч для теплого и 2 мм/ч для холодного периодов. Если нет

необходимости контролировать интенсивность осадков, то при достаточном объеме данных можно использовать квантильное определение порогов. В нашем случае был важен учет конкретной интенсивности.

### RAVN, теплый период PSS (10 min frc)

### Холодный период



**Рис. 3.** Оценка Пирса-Обухова прогноза осадков на 10 мин в круге обзора р/л Внуково (RAVN) в теплый (а, б, в) и холодный (г, д, е) периоды года. Пороги превышения: 0.5 (а, г), 2 (б, д) и 4 (в, е) мм/ч. Белым цветом обозначен маркер бесконечного значения (inf).

**Fig. 3.** Peirce-Obukhov Skill Score for 10 min precipitation forecast in the survey circle of Vnukovo radar (RAVN). Exceedance thresholds: 0.5 (а, г), 2 (б, д) и 4 (в, е) mm/h. White color denotes infinite value label (inf).

На расчеты FSS тратится огромное количество процессорного времени, так как для каждого радиолокатора и одной заблаговременности имеется около 40 тыс. прогнозов с примерно таким же количеством пар полей для верификации, при этом оценка качества рассчитывается для набора порогов и для последовательно растущих окрестностей. Но очевидно, что расчет по всем парам полей не имеет смысла, так как большинство полей



окажутся "сухими". Кроме того, что расчеты будут проводиться вхолостую, показатель FSS может проявить чувствительность к парам пустых окрестностей с "раздуванием" мнимого качества [57]. В исследованиях осадков важнейшими были и остаются проблемы моделирования и прогнозирования сильных дождей, оценок их пространственной интенсивности, продолжительности и областей покрытия (особенно в задачах гидрологии [78, 79]). Верификация прогнозирования и радиолокационных оценок характеристик конвекции, гроз и ливней проводится, как правило, на отдельных случаях штормов и штормовых ситуаций с последующим агрегированием показателей качества и эффективности. Как известно, результаты верификации и их финальное агрегирование считаются корректными при соблюдении правил статистической независимости, которые часто сводятся к некоторым эвристическим оценкам физической независимости процессов и явлений.

В [19] описана методика автоматизированного выделения синоптических ситуаций, содержащих поля с областями осадков большой и максимальной площади для приложения теории экстремальных величин, в частности для разработки модели "пиков над порогом" с помощью обобщенного распределения Парето [20, 21]. Для этих целей были формализованы понятия *области*, *объекта* и *ситуации*. В поле осадков *область* выделяется пороговым значением, определяемым на основе статистических характеристик накопленного архива полей и с учетом климатологии осадков. Был выбран порог 1 мм/ч, так как для 10-минутных сумм радиолокационных осадков он является в климатологическом смысле достаточно высоким для средних широт, что обеспечивает не только заметные по площади объекты, но и временную непрерывность полей с этими объектами. Предполагается, что такая последовательность отражает отдельную синоптическую ситуацию, *условно* независимую с физической точки зрения. Этот порог предусмотрен опцией *threshold* функции *поиска объектов* *FeatureFinder()* библиотеки *SpatialVx* и называется *порогом идентификации объекта*. Важно уточнить, что объект идентифицируется как *односвязная* область *после* пространственного сглаживания исходного поля по *радиусу пространственного осреднения*. *Односвязность* означает, что объект состоит из точек поля, в которых значение интенсивности не меньше 1 мм/ч. Задание радиуса осреднения также невозможно без предварительного экспериментирования с накопленным архивом. Пространственное осреднение должно, с одной стороны, позволять соотносить выделенные объекты с известными мезомасштабными синоптическими процессами, а, с другой стороны, не усложнять задачу "спаривания" объектов в поле прогноза с объектами в поле наблюдения. В результате был выбран радиус осреднения в 9 узлов сетки, т. е. примерно 18 км. Функция *FeatureFinder()* имеет опцию *минимального* объекта для формирования выборки объектов желательного, в нашем случае значительного размера. Размер (или площадь) объекта оценивается по количеству попадающих в него узлов

(или ячеек); при таком определении связная одномерная «линия» всегда имеет ненулевую «площадь». Так как эксперименты с объектно-ориентированными и окрестными методами верификации планировались совместно, то минимальные размеры были унаследованы как наборы *параметров положения* Парето, равные  $625=25\times 25$ , 900, 1225,  $1600=40\times 40$  узлов сетки. Для расчетов FSS подбирались поля с наличием объектов, площадь которых не меньше 1600 точек (эквивалент квадрата со стороной около 80 км). Выбор такой пороговой площади позволяет оценить качество модели в прогнозировании синоптических ситуаций, близких к экстремальным по площади покрытия осадками.

Общее количество полей наблюдения и прогнозов для разных заблаговременностей по данным девяти ДМРЛ-С с объектами размера не менее 1600 точек (в оба периода года) собрано в [19, табл. 8]. Будем называть такие поля *соответствующими*. В теплый период было выделено в среднем около 3000 соответствующих радиолокационных полей: для девяти р/л в диапазоне от 2147 (RAVN) до 3755 (RUWJ). В холодный период количество соответствующих полей оказалось менее равномерным: в среднем около 600 полей, но в диапазоне от 130 (RAVN) до 1387 (RAKU). Сходное количество соответствующих полей насчитывается в полях для всех заблаговременностей; например, для локатора Курск (RAVO) в наблюдениях в теплый (холодный) период обнаружено 2843 (1387) соответствующих полей, а во всех прогнозах обнаружено 2550–2560 (1495–1564) таких полей. Выборки пар полей наблюдение-прогноз для приложения показателя FSS формировались на основе соответствующих полей р/л наблюдений и синхронизированных полей прогнозов.

Ввиду вышесказанного эксперименты с расчетом FSS были проведены в два этапа. На первом этапе для экономии расчетного времени и для частичного устранения сильной статистической зависимости полей одной ситуации был реализован прием случайного выбора (без повтора) 200 сроков из архива наблюдений [18]. На втором этапе для ограниченного числа локаторов и для одной заблаговременности (60 минут) в расчетах использованы полные выборки пар полей для верификации.

## 2. Определение, свойства и алгоритмическая сложность показателя FSS

Физический и статистический смысл показателя FSS довольно прост, мы приведем здесь его описание, опираясь на изложение [67]. Предположим, что объектом верификации является поле осадков, представленное прямоугольной матрицей чисел размером  $N\times M$ , и оценивается качество прогноза осадков, превышающих некоторое пороговое значение. Будем интерпретировать поле не как набор точек, а как набор ячеек, в которые наливаются осадки. Назовем превышение порога *явлением дождя* и представим все ячейки в бинарном виде из нулей и единиц: 1 – для факта дождя, 0 – для его отсутствия.

Введем понятие *окрестности* каждой ячейки поля, включая граничные ячейки, в виде квадратного окна с центром в данной ячейке. Таким образом, сторона окна состоит из нечетного количества ячеек, которое может меняться от 1 до  $2 \cdot \max(N, M) - 1$ . Фиктивные ячейки окрестностей вне исходного поля не заполняются константами отсутствия, а обнуляются, что, по мнению авторов [67], мало влияет на конечные результаты, но, по нашему мнению, требует отдельной проверки. *Масштабом сетки* называется размер ячейки в каких-либо площадных единицах, например, в кв. км или в линейных единицах по длине стороны ячейки. Если считать размер ячейки изначально единичным, то в качестве характеристики размера выделенного квадратного окна можно взять количество ячеек на стороне окна.

Назовем *пространственной долей* (или просто *долей*) относительную частоту  $P$  дождя в окрестности, т. е. отношение количества ячеек "с дождем" к полному количеству ячеек в окне. В качестве меры различия (score) выбираем среднюю сумму  $FBS_{(n)}$  квадратов разности соответствующих долей в окрестностях размера  $n$  в поле прогноза и в поле наблюдения с  $N$  ячейками:

$$FBS_{(n)} = \frac{1}{N} \sum (P_{frc(n)} - P_{obs(n)})^2. \quad (1)$$

Оценка  $FBS_{(n)}$  – это аббревиатура словосочетания Fractions Brier Score в честь оценки Брайера для вероятностных прогнозов.

*Оценка мастерства* (skill score) рассчитывается по формуле:

$$FSS_{(n)} = 1 - FBS_{(n)} / FBS_{(n)ref},$$

где  $FBS_{(n)ref}$  – максимально возможное значение  $FBS_{(n)}$  для двух долей, т. е. средняя сумма квадратов этих долей. При расчетах пользуются формулировкой через суммы:

$$FSS_{(n)} = 1 - \frac{\sum (P_{frc(n)} - P_{obs(n)})^2}{\sum P_{frc(n)}^2 + \sum P_{obs(n)}^2}. \quad (2)$$

Запись  $FSS_{(n)}$  делает показатель положительно ориентированным: чем он больше, тем прогноз лучше; он равен 1 при идеальном прогнозе и 0 – при полностью несовпадающем прогнозе. При расчете формулы для  $FSS_{(n)}$  в ситуации с нулевыми осадками в прогнозе и наблюдении возникают нетривиальные последствия, которые обязательно следует учитывать [57, 67]. Очевидно, для  $n=1$  (*масштаб сетки*, grid scale) оценка FSS совпадает с классической оценкой Брайера для верификации вероятностных прогнозов.

Результаты расчетов для набора окон с последовательно растущим размером представляются в виде графика зависимости FSS от *выделенных масштабов* (рис. 4), при этом в большинстве случаев увеличение масштаба

(апскейлинг) приводит к постепенному росту FSS от значения, близкого к 0, до некоторого уровня "насыщения" AFSS.

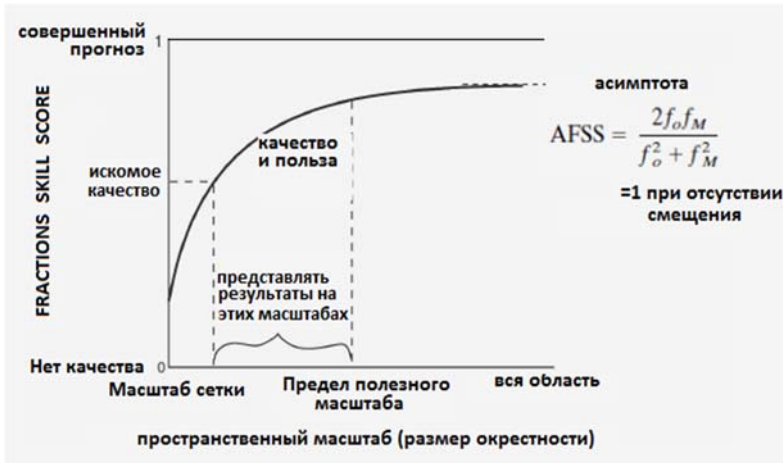


Рис. 4. Схематическое представление показателя FSS относительно пространственного масштаба.

Fig. 4. Schematic diagram of the FSS relative to the spatial scale.

Предельный уровень AFSS на максимальном масштабе и при наличии систематического смещения (сдвига), то есть при неравенстве количества единиц в обоих полях ( $f_{obs} \neq f_{frc}$ ), равен

$$AFSS = 1 - \frac{(f_{obs} - f_{frc})^2}{f_{obs}^2 + f_{frc}^2} = \frac{2f_{obs}f_{frc}}{f_{obs}^2 + f_{frc}^2}, \quad (3)$$

где  $f_{obs}$  – наблюдаемая повторяемость (доля единиц во всем поле наблюдения);  $f_{frc}$  – прогностическая повторяемость (доля единиц во всем прогностическом поле).

Оценка FSS обладает важнейшим свойством для моделирования и прогнозирования, которое заключается в возможности отделения масштабов, не предсказуемых или трудно предсказуемых на основе испытываемой модели, от тех масштабов, в которых модель способна производить прогнозы удовлетворительного качества. По этой причине название статьи Робертса и Лина [64] начинается со словосочетания "scale-selective verification", т. е. верификация с выбором (или с целью выбора) масштаба. Прогнозы в меньших масштабах выпускать не рекомендуется, так как здесь доминирует "синоптический шум" и ошибки растут наиболее быстро в полном соответствии с представлениями о предсказуемости процессов [53]. Известно, что если при таких условиях оценивать прогнозы по точкам, то модель высокого разрешения (например, ~1 км) может оказаться хуже

модели грубого разрешения ( $\sim 10$  км) [54], что, как упоминалось во введении, вызвало рост интереса к *нетрадиционным* пространственным оценкам прогностических полей. Наименьший представительский масштаб определяется точностью сеточных решений ЧПП и должен превышать "эффективное разрешение" мезомасштабной модели [71], равное примерно семи шагам расчетной сетки, а наибольший должен определяться при компромиссном учете требований пользователя, расчетных затрат и допустимого качества прогнозов.

На графике рис. 4, помимо *уровня насыщения*, выделяются еще два важных уровня FSS, зависящие от повторяемости дождя в поле наблюдения ( $f_{obs}$ ): уровень *случайного прогноза* ( $FSS_{random}$ ), равный  $f_{obs}$ , и уровень *однородного прогноза* ( $FSS_{uniform}$ ), равный  $0.5 + f_{obs}/2$ . Более детальное описание и мотивировка введения этих уровней даны в [64].

Наименьший масштаб, в котором FSS превышает значение  $FSS_{uniform}$ , называют *качественным* (skillful scale), иногда – *полезным, приемлемым* масштабом [39]. Предполагается, что пользователю легче воспринять данную величину в качестве контрольной, чем само значение показателя, поэтому этот уровень называют также *целевым качеством* (target skill) с записью показателя с другим индексом ( $FSS_{useful}$ ) [58].

Во введении обсуждались расширяющиеся области приложения показателя FSS. Добавим несколько замечаний о некоторых важных, по нашему мнению, конструктивных элементах алгоритма расчета.

При определении показателя говорилось об окрестностях в форме сеточных квадратов (окон), хотя на практике используются также круговые формы. С помощью квадратов и кругов проще перейти к понятию пространственного масштаба и легко реализовать расчетный алгоритм, хотя для анализа прогноза линии шквалов, фронтов или топографически обусловленных элементов погоды были бы лучше вводить окрестности, отражающие их формы [39]. Возникает вопрос о количестве окрестностей в домене, которое в [67] точно равно полному количеству точек (или ячеек) в домене. Это существенно упрощает расчеты, в которых при таком подходе центры окон (или кругов), попадающие на границы или вблизи них, включаются в общие оценки долей, несмотря на то, что части окрестностей, попадающие внутрь домена, относятся к другим масштабам. Так, в квадратном домене угловые точки будут соответствовать лишь четверти размера выбранного окна, а остальные граничные точки – не более чем половине данного размера на каждом шаге расчетного цикла. Если же использовать только внутренние окрестности домена, то оценки долей в разных окнах будут рассчитываться на выборках разного объема. Возникающие вопросы также решаются с разной степенью общности (см., например, [62, 74, 75]).

Наконец, прямоугольная форма границы области верификации (домена) также используется для удобства организации расчетных циклов. На практике домены имеют иногда сложные геометрические особенности, включая не только нестандартную форму границ, но и несвязность поля

из-за внутренних пустот, которые должны заполняться константами отсутствия или малозначащими числами. В частности, до 2019 г. система наукастинга осадков Гидрометцентра России работала в режиме параллельного прогнозирования в отдельных кругах обзора девяти ДМРЛ на территории ЦФО, с данными в квадратных матрицах размера  $504 \times 504$  [25]. В 2020 г. в систему наукастинга были подключены данные около 30 радиолокаторов, а поля осадков стали представляться в виде квадратных матриц размером  $2151 \times 1951$ . В состав объединенных полей (композигов) вошли граничные и внутренние области с константами отсутствия, учет которых потребовал довольно значительных усилий при оценках качества прогнозов [19]. Проблемы границ произвольной формы и наличия констант отсутствия обсуждаются, например, в статье [62], однако в каждом конкретном случае приходится решать специфические задачи и прибегать к особым приемам обработки данных.

Как говорилось выше, критической проблемой окрестной верификации являются вычислительные затраты, заставляющие сокращать выборки пар полей и прореживать последовательности окрестностей, относительно которых строятся графики зависимости  $FSS(\text{scale})$ .

В этой связи чрезвычайно важными являются разработки более эффективных алгоритмов расчета. В функциях расчета  $FSS$  математического пакета *SpatialVx* на этапе пространственной фильтрации предусмотрена опция быстрого преобразования Фурье (БПФ) [46], внедренная в пакет в 2013 г. [47]. В 2015 г. для увеличения эффективности расчета  $FSS$  был предложен алгоритм компьютерной графики под названием *таблицы суммированных площадей* (summed area tables) [40], вычислительная сложность которого имеет порядок  $O(M)$  ("O большое от M"), где  $M$  – количество ячеек расчетной сетки. С ростом размера окрестности вычислительная сложность БПФ, имеющая порядок  $O(M \log M)$ , быстро возрастает в сравнении со сложностью алгоритма *суммированных площадей*, которая инвариантна относительно внутренних масштабов. Этот алгоритм уже применяется в практике окрестных оценок, в частности в пакете пространственной оценки поля ветра в среде языка R [74].

### 3. Результаты экспериментов

Напомним, что поисковик *объектов* *FeatureFinder* настроен следующими параметрами пространственного осреднения, идентификации и размеров объекта:  $\text{smooth}=9$ ,  $\text{thresh}=1.0$ ,  $\text{min\_size}=40 \times 40=1600$  и  $\text{max\_size}=128 \times 128=16384$ . Ограничение объектов максимально допустимым размером, составляющим четверть размера исходной матрицы в  $256 \times 256=65536$  узлов, предпринято для исключения областей сплошных осадков, с большой вероятностью занимающих зоны обзора нескольких локаторов. Области такого размера затрудняют объектно-ориентированные

оценки качества и нарушают корректность сопоставления значений FSS с внутренними областями исходного домена.

Для каждого радиолокатора формируется список сроков наблюдений и прогнозов заблаговременностей 30, 60, 90, 120 и 150 мин. В теплый период года из около 20 тысяч исходных радиолокационных полей одного локатора отбирается порядка двух-трех тысяч полей с выделенными *объектами* в полях наблюдений (прогностические поля произвольны). В холодный период количество соответствующих полей примерно в два-три раза меньше.

Как и в предыдущих работах по верификации наукастинга осадков [19, 23, 25], используется функция квартильного анализа `summary()` языка R, с помощью которой в последующем выбирается обобщенная (агрегированная) оценка для всего периода испытаний. Функция `summary()` рассчитывает минимум, 25%-ный квантиль, медиану, среднее значение, 75%-ный квантиль, максимум, интерквартильный размах и стандартное отклонение. По результатам статистических экспериментов в качестве агрегированной оценки FSS выбрано медианное значение. Ниже демонстрируются числовые, табличные и графические результаты оценки показателя FSS, характеризующие особенности наукастинга для различных комбинаций параметров верификации. Полный набор этих параметров таков: период года (теплый и холодный), радиолокатор (девять ДМРЛ-С), заблаговременность прогноза (30, 60, 90, 120 и 150 мин), порог интенсивности осадков для оценки превышения (0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3, 4 и 5 мм/ч).

### 3.1. Медианные оценки FSS по случайным выборкам: масштаб приемлемого прогноза

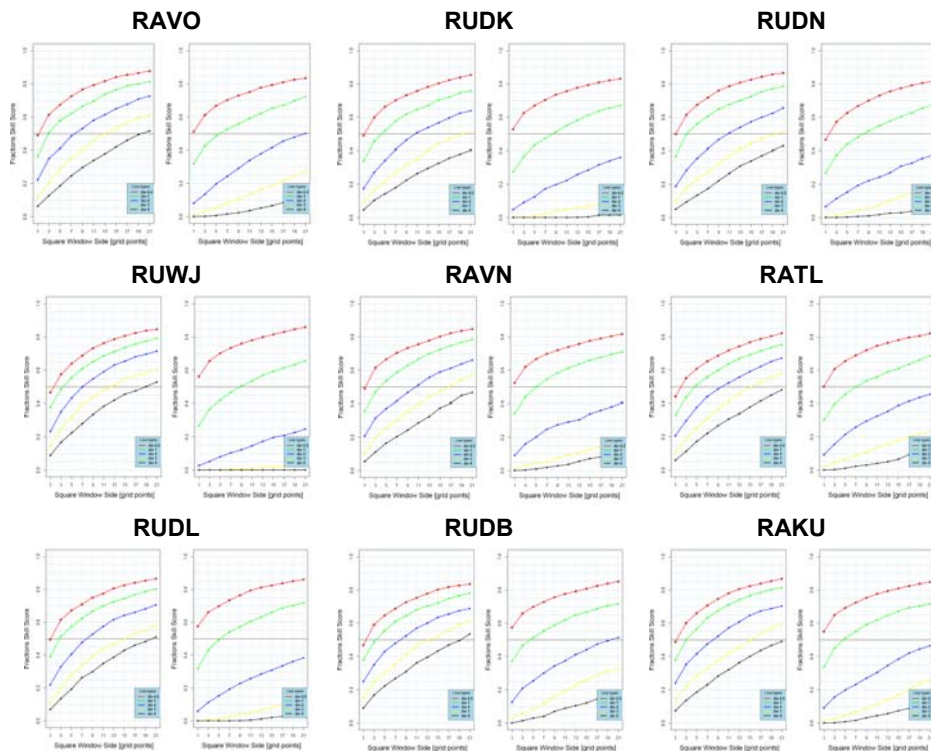
Случайная выборка для верификации состоит примерно из 200 пар полей наблюдение-прогноз. Вначале рассмотрим самый простой способ представления FSS с указанием уровня *приемлемого* прогноза, за который примем значение  $FSS_{\text{accept}} = FSS = 0.5$ , близкое к  $FSS_{\text{usefu}}$  при небольших  $f_{\text{obs}}$ .

Рассмотрим рис. 5, на котором размещены *медианные* оценки FSS прогноза на 60 мин превышений интенсивности 0.5, 1, 2, 3 и 4 мм/ч по данным обоих периодов. Панели помечены идентификаторами ДМРЛ-С, размещенных на рисунке по схеме статей [23, 25].

Каждая из девяти панелей состоит из двух частей: слева графики FSS для теплого периода, справа – для холодного периода. Координаты записаны в нечетных числах, соответствующих длине половины стороны квадратного окна, а истинный масштаб в кв. км равен квадрату удвоенного числа  $2(k-1)+1$ . Первой координате соответствует квадрат со стороной 2 км, второй координате ( $k=3$ ) – со стороной 10 км и т. д. до координаты  $k=21$ , соответствующей стороне квадратного окна длиной 82 км.

На рисунке отчетливо видно общее сходство всех графиков теплого периода и холодного периода по отдельности, что свидетельствует об отнесенном сходстве качества наукастинга по данным всех локаторов.

Это в свою очередь означает, что и различия между результатами холодного и теплого периодов носят систематический характер, отражающий, возможно, климатические особенности полей осадков на территории ЦФО.



**Рис. 5.** Медианные оценки качества наукастинга интенсивности осадков на 60 мин в категориях превышения порогов (мм/ч): 0.5 (красный), 1 (зеленый), 2 (голубой), 3 (желтый) и 4 (черный). Линия 0.5 – контрольный уровень качества, соответствующий показателю Пирса-Обухова  $PSS=0.5$  и оценке угроз  $CSI=0.333$ .

**Fig. 5.** Median rainfall intensity nowcasting quality scores for 60 min in threshold exceedance categories (mm/h): 0.5 (red), 1 (green), 2 (blue), 3 (yellow), and 4 (black). The 0.5 line denotes a reference quality level, corresponding to the Peirce Skill Score equaling  $PSS=0.5$ , and the Critical Success Index equaling  $CSI=0.333$ .

Обычно чем больше порог интенсивности осадков, тем ниже значение FSS. Для некоторых порогов кривые FSS не достигают приемлемого качества до конца графика: это означает, что в соответствующих окнах поля прогноза и поля наблюдения либо совсем нет ячеек с осадками этой категории, либо они не встречаются в соответствующих окнах площадью меньше 82 кв. км.

Кривые FSS холодного периода расположены заметно ниже одноцветных кривых теплого периода. Однако существует сходство кривых разных



цветов, возникающее в согласии с климатическими свойствами интенсивности осадков: в средних широтах в теплый период года интенсивность осадков вдвое-втрое выше интенсивности в холодный период. В частности, почти идеальное удвоение наблюдается на панели для локатора Воейково: красная кривая (0.5 мм/ч) в холодный период походит на зеленую кривую (1 мм), зеленая кривая – на голубую (2 мм/ч), а голубая – на черную (4 мм/ч).

Красная кривая (порог 0.5 мм) всегда пересекает контрольную линию на первых окнах со стороны в одну-пять ячеек, т. е. в линейных масштабах от 2 до 10 км.

В теплый период в большинстве случаев все кривые, кроме черной (4 мм), пересекают контрольную линию в интервале масштабов до 82 км.

Что дополнительно можно извлечь из этих графиков?

По масштабам, на которых кривая FSS пересекает уровень 0.5, составим таблицу (табл. 1). Очевидно, что чем меньше координата пересечения, тем лучше прогноз, поэтому напрашивается мысль ранжировать качество наукастинга по обзорам локаторов с помощью "кортежей" пересечений. Однако в столбцах таблицы имеется много совпадений, и строгое упорядочивание таких "кортежей" затруднительно, кроме некоторых столбцов с выделяющимися наилучшими или наихудшими прогнозами.

**Таблица 1.** Условный пространственный масштаб приемлемого прогноза: пересечение кривой FSS горизонтального уровня  $FSS_{\text{акцепт}}=0.5$  прогноза превышения порога интенсивности в абсциссе под номером k. Фактическая длина масштабного окна рассчитывается по формуле  $2[2(k-1)+1]$  км

**Table 1.** Conditional spatial scale of an acceptable forecast: the intersection of the FSS curve of the horizontal level  $FSS_{\text{акцепт}}=0.5$  for the forecast of exceeding the intensity threshold in the abscissa numbered k. The actual length of the scale window is calculated using the formula  $2[2(k-1)+1]$  km

|      | Масштаб приемлемого прогноза.<br>Теплый период |    |    |   |     | Порог и масштаб приемлемого прогноза.<br>Холодный период |     |     |     |     |
|------|--|----|----|---|-----|--|-----|-----|-----|-----|
|      | 4  | 3  | 2  | 1 | 0.5 | 4  | 3   | 2   | 1   | 0.5 |
|      | RAKU   | 21 | 15 | 8 | 3   | 1  | 999 | 999 | 999 | 5   |
| RATL | 21   | 15 | 9  | 5 | 2   | 999  | 999 | 999 | 7   | 1   |
| RAVN | 21   | 17 | 11 | 4 | 1   | 999  | 999 | 999 | 5   | 1   |
| RAVO | 19   | 13 | 7  | 3 | 1   | 999  | 999 | 21  | 6   | 1   |
| RUDB | 19   | 13 | 8  | 3 | 1   | 999  | 999 | 19  | 4   | 1   |
| RUDK | 999  | 19 | 11 | 4 | 1   | 999  | 999 | 999 | 8   | 1   |
| RUDL | 20   | 15 | 8  | 3 | 1   | 999  | 999 | 999 | 5   | 1   |
| RUDN | 999  | 20 | 11 | 3 | 1   | 999  | 999 | 999 | 8   | 2   |
| RUWJ | 19   | 13 | 7  | 3 | 2   | 999  | 999 | 999 | 9   | 1   |

*Примечание.* Числом 999 отмечено отсутствие пересечения уровня  $FSS=0.5$  на интервале окон.

*Note.* The number 999 marks the absence of crossing the  $FSS=0.5$  level in the interval of windows.

По строкам таблицы для теплого периода хорошо видно, что уровни пересечения для всех р/л близки, а это численно подтверждает однородность наблюдений использованных ДМРЛ. Средние по столбцам значения координат пересечений равны  $k = (1.2, 3.4, 8.9, 15.6)$  для порогов  $\text{thr} = (0.5, 1, 2, 3)$  соответственно. Используя линейную оценку масштаба по формуле  $4k-2$ , получим последовательность размеров окон в км: 2.8, 11.6, 33.6 и 60.4. Можно считать удачным превышение порога  $FSS_{\text{акцепт}}$  при прогнозе интенсивности осадков выше 0.5 мм/ч в окне со стороной до 12 км (что, кстати, имеет порядок "эффективной" размерности сетки в  $7\Delta x$  по Скамароку [71]). Однако если потребителя мезомасштабной прогностической продукции вполне удовлетворит качество  $FSS \geq 0.5$  прогноза превышения 0.5 мм/ч в области порядка  $10 \times 10$  кв. км, то аналогичное качество превышения 3 мм/ч в области размером не менее  $60 \times 60$  кв. км может показаться ему бесполезным.

### 3.2. Медианные оценки FSS по случайным выборкам: масштаб полезного прогноза

Перейдем к более строгому порогу *полезного* прогноза:  $FSS_{\text{useful}} = FSS_{\text{акцепт}} + f_{\text{obs}}/2$ . Напомним, что превышение этого уровня эквивалентно положительному значению критерия Пирса-Обухова (Peirce Skill Score, PSS), когда доля попаданий превосходит долю ложных тревог, а критический индекс успешности (Critical Success Index, CSI) превышает  $1/3$ , т. е. когда удвоенное количество попаданий превышает сумму промахов и ложных тревог [67].

Выходная табличная продукция значений FSS дополняется двумя значениями – долей осадков в поле наблюдения ( $f_{\text{obs}}$ ) и долей осадков в синхронизированном поле прогноза ( $f_{\text{frc}}$ ).

Рассмотрим, какие числовые и графические особенности возникают при этом уровне качества, и представим результаты расчетов FSS относительно набора порогов интенсивности и разных прогностических сроков.

#### 3.2.1. Пространственная доля осадков в полях наблюдения и прогноза

Пространственная частота дождя в радиолокационных и прогностических полях равна относительному количеству единиц в бинарных полях, т. е. доле ячеек с осадками указанной интенсивности. Эти характеристики используются в определении калиброванности полей, в оценке уровня насыщения и минимального уровня качества случайного прогноза.

В табл. 2 собраны оценки этих долей при прогнозе на 60 мин превышения порога 1 мм/ч.

**Таблица 2.** Пространственная доля осадков ( $\geq 1$  мм/ч) в полях р/л наблюдений (of0) и прогноза (ff0) на 60 мин. Обозначения (кроме очевидных): q25 и q72 – квантили 25% и 75%; IQR (inter-quartile range), межквартильный размах IQR=q75-q25

**Table 2.** Spatial fraction of precipitation ( $\geq 1$  mm/h) in the fields of radar observations (of0) and forecast (ff0) for 60 min. Designations (except for the obvious ones): q25 and q72 are 25% and 75% quartiles; IQR is the interquartile range IQR=q75-q25

| Р/л             | Доли в домене | min   | q25   | med   | mean  | q75   | max   | IQR   |
|-----------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Теплый период   |               |       |       |       |       |       |       |       |
| RAKU            | of0           | 0.012 | 0.038 | 0.054 | 0.063 | 0.076 | 0.212 | 0.038 |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.035 | 0.050 | 0.060 | 0.079 | 0.198 | 0.044 |
| RATL            | of0           | 0.013 | 0.033 | 0.048 | 0.053 | 0.068 | 0.160 | 0.035 |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.025 | 0.043 | 0.050 | 0.067 | 0.182 | 0.042 |
| RAVN            | of0           | 0.012 | 0.032 | 0.042 | 0.050 | 0.060 | 0.163 | 0.028 |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.027 | 0.041 | 0.046 | 0.060 | 0.187 | 0.033 |
| RAVO            | of0           | 0.015 | 0.038 | 0.052 | 0.059 | 0.070 | 0.167 | 0.032 |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.033 | 0.049 | 0.056 | 0.069 | 0.187 | 0.036 |
| RUDB            | of0           | 0.008 | 0.027 | 0.043 | 0.049 | 0.067 | 0.132 | 0.040 |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.022 | 0.037 | 0.049 | 0.065 | 0.185 | 0.043 |
| RUDK            | of0           | 0.016 | 0.040 | 0.057 | 0.064 | 0.085 | 0.165 | 0.045 |
|                 | ff0           | 0.003 | 0.036 | 0.053 | 0.060 | 0.077 | 0.195 | 0.041 |
| RUDL            | of0           | 0.010 | 0.033 | 0.049 | 0.058 | 0.075 | 0.193 | 0.042 |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.026 | 0.048 | 0.057 | 0.078 | 0.261 | 0.052 |
| RUDN            | of0           | 0.014 | 0.040 | 0.062 | 0.069 | 0.088 | 0.201 | 0.048 |
|                 | ff0           | 0.005 | 0.037 | 0.062 | 0.070 | 0.094 | 0.236 | 0.057 |
| RUWJ            | of0           | 0.016 | 0.035 | 0.049 | 0.059 | 0.070 | 0.183 | 0.035 |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.031 | 0.052 | 0.061 | 0.072 | 0.236 | 0.041 |
| Холодный период |               |       |       |       |       |       |       |       |
| RAKU            | of0           | 0.024 | 0.045 | 0.069 | 0.079 | 0.105 | 0.205 | 0.060 |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.033 | 0.064 | 0.075 | 0.113 | 0.265 | 0.080 |
| RATL            | of0           | 0.023 | 0.038 | 0.052 | 0.062 | 0.076 | 0.196 | 0.038 |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.028 | 0.049 | 0.058 | 0.077 | 0.205 | 0.049 |
| RAVN            | of0           | 0.021 | 0.033 | 0.039 | 0.041 | 0.047 | 0.073 | 0.014 |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.024 | 0.037 | 0.039 | 0.057 | 0.085 | 0.033 |
| RAVO            | of0           | 0.019 | 0.035 | 0.047 | 0.058 | 0.075 | 0.143 | 0.040 |
|                 | ff0           | 0.001 | 0.021 | 0.040 | 0.056 | 0.073 | 0.218 | 0.052 |
| RUDB            | of0           | 0.020 | 0.045 | 0.066 | 0.072 | 0.096 | 0.184 | 0.051 |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.033 | 0.057 | 0.070 | 0.099 | 0.252 | 0.066 |
| RUDK            | of0           | 0.021 | 0.037 | 0.048 | 0.055 | 0.068 | 0.149 | 0.031 |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.024 | 0.040 | 0.051 | 0.069 | 0.191 | 0.045 |
| RUDL            | of0           | 0.022 | 0.038 | 0.053 | 0.066 | 0.073 | 0.207 | 0.035 |
|                 | ff0           | 0.002 | 0.029 | 0.047 | 0.070 | 0.088 | 0.295 | 0.059 |
| RUDN            | of0           | 0.026 | 0.045 | 0.060 | 0.075 | 0.090 | 0.208 | 0.045 |
|                 | ff0           | 0.002 | 0.030 | 0.055 | 0.066 | 0.089 | 0.221 | 0.059 |
| RUWJ            | of0           | 0.024 | 0.037 | 0.047 | 0.057 | 0.058 | 0.223 | 0.021 |
|                 | ff0           | 0.001 | 0.020 | 0.034 | 0.049 | 0.060 | 0.294 | 0.040 |

Уточним, пространственные доли оцениваются по количеству единиц относительно 65536 точек поля, а квартильные характеристики рассчитываются по ранжированным значениям этих долей (в количестве около 200 чисел). Например, медианное значение 0.054 означает, что половина полей (из выбранных примерно 2 сотен) заселена единицами в количестве меньше 3540 ячеек (округление до целого числа произведения  $0.054 \times 65536$ ), а половина заселена единицами в количестве больше 3540 точек. Пороговое количество единиц эквивалентно квадрату со стороной около 120 км. В то же время значению 0.05 для прогностических полей соответствует меньшее количество ячеек (около 3277), что эквивалентно квадрату со стороной около 114 км. Жирным выделены значения медианной оценки пространственной доли осадков выше 1 мм/ч. Заметим, что нулевые значения в строках ff0 фиктивны из-за грубой точности округления при оценке долей относительно числа 65536.

По данным таблицы наблюдается довольно равномерное распределение значений по столбцам, что свидетельствует о ранее отмеченной однородности радиолокационных данных среди использованных локаторов. К общим особенностям можно отнести также то, что медианные значения в полях наблюдений превышают медианные значения в полях прогноза (кроме данных локатора RUWJ в теплый период). При этом максимальные значения медиан (столбцы max) ведут себя противоположно: медианы для прогнозов превышают медианы для наблюдений, что отражается и в межквартильном размахе. Напрашивается вывод, что по территории ЦФО модель STEPS более активно "засевает" прогностические поля осадками выше 1 мм/ч в оба периода года.

Распределение осадков выше заданного порога по всему домену может приводить к вырожденным ситуациям из-за делителя в формуле расчета FSS, когда оценка контрольного прогноза (сумма квадратов долей) может оказаться нулевой и расчет либо прекратится аварийно, либо породит фиктивное экстремальное значение показателя. Автор статьи [57] доказывает, что FSS превышает нулевое значение тогда и только тогда, когда в обоих полях имеются ячейки с соответствующими осадками, что, кстати, говорит о *неспособности показателя FSS отделять промахи от ложных тревог*. Ситуации с вырождением рекомендуется упреждать дополнительной проверкой полей на вырожденность, что при использовании функции `sumtagu()` не требуется: вырожденные случаи бракуются без аварийного останова, открывается счетчик нечисловых величин и характеристики рассчитываются по оставшимся числовым значениям с соответствующими комментариями. Значения пространственных долей для большого порога собраны в табл. 3.

Характеристики пространственных долей и количество забракованных прогнозов в табл. 3 убедительно демонстрируют, какие диапазоны порогов превышения и в какие периоды года рекомендуются для применения категориальных оценок качества.

**Таблица 3.** Пространственная доля осадков ( $\geq 4$  мм/ч) в полях р/л наблюдений (of0) и прогноза (ff0) на 60 мин. Обозначения те же, что и в табл. 2

**Table 3.** Spatial fraction of precipitation ( $\geq 4$  mm/h) in the fields of radar observations (of0) and forecast (ff0) for 60 min. Designations are the same as in Table 2

| Р/л             | Доли в домене | min   | q25   | med   | mean  | q75   | max   | IQR        |
|-----------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|
| Теплый период   |               |       |       |       |       |       |       |            |
| RAKU            | of0           | 0.001 | 0.007 | 0.011 | 0.013 | 0.017 | 0.045 | 0.010      |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.005 | 0.008 | 0.012 | 0.016 | 0.044 | 0.011      |
| RATL            | of0           | 0.000 | 0.005 | 0.009 | 0.010 | 0.012 | 0.042 | 0.007      |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.003 | 0.007 | 0.009 | 0.013 | 0.050 | 0.010      |
| RAVN            | of0           | 0.000 | 0.005 | 0.008 | 0.010 | 0.012 | 0.045 | 0.007      |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.003 | 0.007 | 0.009 | 0.012 | 0.080 | 0.009      |
| RAVO            | of0           | 0.000 | 0.004 | 0.008 | 0.010 | 0.013 | 0.039 | 0.009      |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.003 | 0.007 | 0.009 | 0.013 | 0.052 | 0.010      |
| RUDB            | of0           | 0.001 | 0.006 | 0.010 | 0.013 | 0.015 | 0.052 | 0.009      |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.004 | 0.008 | 0.012 | 0.015 | 0.070 | 0.011      |
| RUDK            | of0           | 0.000 | 0.004 | 0.008 | 0.010 | 0.014 | 0.046 | 0.010      |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.002 | 0.006 | 0.010 | 0.013 | 0.050 | 0.011      |
| RUDL            | of0           | 0.001 | 0.005 | 0.009 | 0.012 | 0.016 | 0.066 | 0.011      |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.003 | 0.007 | 0.011 | 0.013 | 0.118 | 0.010      |
| RUDN            | of0           | 0.000 | 0.006 | 0.009 | 0.012 | 0.016 | 0.054 | 0.010      |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.004 | 0.009 | 0.012 | 0.017 | 0.062 | 0.013      |
| RUWJ            | of0           | 0.000 | 0.006 | 0.009 | 0.013 | 0.017 | 0.094 | 0.011      |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.004 | 0.009 | 0.012 | 0.016 | 0.092 | 0.012      |
| Холодный период |               |       |       |       |       |       |       |            |
| RAKU            | of0           | 0.000 | 0.000 | 0.002 | 0.004 | 0.006 | 0.022 | 0.006      |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.003 | 0.005 | 0.026 | 0.005 (8)  |
| RATL            | of0           | 0.000 | 0.001 | 0.002 | 0.004 | 0.006 | 0.021 | 0.005      |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.003 | 0.005 | 0.025 | 0.005 (4)  |
| RAVN            | of0           | 0.000 | 0.001 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.008 | 0.003      |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.002 | 0.003 | 0.012 | 0.003 (5)  |
| RAVO            | of0           | 0.000 | 0.001 | 0.002 | 0.003 | 0.005 | 0.019 | 0.004      |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.026 | 0.002 (5)  |
| RUDB            | of0           | 0.000 | 0.001 | 0.003 | 0.006 | 0.008 | 0.031 | 0.007      |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.000 | 0.002 | 0.005 | 0.007 | 0.043 | 0.007 (7)  |
| RUDK            | of0           | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.002 | 0.002 | 0.012 | 0.002      |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 | 0.018 | 0.001 (39) |
| RUDL            | of0           | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.003 | 0.003 | 0.029 | 0.003      |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.003 | 0.002 | 0.048 | 0.002 (31) |
| RUDN            | of0           | 0.000 | 0.000 | 0.002 | 0.004 | 0.006 | 0.021 | 0.006      |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.003 | 0.004 | 0.025 | 0.004 (17) |
| RUWJ            | of0           | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 | 0.006 | 0.001      |
|                 | ff0           | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 | 0.012 | 0.001 (27) |

*Примечание:* красным цветом указано количество прогнозов, исключенных из расчета FSS по причине вырождения полей осадков.

*Note:* red color indicates the number of forecasts excluded from the FSS calculation due to degeneration of precipitation fields.

### 3.2.2. Табличное и графическое представление оценок FSS

Агрегированные оценки FSS дают обобщенное представление о качестве наукастинга в круге обзора каждого локатора и позволяют нанести на один график много содержательной информации.

Вначале рассмотрим табличные представления. В табл. 4 собраны значения FSS оценки прогнозов превышения порогов 1, 2 и 3 мм/ч на 60 мин в области обзора ДМРЛ Курск (RAKU). Во внутренних таблицах для теплого периода и порогов 1 и 2 мм/ч оставлены только строки до красной строки холодного периода, которая выделяет минимальный приемлемый масштаб ( $FSS_{\text{median}} \geq 0.5$ ) относительно заданного порога.

**Таблица 4.** Область обзора р/л Курск (RAKU). Пространственная доля осадков ( $\geq 1, 2$  и 3 мм/ч) в полях р/л наблюдений (of0) и прогноза (ff0) на 60 мин. Обозначения те же, что и в табл. 2

**Table 4.** Coverage area of the Kursk radar (RAKU). Spatial fraction of precipitation ( $\geq 1, 2$  and 3 mm/h) in the fields of radar observations (of0) and forecast (ff0) for 60 min. Designations are the same as in Table 2

| Порог,<br>мм/ч | Окно  | Теплый период |       |       |       |       |       |       |
|----------------|-------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                |       | min           | q25   | med   | mean  | q75   | max   | IQR   |
| 1              | w01   | 0.001         | 0.277 | 0.378 | 0.376 | 0.496 | 0.718 | 0.219 |
|                | w03   | 0.001         | 0.383 | 0.500 | 0.486 | 0.617 | 0.802 | 0.234 |
|                | w05   | 0.001         | 0.453 | 0.566 | 0.548 | 0.685 | 0.844 | 0.232 |
| ....           |       |               |       |       |       |       |       |       |
| 2              | w01   | 0.001         | 0.146 | 0.240 | 0.245 | 0.340 | 0.593 | 0.194 |
|                | w03   | 0.001         | 0.226 | 0.352 | 0.348 | 0.476 | 0.756 | 0.250 |
|                | w05   | 0.001         | 0.287 | 0.416 | 0.412 | 0.555 | 0.813 | 0.268 |
|                | w07   | 0.001         | 0.327 | 0.475 | 0.464 | 0.605 | 0.842 | 0.278 |
|                | w09   | 0.001         | 0.367 | 0.522 | 0.507 | 0.650 | 0.895 | 0.283 |
|                | w11   | 0.001         | 0.400 | 0.572 | 0.543 | 0.687 | 0.925 | 0.287 |
|                | w13   | 0.001         | 0.439 | 0.608 | 0.574 | 0.716 | 0.939 | 0.277 |
|                | w15   | 0.001         | 0.471 | 0.647 | 0.600 | 0.746 | 0.945 | 0.275 |
|                | w17   | 0.001         | 0.504 | 0.673 | 0.623 | 0.775 | 0.948 | 0.271 |
|                | w19   | 0.001         | 0.530 | 0.688 | 0.642 | 0.794 | 0.950 | 0.264 |
|                | w21   | 0.001         | 0.553 | 0.703 | 0.660 | 0.808 | 0.952 | 0.255 |
|                | w23   | 0.001         | 0.575 | 0.726 | 0.675 | 0.822 | 0.956 | 0.247 |
|                | w25   | 0.001         | 0.591 | 0.744 | 0.689 | 0.833 | 0.959 | 0.242 |
| ....           |       |               |       |       |       |       |       |       |
| 3              | w01   | 0.001         | 0.054 | 0.134 | 0.156 | 0.220 | 0.519 | 0.166 |
|                | w03   | 0.001         | 0.104 | 0.220 | 0.244 | 0.354 | 0.705 | 0.250 |
|                | w05   | 0.001         | 0.154 | 0.282 | 0.302 | 0.432 | 0.776 | 0.278 |
|                | w07   | 0.001         | 0.205 | 0.328 | 0.351 | 0.502 | 0.815 | 0.297 |
|                | w09   | 0.001         | 0.241 | 0.374 | 0.394 | 0.550 | 0.865 | 0.309 |
|                | w11   | 0.001         | 0.264 | 0.420 | 0.430 | 0.591 | 0.891 | 0.327 |
|                | w13   | 0.001         | 0.294 | 0.455 | 0.462 | 0.633 | 0.903 | 0.339 |
|                | w15   | 0.001         | 0.324 | 0.496 | 0.489 | 0.672 | 0.909 | 0.348 |
|                | w17   | 0.001         | 0.345 | 0.538 | 0.514 | 0.699 | 0.910 | 0.354 |
|                | w19   | 0.001         | 0.368 | 0.570 | 0.536 | 0.719 | 0.916 | 0.351 |
|                | w21   | 0.001         | 0.390 | 0.591 | 0.555 | 0.733 | 0.926 | 0.343 |
|                | w23   | 0.001         | 0.411 | 0.606 | 0.573 | 0.755 | 0.932 | 0.344 |
|                | w25   | 0.001         | 0.430 | 0.629 | 0.589 | 0.766 | 0.937 | 0.336 |
|                | w27   | 0.001         | 0.451 | 0.655 | 0.604 | 0.776 | 0.941 | 0.325 |
|                | w29   | 0.001         | 0.467 | 0.663 | 0.618 | 0.794 | 0.945 | 0.327 |
| w31            | 0.001 | 0.480         | 0.675 | 0.630 | 0.806 | 0.953 | 0.326 |       |

| Порог,<br>мм/ч | Окно | Холодный период |       |       |       |       |       |       |
|----------------|------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                |      | min             | q25   | med   | mean  | q75   | max   | IQR   |
| 1              | w01  | 0.001           | 0.218 | 0.336 | 0.326 | 0.430 | 0.721 | 0.212 |
|                | w03  | 0.001           | 0.308 | 0.451 | 0.426 | 0.541 | 0.846 | 0.233 |
|                | w05  | 0.001           | 0.367 | 0.510 | 0.477 | 0.591 | 0.902 | 0.224 |
|                | .... |                 |       |       |       |       |       |       |
| 2              | w01  | 0.001           | 0.013 | 0.091 | 0.128 | 0.204 | 0.666 | 0.191 |
|                | w03  | 0.001           | 0.033 | 0.156 | 0.193 | 0.326 | 0.817 | 0.293 |
|                | w05  | 0.001           | 0.052 | 0.198 | 0.234 | 0.396 | 0.887 | 0.344 |
|                | w07  | 0.001           | 0.075 | 0.232 | 0.269 | 0.442 | 0.927 | 0.367 |
|                | w09  | 0.001           | 0.096 | 0.270 | 0.299 | 0.485 | 0.949 | 0.389 |
|                | w11  | 0.001           | 0.116 | 0.304 | 0.326 | 0.526 | 0.963 | 0.410 |
|                | w13  | 0.001           | 0.133 | 0.346 | 0.351 | 0.551 | 0.973 | 0.418 |
|                | w15  | 0.001           | 0.140 | 0.384 | 0.373 | 0.574 | 0.978 | 0.434 |
|                | w17  | 0.001           | 0.155 | 0.420 | 0.393 | 0.602 | 0.982 | 0.447 |
|                | w19  | 0.001           | 0.170 | 0.445 | 0.411 | 0.622 | 0.984 | 0.452 |
|                | w21  | 0.001           | 0.193 | 0.465 | 0.428 | 0.641 | 0.986 | 0.448 |
|                | w23  | 0.001           | 0.211 | 0.490 | 0.443 | 0.654 | 0.988 | 0.443 |
|                | w25  | 0.001           | 0.230 | 0.510 | 0.458 | 0.673 | 0.990 | 0.443 |
|                | .... |                 |       |       |       |       |       |       |
| 3              | w01  | 0.001           | 0.001 | 0.013 | 0.068 | 0.100 | 0.660 | 0.099 |
|                | w03  | 0.001           | 0.001 | 0.025 | 0.111 | 0.172 | 0.809 | 0.171 |
|                | w05  | 0.001           | 0.001 | 0.046 | 0.139 | 0.246 | 0.876 | 0.245 |
|                | w07  | 0.001           | 0.001 | 0.068 | 0.165 | 0.294 | 0.919 | 0.293 |
|                | w09  | 0.001           | 0.002 | 0.086 | 0.187 | 0.336 | 0.949 | 0.334 |
|                | w11  | 0.001           | 0.003 | 0.114 | 0.208 | 0.370 | 0.970 | 0.367 |
|                | w13  | 0.001           | 0.006 | 0.139 | 0.227 | 0.398 | 0.982 | 0.392 |
|                | w15  | 0.001           | 0.010 | 0.167 | 0.245 | 0.424 | 0.988 | 0.414 |
|                | w17  | 0.001           | 0.013 | 0.201 | 0.262 | 0.444 | 0.990 | 0.431 |
|                | w19  | 0.001           | 0.019 | 0.241 | 0.277 | 0.471 | 0.992 | 0.452 |
|                | w21  | 0.001           | 0.028 | 0.257 | 0.292 | 0.490 | 0.993 | 0.462 |
|                | w23  | 0.001           | 0.033 | 0.287 | 0.306 | 0.508 | 0.993 | 0.475 |
|                | w25  | 0.001           | 0.036 | 0.292 | 0.320 | 0.520 | 0.994 | 0.484 |
|                | w27  | 0.001           | 0.038 | 0.311 | 0.332 | 0.552 | 0.994 | 0.514 |
|                | w29  | 0.001           | 0.041 | 0.337 | 0.344 | 0.572 | 0.995 | 0.531 |
|                | w31  | 0.001           | 0.046 | 0.356 | 0.356 | 0.594 | 0.995 | 0.548 |

*Примечание.* Красным цветом выделена строка для наименьшего масштаба, в котором медианное значение FSS превышает уровень приемлемого прогноза 0.5.

*Note.* The row for the smallest scale, in which the median FSS value exceeds the acceptable forecast level of 0.5, is highlighted in red.

Обилие числового табличного материала затрудняет возможность обобщений, но предоставляет информацию о важных деталях верификации. Например, табл. 4 позволяет увидеть особенности FSS в зависимости от роста размера окна (масштаба) и от порога превышения для периодов отдельно. Обратим внимание на отличие оценок качества между двумя периодами. В столбце третьего квартиля (q75) холодного периода зеленым цветом помечены минимальные масштабы гарантированного приемлемого

прогноза лишь для четверти прогнозов (около полусотни). Так, относительно порога 1 мм/ч не менее полусотни прогнозов обеспечены приемлемым качеством в масштабе 10×10 кв. км, относительно порога 2 мм/ч – в масштабе 42×42 кв. км, а относительно порога 3 мм/ч – в масштабе 90×90 кв. км, против масштабов 10×10, 18×18 и 26×26 кв. км относительно аналогичных порогов в теплый период.

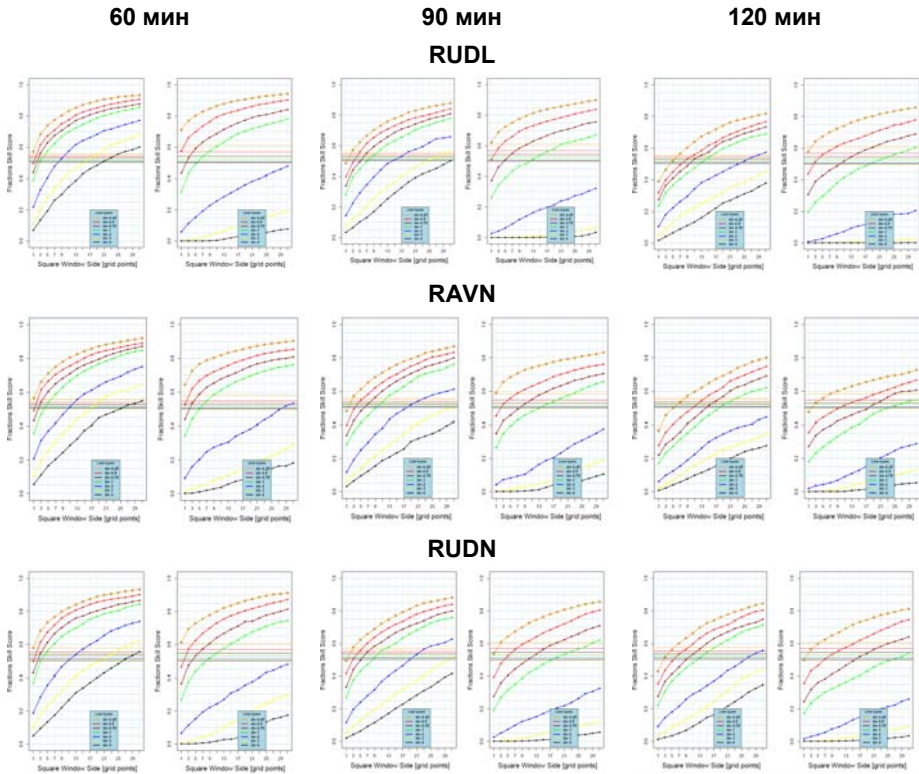
Сравнивая столбцы для медианы и средней величины (mean), можно прийти к выводу, что оценки масштабов приемлемого прогноза в медианном обобщении будут в целом сходны с оценками при обобщении по среднему значению FSS.

Графическое представление намного экономичнее характеризует суммарное качество прогноза, чем труднообозримые числовые таблицы, но и здесь необходим рациональный выбор параметров верификации. Например, в дополнение к сравнительному анализу качества по периодам года можно добавить сравнение по географическому расположению ДМРЛ: локаторы Воейково (RAVO), Внуково (RAVN) и Курск (RAKU) расположены в некотором долготном поясе, а локаторы Смоленск (RUDL), Внуково (RAVN) и Нижний Новгород (RUDN) – в некотором широтном поясе. На рис. 6 показаны значения FSS для прогнозов на 60, 90 и 120 мин по данным широтно ориентированных р/л относительно семи порогов и семи уровней полезного прогноза  $FSS_{\text{useful}}$ .

В первую очередь рассмотрим уровни полезности, которые оказались различными в зависимости от порогов и заметно отличающимися от уровня приемлемого масштаба ( $FSS=0.5$ ). Отличие от 0.5 равно половине пространственной доли превышения порога в радиолокационном поле наблюдения, поэтому чем ниже порог интенсивности, тем больше ячеек сетки занято соответствующей категорией осадков и тем выше порог полезности  $FSS_{\text{useful}}$ . Уровни полезности для высоких порогов (начиная с 3 мм/ч в теплый период и с 2 мм/ч в холодный) малы и почти неотличимы от 0.5. Так как уровень полезности зависит только от полей наблюдения, то он не зависит от заблаговременности, что отражено на данном рисунке. Как и следовало ожидать, с ростом заблаговременности все кривые дружно снижаются, при этом уменьшение значений довольно сходно для всех трех локаторов: отчетливого широтного различия не наблюдается. При этом чем больше порог, тем быстрее соответствующая кривая FSS "прилипают" к оси масштабов, создавая вырожденные ситуации [57]. Добавим, что визуального отличия не наблюдается и в ходе кривых для долготно ориентированных локаторов Войково, Внуково и Курск.

Рассмотрим еще один способ более компактного графического представления оценок FSS. Во-первых, различие кривых и их расцветок для одинаковых порогов в двух периодах года позволяет поместить оба набора кривых на одну панель: один цвет, но одна линия сплошная, вторая – пунктирная. Во-вторых, можно избавиться от уровней полезности, перейдя к разности  $FSS - FSS_{\text{useful}}$  с соответствующей заменой координатных значений.



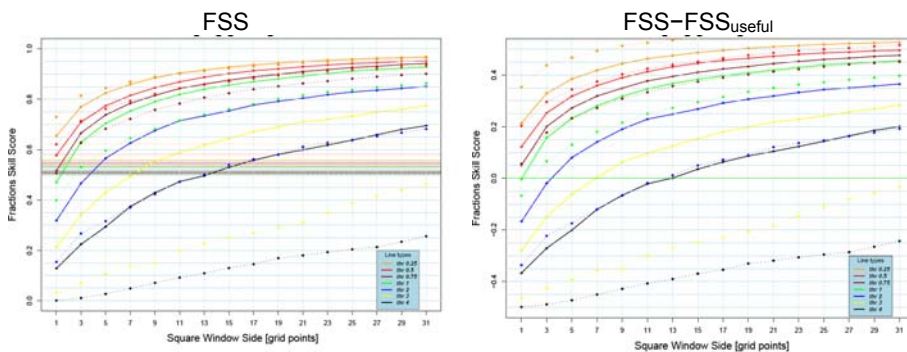


**Рис. 6.** Медианные оценки качества наукастинга осадков на 60, 90 и 120 мин в категориях превышений порогов (мм/ч): 0.25 (оранжевый), 0.5 (красный), 0.75 (коричневый), 1 (зеленый), 2 (голубой), 3 (желтый) и 4 (черный). Уровни *полезного* прогноза обозначены цветами соответствующих порогов.

**Fig. 6.** Median rainfall intensity nowcasting quality scores for 60 min in threshold exceedance categories (mm/h): 0.5 (red), 1 (green), 2 (blue), 3 (yellow), and 4 (black). *Useful* forecast levels are indicated by the colors of the corresponding thresholds.

На рис. 7 демонстрируется пример графика показателей FSS для прогноза на 30 мин по данным локатора Курск. Хорошо заметно, что отличие панелей состоит в более широком расположении кривых по вертикали на правой панели. Сплошные и точечные кривые одного цвета не сливаются, однако слабо просматривается точечная кривая желтого цвета (порог 2 мм/ч). На правой панели более контрастно видно, что кривые FSS для порогов 0.25 и 0.5 мм/ч в холодный период превышают кривые FSS для тех же порогов на всем диапазоне окон, в то время как для остальных порогов ситуация противоположная. От порога 0.75 до 4 мм/ч кривые одного цвета в холодный период отстают от аналогичных кривых в теплый период, и чем больше порог, тем сильнее отставание. Имеются похожие кривые между

холодным и теплым периодами: пороги 0.5 и 0.5, 0.75 и 1, 1 и 2, 2 и 4 мм/ч. Возможно, эти сопоставления уточняют интервал отмеченных выше климатологических соотношений между значениями интенсивности осадков в разные периоды года в средних широтах.



**Рис. 7.** Область обзора р/л Курск. Медианные оценки FSS и отклонений от уровня  $FSS_{\text{useful}}$  прогноза осадков на 30 мин в категориях превышений порогов (мм/ч): 0.25 (оранжевый), 0.5 (красный), 0.75 (коричневый), 1 (зеленый), 2 (голубой), 3 (желтый) и 4 (черный). Левая панель – значения FSS; уровни *полезного* прогноза отмечены цветами соответствующих порогов. Правая панель – отклонения  $FSS - FSS_{\text{useful}}$ ; диапазон изменений от -0.5 до 0.5.

**Fig. 7.** Coverage area of the Kursk radar. Median FSS estimates and  $FSS_{\text{useful}}$  deviation for 30 min precipitation forecast in threshold exceedance categories (mm/h): 0.25 (orange), 0.5 (red), 0.75 (brown), 1 (green), 2 (blue), 3 (yellow) and 4 (black). Left panel – FSS values; *useful* forecast levels are marked with the colors of the corresponding thresholds. Right panel –  $FSS - FSS_{\text{useful}}$  deviations; size of changing is from 0.5 to 0.5.

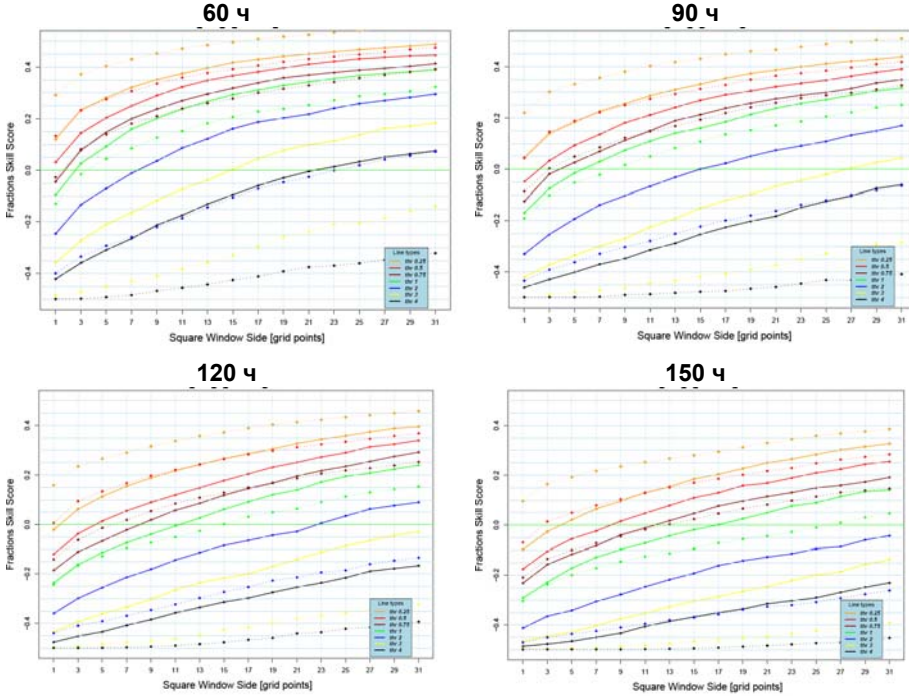
На рис. 8 демонстрируется поведение кривых FSS в отклонениях от уровней полезного прогноза на 60, 90, 120 и 150 мин для тех же порогов, что и на рис. 7. Видно, что с ростом прогностического срока общая тенденция состоит в снижении значений FSS и в постепенном уплотнении кривых без существенной перегруппировки их взаимного расположения.

Удобство и гибкость графических средств позволяют представить обобщение показателя FSS по всем использованным радиолокаторам. Рис. 9 содержит графики  $FSS - FSS_{\text{useful}}$  для прогнозов на 60, 90, и 120 часов, для порогов превышения 1, 2, 3 и 4 мм/ч и для всех девяти использованных р/л.

Сформулируем общие замечания без детального анализа пространственных масштабов.

Кривые оценок наиболее плотно расположены на панелях для теплого периода года, чем для холодного периода. Для обоих периодов плотность кривых тем больше, чем меньше и порог, и заблаговременность: рост любого из этих параметров верификации приводит к снижению оценок

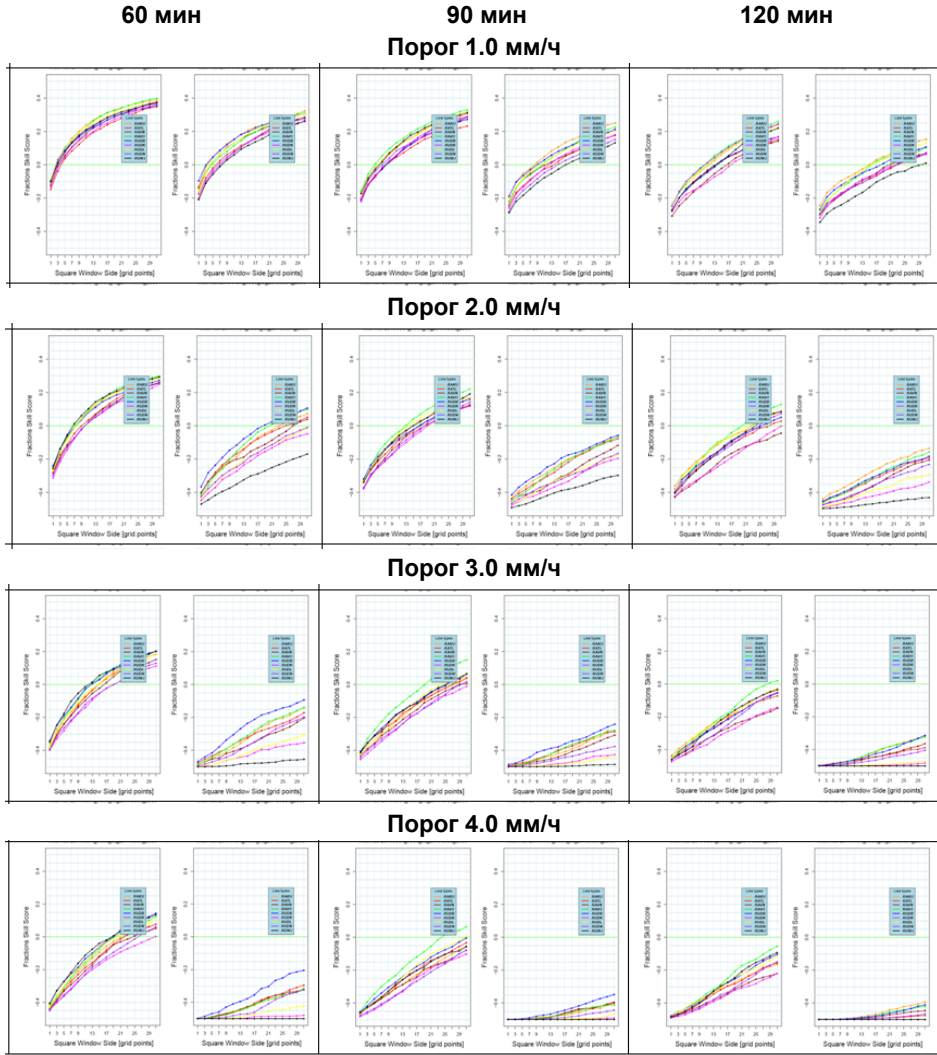
качества с одновременным "рассыпанием" кривых. Наиболее быстро "рассыпаются" кривые холодного периода, начиная с порога 2 мм/ч и с заблаговременности 60 мин.



**Рис. 8.** Область обзора р/л Курск. Медианные оценки FSS прогноза осадков на 60, 90, 120 и 150 мин в категориях превышений порогов и в отклонениях от уровня полезного качества. Обозначения порогов: 0.25 (оранжевый), 0.5 (красный), 0.75 (коричневый), 1 (зеленый), 2 (голубой), 3 (желтый) и 4 (черный).

**Fig. 8.** Coverage area of the Kursk radar. Median FSS estimates of 60, 90, 120, and 150-minute precipitation forecasts in the categories of threshold exceedances and in deviations from the useful quality level. Threshold designations: 0.25 (orange), 0.5 (red), 0.75 (brown), 1 (green), 2 (blue), 3 (yellow), and 4 (black).

Есть заметное свойство веера кривых FSS для холодного периода. Кривые для прогноза превышения 2 мм/ч поворачиваются к оси масштабов, не меняя формы: верхняя кривая голубого цвета маркирует локатор Брянск (RUDB), а нижняя черного цвета – локатор Валдай (RUWJ). Для порогов 3 и 4 мм/ч картина иная: веер постепенно складывается и ранги не просматриваются. Но вряд ли имеет смысл использовать расходимость кривых для ранжирования радиолокаторов в этом диапазоне масштабов, так как в данных условиях и качество низкое, и полезность сомнительна.

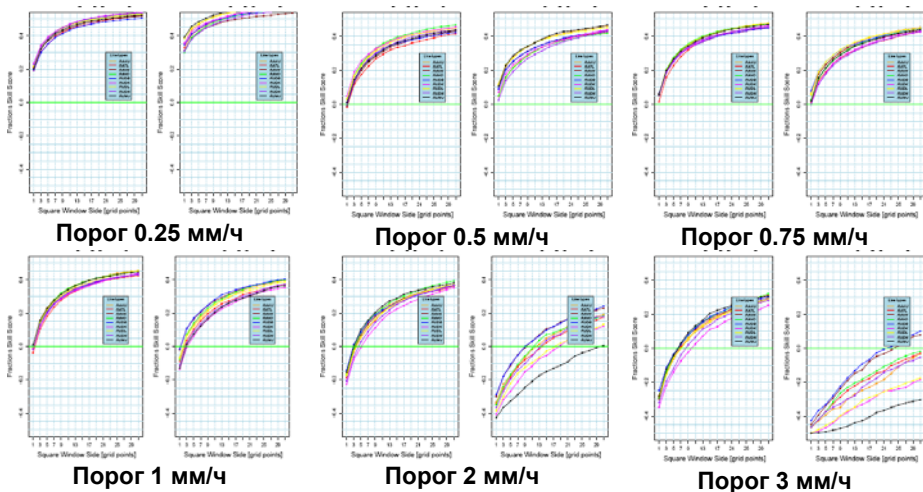


**Рис. 9.** Медианные оценки FSS качества прогноза осадков на 60, 90 и 120 мин в категориях превышений порогов 1, 2, 3 и 4 мм/ч, в отклонениях от уровня полезного качества  $FSS_{\text{useful}}$ . Обозначения радиолокаторов и цвет: RAKU (оранжевый), RATL (красный), RAVN (коричневый), RAVO (зеленый), RUDB (голубой), RUDK (сиреневый), RUDL (желтый), RUDN (фиолетовый) и RUWJ (черный).

**Fig. 9.** Median FSS estimates of the quality of the 60, 90 and 120 min precipitation forecast in the categories of threshold exceedances of 1, 2, 3 and 4 mm/h, in deviations from the  $FSS_{\text{useful}}$  level of useful quality. Radar designations and colors: RAKU (orange), RATL (red), RAVN (brown), RAVO (green), RUDB (cyan), RUDK (lilac), RUDL (yellow), RUDN (purple) and RUWJ (black).

Регулярное поведение кривых FSS при росте порога, заключающееся в ее постепенном повороте в сторону оси масштабов (минимальное значение остается неподвижным), напоминает стремление к пределу оценки качества экстремальной величины [22, 41]. Возникает заманчивая идея обобщить результат для скалярной величины (EDI или SEDI) на функцию (FSS) [41, Ch.10].

Рис. 10 иллюстрирует кардинальные перемены в поведении кривых оценки прогнозов на 30 мин. Для порогов 0.25 и 0.5 мм/ч качество прогнозов по всем локаторам в холодный период превышает качество прогнозов в теплый период. На пороге 1 мм/ч кривые для холодного периода немного ниже соответствующих кривых теплого периода, на пороге 2 мм/ч происходит заметное распадение кривых с возможностью отчетливого ранжирования радиолокаторов по их положению.



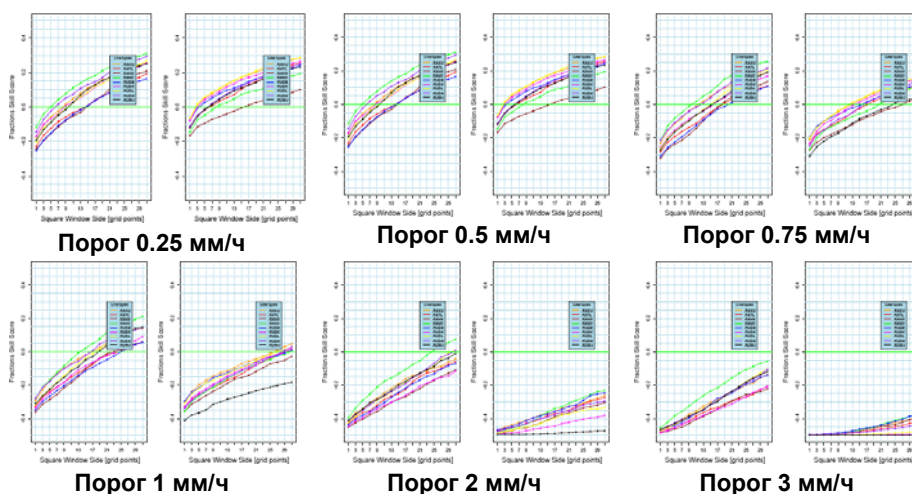
**Рис. 10.** Медианные оценки FSS качества прогноза осадков на 30 мин в категориях превышений порогов 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2 и 3 мм/ч в отклонениях от уровня полезного качества  $FSS_{\text{useful}}$ . Обозначения радиолокаторов и цвет: RAKU (оранжевый), RATL (красный), RAVN (коричневый), RAVO (зеленый), RUDB (голубой), RUDK (сиреневый), RUDL (желтый), RUDN (фиолетовый) и RUWJ (черный).

**Fig.10.** Median FSS estimates of the quality of the 30 min precipitation forecast in the categories of threshold exceedances of 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, and 3 mm/h, in deviations from the  $FSS_{\text{useful}}$  level of useful quality. Radar designations and colors: RAKU (orange), RATL (red), RAVN (brown), RAVO (green), RUDB (cyan), RUDK (ilac), RUDL (yellow), RUDN (purple) and RUWJ (black).

Важное обстоятельство заключается в том, что расположение кривых монотонно относительно масштабов (размера окон оценки FSS). Вернемся к рис. 9, предполагая, что общее качество прогностической системы тем

выше, чем на более высоких порогах и на более отдаленной заблаговременности это преимущество сохраняется. Уровнем допустимого качества будем считать только положительные значения кривых (FSS выше уровня полезности).

Для анализа поведения кривых на большой заблаговременности добавим рис. 11. с оценками качества прогнозов на 150 мин для порогов 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2 и 3 мм/ч.



**Рис. 11.** Медианные оценки FSS качества прогноза осадков на 150 мин в категориях превышений порогов 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2 и 3 мм/ч в отклонениях от уровня полезного качества  $FSS_{\text{useful}}$ . Обозначения радиолокаторов и цвет: RAKU (оранжевый), RATL (красный), RAVN (коричневый), RAVO (зеленый), RUDB (голубой), RUDK (сиреневый), RUDL (желтый), RUDN (фиолетовый) и RUWJ (черный).

**Fig. 11.** Median FSS estimates of the quality of the 150 min precipitation forecast in the categories of threshold exceedances of 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, and 3 mm/h, in deviations from the  $FSS_{\text{useful}}$  level of useful quality. Radar designations and colors: RAKU (orange), RATL (red), RAVN (brown), RAVO (green), RUDB (cyan), RUDK (lilac), RUDL (yellow), RUDN (purple) and RUWJ (black).

В теплый период при прогнозе превышения порога 4 мм/ч уровень полезности пересекает на заблаговременности 90 мин единственная кривая локатора RAVO, зеленый цвет (Воейково). Точка пересечения соответствует масштабному окну со стороны 98 км. На заблаговременности 150 мин также единственная кривая зеленого цвета пересекает уровень полезности при прогнозе превышения 2 мм/ч. В теплый период первое место по условиям "соревнования" безоговорочно принадлежит данным ДМРЛ Воейково.

В холодный период нет лидера, но при прогнозе превышения порога 2 мм/ч верхняя кривая принадлежит ДМРЛ RUDB (Брянск, оранжевый

цвет), которая пересекает уровень полезности на заблаговременности 60 мин (масштаб полезности 74 км).

При прогнозе превышения 3 мм/ч две кривые пересекают уровень полезности на заблаговременности 30 мин (масштаб полезности 90 км), одна из них принадлежит локатору RUDB. При прогнозе на 150 мин верхняя кривая пересечения уровня полезности принадлежит группе локаторов, причем верхняя кривая идентифицируется как кривая локатора RAKU; но в группе присутствует также кривая локатора RUDB. Таким образом, в холодный период лидера не наблюдается, однако по набору признаков главным финалистом можно назначить ДМРЛ Брянск.

Аналогичное ранжирование локаторов можно провести на основе масштаба полезности, который определит заинтересованный потребитель прогнозов. Однако такое ответственное мероприятие следует проводить не по раскрашенным кривым, а по табличным данным с приемлемым уровнем статистической значимости оценок.

### 3.3. Медианные оценки FSS по полным выборкам

Второй этап оценки качества радиолокационного наукастинга осадков с помощью FSS заключается в использовании полного набора полей, фильтрованные образы которых содержат *объекты* размером не менее 1600 ячеек, выделенных изолинией 1 мм/ч. Назовем такие выборки *полными*. Демонстрируются результаты прогнозов на 60 мин в *теплый период года* по данным р/л RAKU (Курск), RATL (Тула), RAVN (Внуково), RAVO (Воейково), RUDB (Брянск) и RUDK (Кострома). Оценены FSS для прогнозов превышения порогов 0.5, 1, 2, 3, 4 и 5 мм/ч. Последний порог был включен ввиду роста объемов выборок, что способствует увеличению пространственной доли соответствующей категории осадков.

Вначале проверим правомерность использования случайной выборки на первом этапе верификации, заранее сообщив, что расчет оценок FSS по полной выборке часового прогноза объемом около 2500 пар полей занимает около 90 часов работы процессора Intel (R) с частотой 3.2 ГГц и ОЗУ 4 Гб.

#### 3.3.1. Сопоставление характеристик случайных и полных выборок

Воспользуемся данными наблюдений и прогнозов на 60 мин в области обзора ДМРЛ Курск (RAKU). В табл. 5–7 содержатся характеристики пространственных долей и оценок FSS для прогнозов превышения порогов 1, 2 и 4 мм/ч.

В левых таблицах собраны характеристики по случайным выборкам (объемом около 200 пар полей прогнозов и наблюдений), а в правых таблицах собраны характеристики по полным выборкам (объемом около 2500 пар полей).

**Таблица 5.** Область обзора р/л Курск (RAKU). Суммарные характеристики пространственных долей осадков ( $\geq 1$  мм/ч) в полях р/л наблюдений (of0) и прогноза (ff0) на 60 мин и значения FSS относительно масштабов w01–w31 (линейных размеров окон). Верхняя таблица – характеристики по случайной выборке (~200 пар). Нижняя – характеристики по полной выборке (~2500 пар). Обозначения характеристик те же, что и в табл. 2.

**Table 5.** Coverage area of the Kursk (RAKU) radar. The summary characteristics of spatial rainfall fractions ( $\geq 1$  mm/h) in the fields of r/l observations (of0) and forecast (ff0) for 60 min, and the FSS values relative to the scales w01 - w31 (linear window sizes). The left table - characteristics for a random sample (~200 pairs). The right table - characteristics for the full sample (~2500 pairs). Characteristic designations are the same as in Table 2.

| Доли<br>и окно | Порог 1 мм/ч                          |       |       |       |       |       |       |
|----------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                | Выборка случайная (ок. 200 пар полей) |       |       |       |       |       |       |
|                | min                                   | q25   | med   | mean  | q75   | max   | IQR   |
| of0            | 0.012                                 | 0.038 | 0.054 | 0.063 | 0.076 | 0.212 | 0.038 |
| ff0            | 0.000                                 | 0.035 | 0.050 | 0.060 | 0.079 | 0.198 | 0.044 |
| w01            | 0.001                                 | 0.277 | 0.378 | 0.376 | 0.496 | 0.718 | 0.219 |
| w03            | 0.001                                 | 0.383 | 0.500 | 0.486 | 0.617 | 0.802 | 0.234 |
| w05            | 0.001                                 | 0.453 | 0.566 | 0.548 | 0.685 | 0.844 | 0.232 |
| w07            | 0.001                                 | 0.502 | 0.633 | 0.597 | 0.730 | 0.879 | 0.228 |
| w09            | 0.001                                 | 0.542 | 0.674 | 0.636 | 0.765 | 0.920 | 0.223 |
| w11            | 0.001                                 | 0.583 | 0.711 | 0.668 | 0.790 | 0.946 | 0.207 |
| w13            | 0.001                                 | 0.602 | 0.740 | 0.694 | 0.809 | 0.961 | 0.207 |
| w15            | 0.001                                 | 0.622 | 0.766 | 0.716 | 0.826 | 0.969 | 0.204 |
| w17            | 0.001                                 | 0.651 | 0.784 | 0.735 | 0.844 | 0.974 | 0.193 |
| w19            | 0.001                                 | 0.678 | 0.802 | 0.751 | 0.859 | 0.978 | 0.181 |
| w21            | 0.001                                 | 0.700 | 0.815 | 0.765 | 0.874 | 0.982 | 0.174 |
| w23            | 0.001                                 | 0.712 | 0.828 | 0.778 | 0.881 | 0.984 | 0.169 |
| w25            | 0.001                                 | 0.722 | 0.840 | 0.789 | 0.891 | 0.985 | 0.169 |
| w27            | 0.001                                 | 0.740 | 0.848 | 0.798 | 0.900 | 0.986 | 0.160 |
| w29            | 0.001                                 | 0.756 | 0.855 | 0.807 | 0.905 | 0.988 | 0.149 |
| w31            | 0.001                                 | 0.767 | 0.862 | 0.814 | 0.913 | 0.990 | 0.146 |
|                | Выборка полная (ок. 2500 пар полей)   |       |       |       |       |       |       |
|                | min                                   | q25   | med   | mean  | q75   | max   | IQR   |
| of0            | 0.009                                 | 0.038 | 0.054 | 0.061 | 0.073 | 0.215 | 0.035 |
| ff0            | 0.000                                 | 0.034 | 0.053 | 0.060 | 0.077 | 0.247 | 0.043 |
| w01            | 0.001                                 | 0.256 | 0.364 | 0.365 | 0.473 | 0.805 | 0.217 |
| w03            | 0.001                                 | 0.357 | 0.481 | 0.470 | 0.594 | 0.884 | 0.237 |
| w05            | 0.001                                 | 0.417 | 0.545 | 0.530 | 0.659 | 0.919 | 0.242 |
| w07            | 0.001                                 | 0.468 | 0.598 | 0.577 | 0.707 | 0.941 | 0.239 |
| w09            | 0.001                                 | 0.512 | 0.637 | 0.616 | 0.745 | 0.954 | 0.233 |
| w11            | 0.001                                 | 0.552 | 0.670 | 0.648 | 0.774 | 0.963 | 0.222 |
| w13            | 0.001                                 | 0.584 | 0.699 | 0.674 | 0.799 | 0.970 | 0.215 |
| w15            | 0.001                                 | 0.610 | 0.725 | 0.697 | 0.820 | 0.977 | 0.210 |
| w17            | 0.001                                 | 0.635 | 0.747 | 0.717 | 0.837 | 0.983 | 0.202 |
| w19            | 0.001                                 | 0.655 | 0.766 | 0.734 | 0.851 | 0.987 | 0.196 |
| w21            | 0.001                                 | 0.670 | 0.782 | 0.749 | 0.864 | 0.990 | 0.194 |
| w23            | 0.001                                 | 0.686 | 0.796 | 0.762 | 0.874 | 0.992 | 0.188 |
| w25            | 0.001                                 | 0.704 | 0.810 | 0.774 | 0.883 | 0.993 | 0.179 |
| w27            | 0.001                                 | 0.718 | 0.823 | 0.785 | 0.891 | 0.995 | 0.173 |
| w29            | 0.001                                 | 0.731 | 0.834 | 0.795 | 0.899 | 0.995 | 0.168 |
| w31            | 0.001                                 | 0.742 | 0.844 | 0.804 | 0.906 | 0.996 | 0.164 |



Таблица 6. То же, что в табл. 5, только для порога 2 мм/ч

Table 6. Same as Table 5, only for threshold 3 mm/h

| Доли<br>и окно | Порог 2 мм/ч                          |       |       |       |       |       |       |
|----------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                | Выборка случайная (ок. 200 пар полей) |       |       |       |       |       |       |
|                | min                                   | q25   | med   | mean  | q75   | max   | IQR   |
| of0            | 0.008                                 | 0.020 | 0.029 | 0.034 | 0.042 | 0.116 | 0.022 |
| ff0            | 0.000                                 | 0.017 | 0.025 | 0.031 | 0.039 | 0.111 | 0.022 |
| w01            | 0.001                                 | 0.146 | 0.240 | 0.245 | 0.340 | 0.593 | 0.194 |
| w03            | 0.001                                 | 0.226 | 0.352 | 0.348 | 0.476 | 0.756 | 0.250 |
| w05            | 0.001                                 | 0.287 | 0.416 | 0.412 | 0.555 | 0.813 | 0.268 |
| w07            | 0.001                                 | 0.327 | 0.475 | 0.464 | 0.605 | 0.842 | 0.278 |
| w09            | 0.001                                 | 0.367 | 0.522 | 0.507 | 0.650 | 0.895 | 0.283 |
| w11            | 0.001                                 | 0.400 | 0.572 | 0.543 | 0.687 | 0.925 | 0.287 |
| w13            | 0.001                                 | 0.439 | 0.608 | 0.574 | 0.716 | 0.939 | 0.277 |
| w15            | 0.001                                 | 0.471 | 0.647 | 0.600 | 0.746 | 0.945 | 0.275 |
| w17            | 0.001                                 | 0.504 | 0.673 | 0.623 | 0.775 | 0.948 | 0.271 |
| w19            | 0.001                                 | 0.530 | 0.688 | 0.642 | 0.794 | 0.950 | 0.264 |
| w21            | 0.001                                 | 0.553 | 0.703 | 0.660 | 0.808 | 0.952 | 0.255 |
| w23            | 0.001                                 | 0.575 | 0.726 | 0.675 | 0.822 | 0.956 | 0.247 |
| w25            | 0.001                                 | 0.591 | 0.744 | 0.689 | 0.833 | 0.959 | 0.242 |
| w27            | 0.001                                 | 0.603 | 0.756 | 0.701 | 0.848 | 0.961 | 0.245 |
| w29            | 0.001                                 | 0.616 | 0.768 | 0.712 | 0.854 | 0.964 | 0.238 |
| w31            | 0.001                                 | 0.630 | 0.781 | 0.722 | 0.859 | 0.969 | 0.229 |
|                | Выборка полная (ок. 2500 пар полей)   |       |       |       |       |       |       |
|                | min                                   | q25   | med   | mean  | q75   | max   | IQR   |
| of0            | 0.003                                 | 0.020 | 0.029 | 0.033 | 0.041 | 0.125 | 0.021 |
| ff0            | 0.000                                 | 0.016 | 0.027 | 0.031 | 0.042 | 0.143 | 0.026 |
| w01            | 0.001                                 | 0.128 | 0.222 | 0.235 | 0.319 | 0.739 | 0.191 |
| w03            | 0.001                                 | 0.202 | 0.330 | 0.333 | 0.449 | 0.843 | 0.247 |
| w05            | 0.001                                 | 0.256 | 0.396 | 0.394 | 0.527 | 0.884 | 0.271 |
| w07            | 0.001                                 | 0.308 | 0.452 | 0.444 | 0.587 | 0.909 | 0.279 |
| w09            | 0.001                                 | 0.353 | 0.499 | 0.487 | 0.634 | 0.933 | 0.281 |
| w11            | 0.001                                 | 0.392 | 0.539 | 0.523 | 0.673 | 0.951 | 0.281 |
| w13            | 0.001                                 | 0.426 | 0.571 | 0.553 | 0.706 | 0.968 | 0.280 |
| w15            | 0.001                                 | 0.455 | 0.602 | 0.580 | 0.732 | 0.978 | 0.277 |
| w17            | 0.001                                 | 0.479 | 0.630 | 0.603 | 0.753 | 0.983 | 0.274 |
| w19            | 0.001                                 | 0.502 | 0.655 | 0.623 | 0.773 | 0.986 | 0.271 |
| w21            | 0.001                                 | 0.524 | 0.678 | 0.641 | 0.790 | 0.988 | 0.266 |
| w23            | 0.001                                 | 0.544 | 0.696 | 0.657 | 0.804 | 0.990 | 0.260 |
| w25            | 0.001                                 | 0.561 | 0.712 | 0.671 | 0.817 | 0.991 | 0.256 |
| w27            | 0.001                                 | 0.575 | 0.727 | 0.685 | 0.828 | 0.991 | 0.253 |
| w29            | 0.001                                 | 0.591 | 0.741 | 0.697 | 0.840 | 0.992 | 0.249 |
| w31            | 0.001                                 | 0.605 | 0.753 | 0.708 | 0.850 | 0.993 | 0.245 |

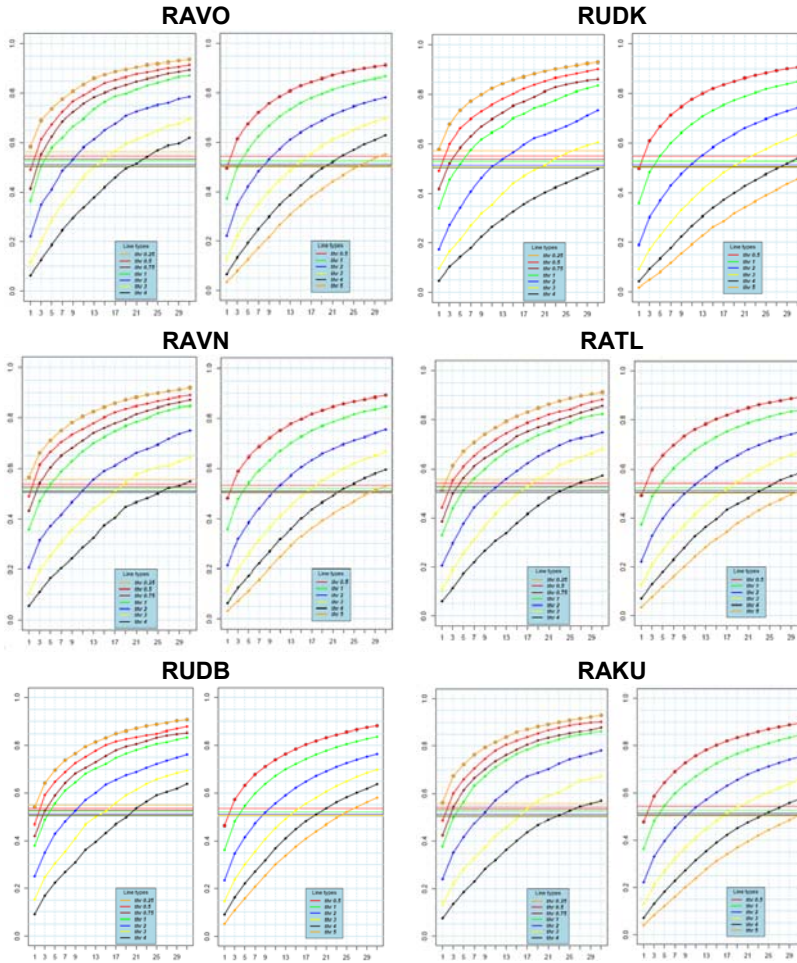
Сравнение верхних и нижних таблиц всех трех рисунков подтверждает правомерность использования случайных выборок вместо полного набора, но имеются стандартные особенности, характеризующие свойства подвыборок, такие как сужение размаха экстремумов. Однако разница в минимумах наблюдается только для оценок пространственных долей осадков, для FSS все минимумы совпадают, а максимумы отличаются незначительно. Еще меньшее различие наблюдается в квартилях q25, q75 и медиане.

**Таблица 7.** То же, что в табл. 5, только для порога 3 мм/ч  
**Table 7.** Same as Table 5, only for threshold 3 mm/h

| Доли<br>и окно | Порог 3 мм/ч                          |       |       |       |       |       |       |
|----------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                | Выборка случайная (ок. 200 пар полей) |       |       |       |       |       |       |
|                | min                                   | q25   | med   | mean  | q75   | max   | IQR   |
| of0            | 0.001                                 | 0.007 | 0.011 | 0.013 | 0.017 | 0.045 | 0.010 |
| ff0            | 0.000                                 | 0.005 | 0.008 | 0.012 | 0.016 | 0.044 | 0.011 |
| w01            | 0.001                                 | 0.022 | 0.074 | 0.103 | 0.150 | 0.424 | 0.128 |
| w03            | 0.001                                 | 0.053 | 0.136 | 0.174 | 0.268 | 0.635 | 0.215 |
| w05            | 0.001                                 | 0.088 | 0.186 | 0.225 | 0.342 | 0.730 | 0.254 |
| w07            | 0.001                                 | 0.114 | 0.230 | 0.270 | 0.404 | 0.804 | 0.290 |
| w09            | 0.001                                 | 0.150 | 0.282 | 0.310 | 0.458 | 0.848 | 0.308 |
| w11            | 0.001                                 | 0.166 | 0.320 | 0.346 | 0.514 | 0.873 | 0.348 |
| w13            | 0.001                                 | 0.192 | 0.363 | 0.376 | 0.557 | 0.885 | 0.365 |
| w15            | 0.001                                 | 0.218 | 0.400 | 0.404 | 0.589 | 0.891 | 0.371 |
| w17            | 0.001                                 | 0.240 | 0.436 | 0.428 | 0.616 | 0.894 | 0.376 |
| w19            | 0.001                                 | 0.261 | 0.466 | 0.450 | 0.647 | 0.907 | 0.386 |
| w21            | 0.001                                 | 0.274 | 0.491 | 0.471 | 0.660 | 0.917 | 0.386 |
| w23            | 0.001                                 | 0.287 | 0.509 | 0.490 | 0.674 | 0.926 | 0.387 |
| w25            | 0.001                                 | 0.309 | 0.528 | 0.507 | 0.695 | 0.932 | 0.386 |
| w27            | 0.001                                 | 0.340 | 0.546 | 0.523 | 0.718 | 0.936 | 0.378 |
| w29            | 0.001                                 | 0.365 | 0.558 | 0.538 | 0.737 | 0.941 | 0.372 |
| w31            | 0.001                                 | 0.384 | 0.570 | 0.552 | 0.742 | 0.946 | 0.358 |
|                | Выборка полная (ок. 2500 пар полей)   |       |       |       |       |       |       |
|                | min                                   | q25   | med   | mean  | q75   | max   | IQR   |
| of0            | 0.000                                 | 0.007 | 0.011 | 0.013 | 0.016 | 0.054 | 0.009 |
| ff0            | 0.000                                 | 0.005 | 0.010 | 0.013 | 0.018 | 0.063 | 0.013 |
| w01            | 0.001                                 | 0.021 | 0.071 | 0.102 | 0.145 | 0.677 | 0.124 |
| w03            | 0.001                                 | 0.047 | 0.131 | 0.168 | 0.248 | 0.793 | 0.201 |
| w05            | 0.001                                 | 0.077 | 0.182 | 0.217 | 0.321 | 0.835 | 0.244 |
| w07            | 0.001                                 | 0.108 | 0.228 | 0.260 | 0.380 | 0.875 | 0.272 |
| w09            | 0.001                                 | 0.140 | 0.272 | 0.300 | 0.432 | 0.911 | 0.292 |
| w11            | 0.001                                 | 0.170 | 0.315 | 0.336 | 0.483 | 0.936 | 0.313 |
| w13            | 0.001                                 | 0.196 | 0.353 | 0.367 | 0.521 | 0.955 | 0.325 |
| w15            | 0.001                                 | 0.225 | 0.390 | 0.396 | 0.557 | 0.966 | 0.332 |
| w17            | 0.001                                 | 0.249 | 0.422 | 0.421 | 0.588 | 0.973 | 0.339 |
| w19            | 0.001                                 | 0.273 | 0.451 | 0.444 | 0.619 | 0.978 | 0.346 |
| w21            | 0.001                                 | 0.293 | 0.475 | 0.464 | 0.642 | 0.981 | 0.349 |
| w23            | 0.001                                 | 0.311 | 0.496 | 0.483 | 0.665 | 0.983 | 0.354 |
| w25            | 0.001                                 | 0.330 | 0.518 | 0.500 | 0.686 | 0.985 | 0.356 |
| w27            | 0.001                                 | 0.345 | 0.537 | 0.517 | 0.708 | 0.987 | 0.363 |
| w29            | 0.001                                 | 0.363 | 0.558 | 0.532 | 0.727 | 0.988 | 0.364 |
| w31            | 0.001                                 | 0.374 | 0.574 | 0.546 | 0.741 | 0.989 | 0.367 |

Изменение FSS в зависимости от пространственного масштаба для двух методов формирования выборок демонстрируется на рис. 12. Сравнение пар графиков для шести локаторов, использованных на втором этапе верификации, приводит к общему заключению о большей гладкости графиков по полной выборке (что вполне естественно) и о явном сходстве

одноцветных кривых справа и слева, включая уровни полезности и соответствующие масштабы полезных прогнозов.



**Рис. 12.** Медианные оценки FSS для прогноза осадков на 60 мин на основе двух методов формирования выборок. Левые панели: оценки прогноза превышений порогов 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3 и 4 мм/ч методом случайных выборок (около 200 пар полей). Правые панели: оценки для превышений порогов 0.5, 1, 2, 3, 4 и 5 мм/ч на основе полного набора пар полей. Цвета совпадающих порогов одинаковы. Уровни полезности выделены цветами соответствующих порогов.

**Fig. 12.** Median FSS estimates for 60-minute precipitation forecast based on two sampling methods. Left panels: estimates of threshold exceedances of 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3, and 4 mm/h by random sampling (about 200 pairs of fields). Right panels: scores for threshold exceedances of 0.5, 1, 2, 3, 4, and 5 mm/h based on the full set of field pairs. The colors of matching thresholds are the same. Useful levels are highlighted by the colors of the corresponding thresholds.

Очевидно, что сходство суммарных оценок FSS при использовании случайных выборок на порядок меньшего размера позволяет экономить вычислительные ресурсы при расчетах агрегированных оценок FSS. Однако при этом утрачиваются возможности мониторинга качества прогнозов на существенных интервалах времени, когда, по сути, оценивается не только осредненное качество прогнозов (forecast quality), но и надежность (эффективность, производительность, результативность и т. д.) прогностической системы в целом (forecast performance).

### 3.3.2. Временные ряды пространственных долей категорий осадков

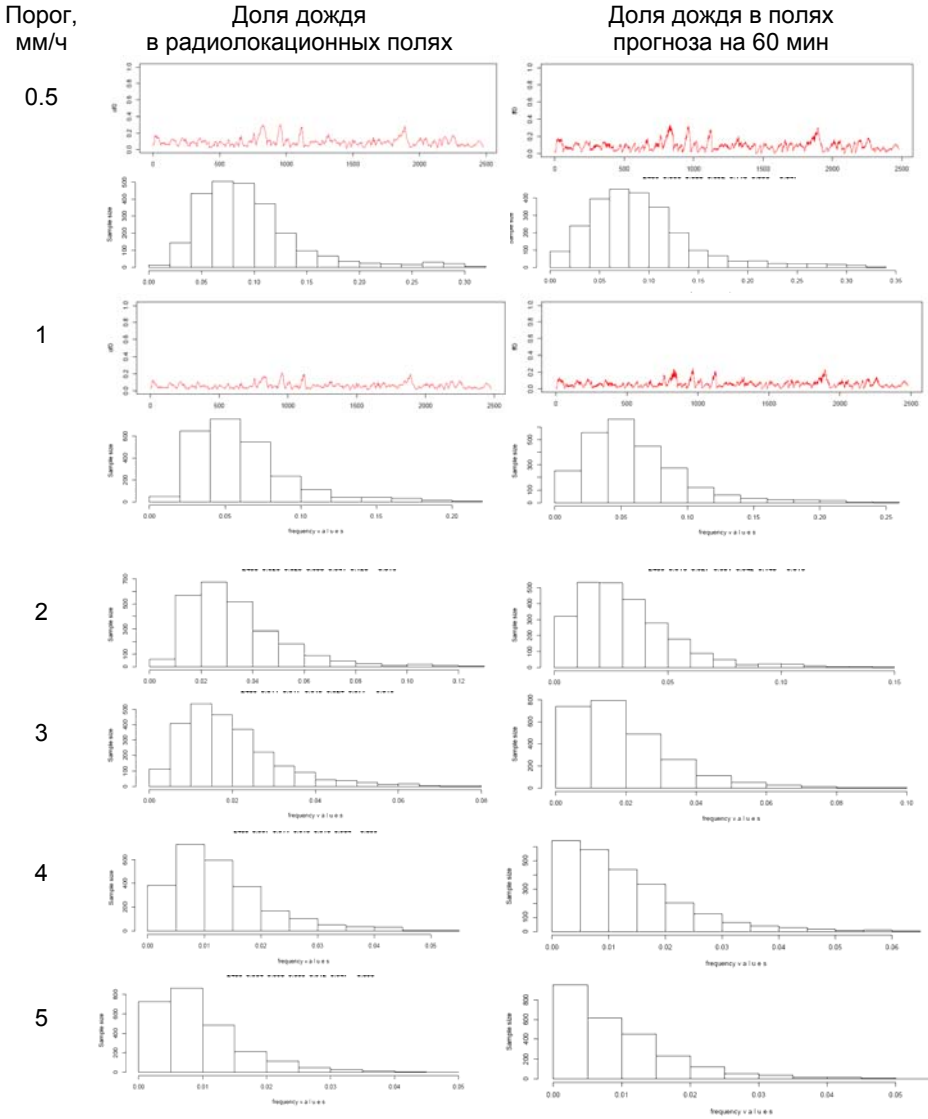
Под временными рядами понимаются последовательные во времени наборы полей наблюдений, в которых после пространственного осреднения обнаруживаются соответствующие *объекты* для верификации. Так как между такими полями временные интервалы не обязательно равны, то понятие гладкости неприменимо по математическому смыслу и может быть ложным по визуальному впечатлению.

На парах выделенных полей наблюдений и синхронизированных с ними полей часовых прогнозов рассчитываются пространственные доли осадков в выделенной градации и значения показателя FSS относительно масштабов. Матрица результатов для одного локатора состоит из массива NT строк и 2+NW столбцов, где NT – количество выделенных сроков (в формате ууууmmdd\_hhmi, уууу – год, mm – месяц, dd – день, hh – час, mi – десяток минут), NW – количество окон (здесь 16, от сеточного масштаба 2 кв. км до 122 кв. км). Количество выделенных сроков разное для различных локаторов, в среднем около 2500. В начале строки результирующей матрицы записываются пространственные доли (*доли дождя*) для поля наблюдения и для поля прогноза, относящиеся к данному сроку.

Эти матрицы служат для дальнейших обобщений количественных оценок и их графического представления.

Так как доли категорий осадков используются при определении важных уровней, то представляют интерес их статистические особенности в зависимости от порогов и локаторов. Возникает возможность детального анализа распределения и пространственных долей категорий осадков и значений FSS на основе более информативных гистограмм, чем квартильные оценки.

На рис. 13 расположены временные ряды этих долей для порогов 0.5 и 1 мм/ч и гистограммы их распределения по всему временному интервалу для всех порогов осадков; рассматриваются данные зоны обзора локатора RAKU (Курск). Для порогов выше 1 мм/ч доля дождя невелика, поэтому в рис. 13 внесены ряды только для первых двух порогов. Гистограммы распределения строятся в автоматическом режиме без задания общих диапазонов величин, благодаря чему более отчетливо видны различия в их формах.



**Рис. 13.** Временные ряды пространственных долей осадков и гистограммы их распределения в полях наблюдения (левый ряд панелей) и в полях прогноза на 60 мин (правый ряд панелей) по полной выборке. Временные ряды показаны только для порогов 0.5 и 1 мм/ч. Гистограммы распределения долей показаны для всех порогов.

**Fig. 13.** Time series of spatial rainfall fractions and histograms of their distribution in the observation fields (left row of panels) and in the forecast fields for 60 minutes (right row of panels) for the full sample. Time series are shown only for thresholds of 0.5 and 1 mm/h. Fractions distribution histograms are shown for all thresholds.

Во временных рядах пространственных долей для полей наблюдения и полей прогноза заметно общее сходство, включая пики и совпадение их координат на оси времени. Эти факты свидетельствуют о способности системы наукастинга прогнозировать на интервале часового прогноза большие области осадков. Обе кривые для полей прогноза выглядят жирней кривых для полей наблюдений, что связано с более сильной изменчивостью во времени прогностической пространственной доли осадков выделенных категорий. Это свойство сохраняется и для высоких порогов (здесь не показано).

В поведении гистограмм с ростом порога интенсивности заметны следующие характерные особенности. На малых порогах (до 1 мм/ч) формы гистограмм для полей наблюдения и прогноза сходны и напоминают двухпараметрическое гамма-распределение с параметром формы больше единицы, хотя есть слабо выраженные намеки на толстые хвосты, особенно для полей наблюдений.

В случае толстых хвостов уместнее рассмотреть также двухпараметрическое распределение Парето, или обобщенное распределение Парето по аналогии с подходом статей [20, 21].

Если предположить применимость гамма-распределения к пространственным долям осадков в интервале 0.5–5 мм/ч и ориентироваться на поведение моды распределения, то можно утверждать, что параметр формы для полей прогнозов переходит границу 1 на меньшем пороге (между 3 и 4 мм/ч): гистограмма обретает отчетливую L-конфигурацию. Это значит, что с ростом порога осадки таких категорий встречаются заметно реже, чем в полях наблюдения. Если считать, что на более высоких порогах уместнее использовать распределение Парето, то отмеченное поведение гистограмм не противоречит тяжести хвоста для прогностических полей, так как все распределения Парето так же L-образны, как гамма-распределение при параметре формы меньше единицы.

### 3.3.3. Временные ряды значений показателя FSS

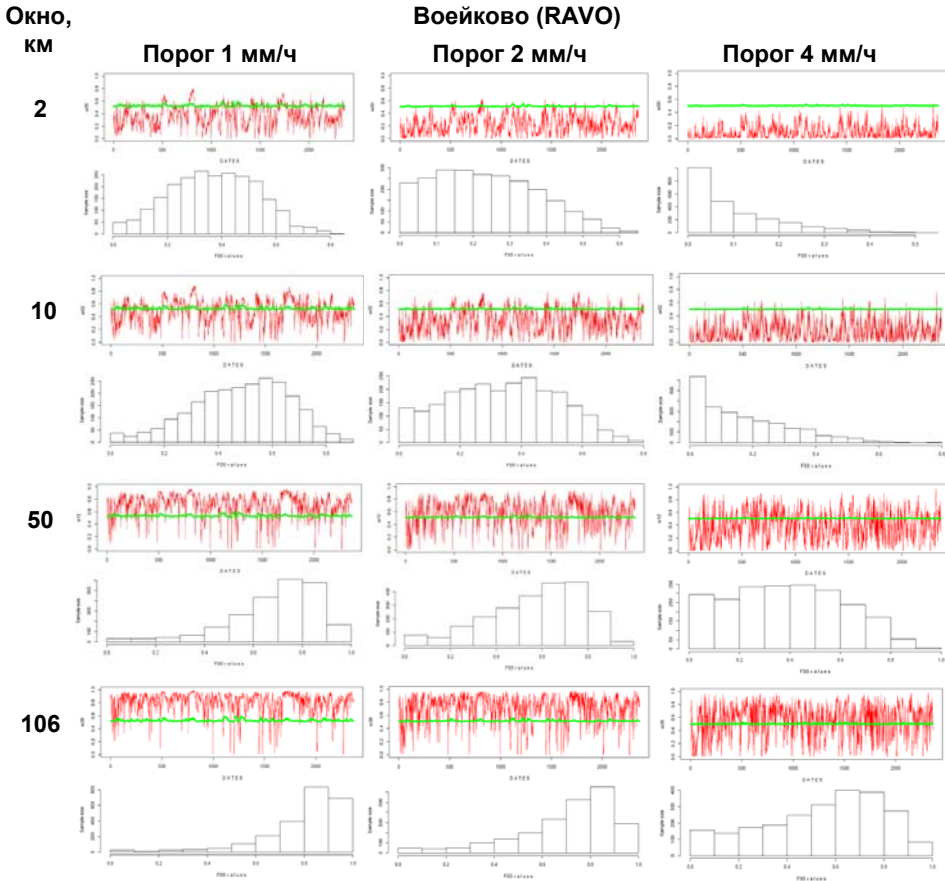
Рис. 14–16 содержат значения FSS в зонах обзора локаторов Воейково, Внуково и Курск для порогов 1, 2 и 4 мм/ч относительно линейных масштабов 2, 10, 50 и 106 км.

Визуальный анализ рис. 14–16 позволяет сделать вывод о значительном сходстве временных рядов значений FSS и гистограмм для пары (порог, масштаб), относящейся к разным локаторам. Порог полезности рассчитывается для каждого срока, и видно, что зеленая линия в этом представлении малоизменчива и почти не отличается от уровня приемлемого прогноза  $FSS=0.5$ .

Сконцентрируем внимание на графиках и гистограммах для локатора Воейково (рис. 14).

Идеальный прогноз на всем интервале испытаний означает расположение всего временного ряда FSS *выше* зеленой линии, что не встречается

ни на одной представленной панели. Наилучший, но не идеальный в данном смысле прогноз отражен на панели для порога 1 мм/ч и окна 106×106 кв.км, на которой имеются пары полей наблюдения и синхронизированного прогноза с низким качеством во всем диапазоне масштабов. Сроки некоторых прогнозов низкого качества сохраняются ("наследуются") от меньших масштабов вплоть до максимальных, что визуально представлено нитями, свисающими в сторону FSS=0. Прогнозы, качество которых не улучшается с ростом масштаба, являют собой случаи специфического вырождения и достойны отдельного анализа. Точные даты и время таких прогнозов легко восстановимы.

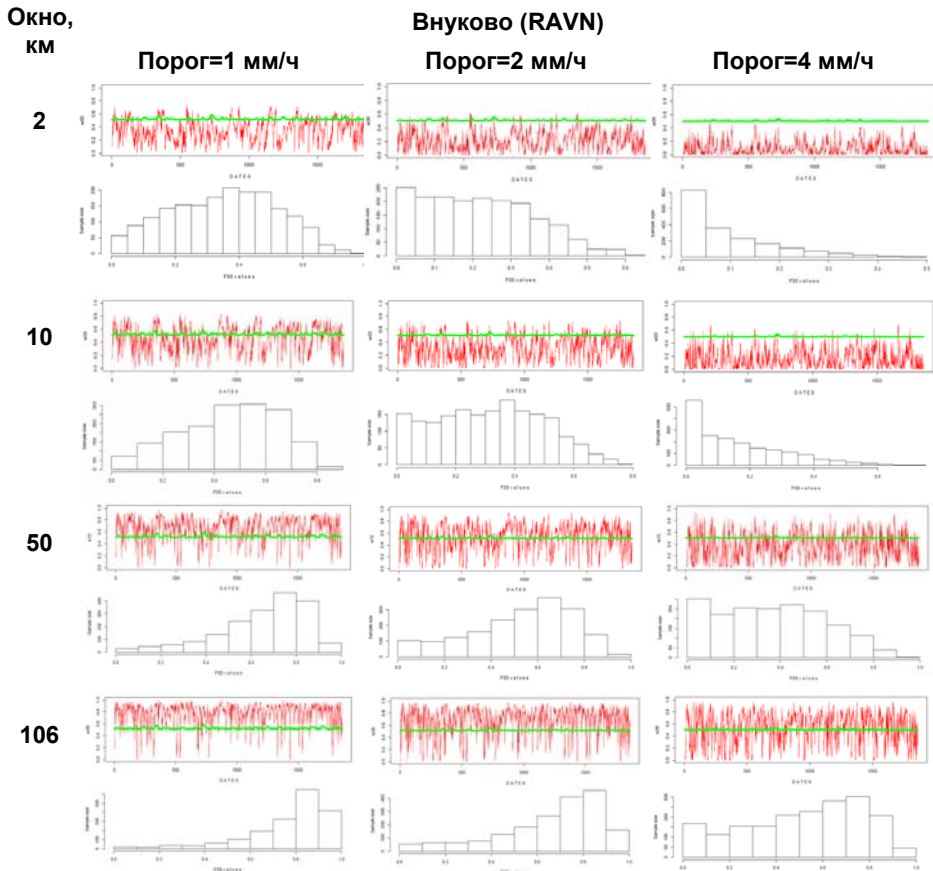


**Рис. 14.** Временные ряды и гистограммы распределения показателя FSS для часового прогноза превышения порога 1 мм/ч в зонах обзора лоатора RAVO. Зеленой линией выделен уровень полезного прогноза. Окна заданы в линейном масштабе (длина стороны).

**Fig. 14.** Time series and distribution histograms of the FSS for an hourly forecast of exceeding the threshold of 1 mm/h in the RAVO radar coverage areas. The green line highlights the useful prediction level. The windows are given at a linear scale (side length).

Наихудший прогноз приводит к противоположной картине: весь ряд находится под зеленой линией, и такие ситуации нередки для прогнозов превышений больших порогов.

На рис. 14 это панель для порога 4 мм/ч и масштаба 2 км, при этом диапазон области определения гистограммы не превышает  $FSS=0.5$ . Для этого же порога рост масштаба приводит к появлению значений  $FSS$  выше уровня полезности. При этом в масштабе явлений около 100 км гистограмма приобретает форму распределения с толстым левым хвостом (много значений  $FSS$  около нуля), но с наибольшим количеством значений  $FSS$  выше уровня полезности (мода распределения правее  $FSS=0.5$ ). Такое изменение гистограммы распределения  $FSS$  можно считать типичным для использованных р/л данных в теплый период года.



**Рис. 15.** То же, что на рис.14, только для лоатора RAVN.

**Fig. 15.** The same as in Fig. 14, only for the RAVN radar.



Рассмотренные варианты расположения временного ряда и формы гистограммы FSS, включая толщину хвостов и координату моды распределения относительно уровня полезности, дают содержательную информацию об "эксплуатационном качестве" (performance) системы радиолокационного наукастинга. Гистограммы FSS могут быть обобщены или приближены теоретическими распределениями известного типа (например, гамма-распределением или обобщенным распределением Парето) и оформлены в виде консультативного справочника. Пользователю системы радиолокационного наукастинга обобщенная гистограмма может помочь оценить вероятность *полезного* для него прогноза явления заданного пространственного масштаба и значимой для него интенсивности.

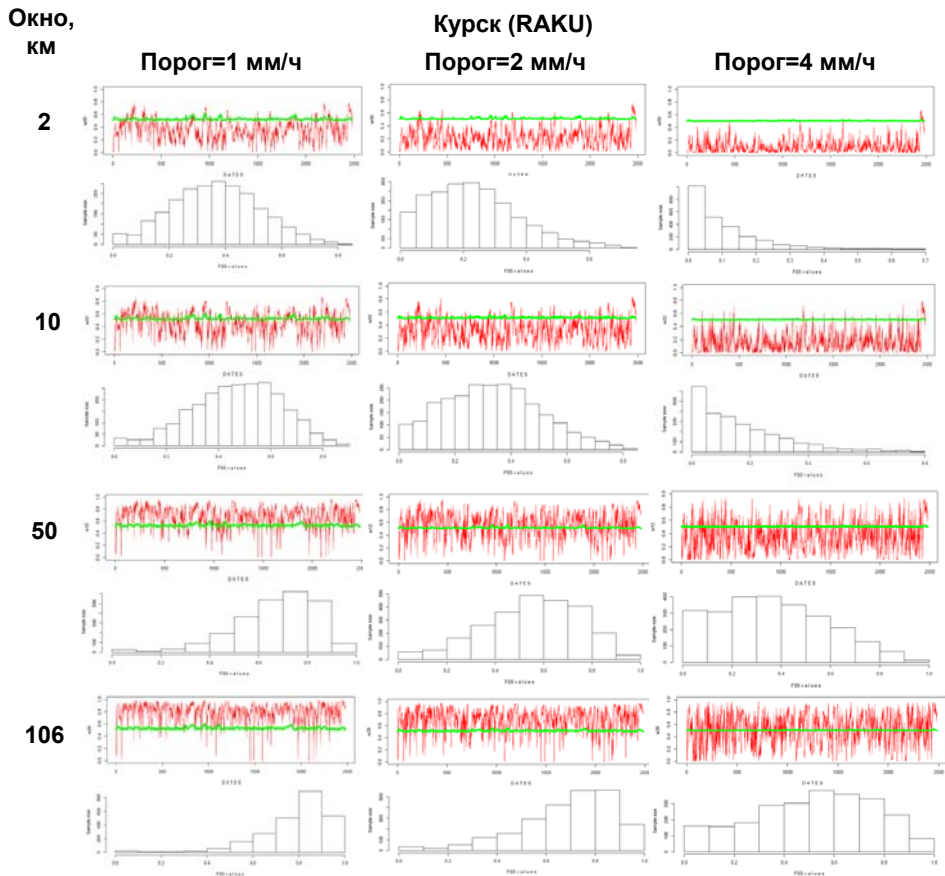
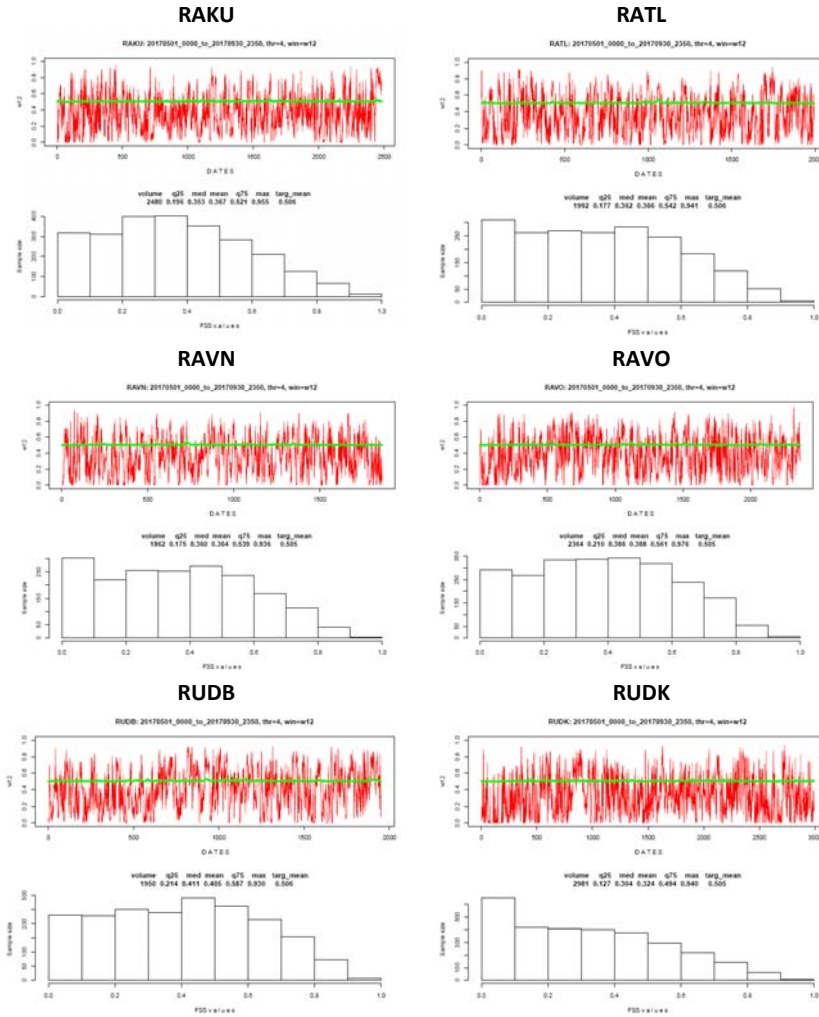


Рис. 16. То же, что на рис. 14, только для локатора RAKU.

Fig. 16. The same as in Fig. 14, only for the RAKU radar.

В качестве примера рассмотрим часовой прогноз явлений масштаба 50 км и интенсивности выше 4 мм/ч и приведем соответствующие гистограммы для областей обзора шести испытанных радиолокаторов (рис. 17).

На рис. 17 оставлены важные характеристики, формируемые в автоматическом режиме на этапе верификации, соберем их в отдельную табл. 8.



**Рис. 17.** Временные ряды и гистограммы распределения показателя FSS для часового прогноза превышения порога 4 мм/ч в зонах обзора локаторов RAKU, RATL, RAVN, RAVO, RUDB и RUDK. Зеленой линией выделен уровень полезного прогноза. Окна заданы в линейном масштабе (длина стороны).

**Fig. 17.** Time series and distribution histograms of the FSS estimate for an hourly forecast of exceeding the threshold of 4 mm/h in the coverage areas of RAKU, RATL, RAVN, RAVO, RUDB and RUDK radars. The green line highlights the useful forecast level. The windows are given at a linear scale (side length).

**Таблица 8.** Характеристики гистограмм распределения оценки FSS на полной выборке пар полей наблюдения в зонах обзора р/л RAKU, RATL, RAVN, RAVO, RUDB и RUDK, и прогнозов на 60 мин интенсивности осадков выше 4 мм/ч

**Table 8.** Characteristics of the FSS estimate distribution histograms on the full sample of pairs of observation fields in the coverage areas of the RAKU, RATL, RAVN, RAVO, RUDB and RUDK radars, and forecasts for 60 min of precipitation intensity above 4 mm/h

| ДМРЛ-С | Характеристики гистограмм |       |        |       |       |       |                       |
|--------|---------------------------|-------|--------|-------|-------|-------|-----------------------|
|        | объем                     | q25   | median | mean  | q75   | max   | FSS <sub>useful</sub> |
| RAKU   | 2480                      | 0.196 | 0.353  | 0.367 | 0.521 | 0.955 | 0.506                 |
| RATL   | 1992                      | 0.177 | 0.362  | 0.366 | 0.542 | 0.941 | 0.506                 |
| RAVN   | 1862                      | 0.175 | 0.360  | 0.364 | 0.539 | 0.936 | 0.505                 |
| RAVO   | 2364                      | 0.201 | 0.386  | 0.388 | 0.561 | 0.976 | 0.505                 |
| RUDB   | 1950                      | 0.214 | 0.411  | 0.405 | 0.587 | 0.930 | 0.506                 |
| RUDK   | 2981                      | 0.127 | 0.304  | 0.324 | 0.494 | 0.940 | 0.505                 |

На графиках временных рядов хорошо видны следующие особенности: сильная изменчивость оценки FSS во времени, преобладание значений FSS ниже линии полезности, значительные непрерывные интервалы бесполезных значений, отсутствие заметных непрерывных интервалов полезных значений.

Все гистограммы имеют более или менее одинаковую форму с очевидным перевесом значений, не превышающих 0.5. Однако имеется часть оценок полезного уровня, которые удобнее оценить на основе данных табл. 8.

Табличные данные подтверждают слабое влияние на результирующие характеристики различных объемов выборок. Низкое значение медианы (от 0.30 до 0.41) и близкое к нему среднее значение (mean) отразились на ранее показанных графиках медианных оценок FSS. Редкость явления "сильного дождя" ( $\geq 4$  мм/ч) сказалась на близости уровня полезного прогноза FSS<sub>useful</sub> уровню приемлемого прогноза FSS<sub>accept</sub>=0.5. Столбец q75 гарантирует не менее четверти прогнозов выше уровня полезности (кроме, возможно, прогнозов в области обзора локатора RAKU, где прогноз еще хуже).

При надежности результатов окрестной верификации можно сформулировать вполне содержательный вывод. Если пользователя радиолокационного наукастинга не удовлетворяет прогноз осадков выше 4 мм/ч с вероятностью попадания чуть более 25% в областях размера 50×50 км, то ему рекомендуется или согласиться на расширение области прогнозирования, которая подразумевается в формулировках "ожидается местами", или воспользоваться иными прогнозами.

## Выводы и обсуждение

Показатель *окрестной* верификации FSS применен для оценки прогнозов осадков в теплый и холодный периоды 2017–2018 гг. при испытаниях системы радиолокационного наукастинга. Поля осадков формируются по зонам обзора восьми ДМРЛ-С на территории Центрального федерального округа и ДМРЛ-С Воейково на территории Северо-Западного федерального округа. Эти поля используются и как начальные данные для статистической модели, и как контрольные данные для верификации.

В области обзора каждого локатора по каждому периоду года накоплено около 20 тысяч прогнозов, которые вместе с синхронизированными наблюдениями составляют выборку для верификации примерно такого же объема. Ввиду больших затрат времени при расчетах FSS проверена возможность обобщенных оценок на случайных выборках существенно меньшего объема. На основе вычислительных экспериментов объем случайной выборки удалось уменьшить примерно на порядок при сохранении основных свойств обобщенных оценок.

Результаты верификации стратифицированы по локаторам, периодам года, порогам превышения интенсивности осадков и заблаговременности прогнозов. Особое внимание уделяется зависимости оценки FSS от пространственного масштаба, определяемого по размеру прямоугольного окна, которое исполняет роль *окрестности* данного метода верификации. Рассчитываются специфические уровни значений FSS, позволяющие выделить масштабы *приемлемых* и *полезных* прогнозов.

На основе разнообразных табличных и графических материалов верификации получены выводы как общего, так и частного характера.

Общие выводы касаются свойств самого показателя, проверенных и подтвержденных на большом массиве отечественных данных. Этот показатель, обладающий привычными свойствами квадратичных мер качества для вероятностных прогнозов и сопоставляемый с последовательно растущими пространственными масштабами, позволяет изобразить на графике и свойства прогноза, и эффективность прогностической модели. При этом анализ качества прогноза может интерпретироваться в терминах предсказуемости явлений, так как предсказуемость – это фактически оценка качества прогностической модели в зависимости от заблаговременности прогноза и некоторого выделенного уровня качества. С другой стороны, переход от оценок прогноза *величин* в *точках* к прогнозу *долей* в *окрестностях* развивает вероятностное восприятие прогнозистов и пользователей, а также привносит содержательность в стандартные формулировки о "наблюдаемых местами" и "ожидаемых местами" дожде.

Сформулированы разнообразные частные выводы о свойствах характеристик в два периода года, а также для различных локаторов, порогов интенсивности, прогностических сроков и размеров окон. В частности, проявляется сходство в квартильных и медианных оценках по случайной и полной выборке для верификации. Различия в тех же характеристиках для теплого

и холодного периодов года ассоциируются с сезонными особенностями осадков на территории ЦФО и СЗФО.

Более чувствительны оценки *полезного* масштаба, которые предоставляют возможность ранжировать данные отдельных локаторов по тем или иным комбинациям трех основных параметров верификации – порога интенсивности, заблаговременности и масштаба полезности. Однако приведенные в статье примеры ранжирования по наборам кривых FSS(scale) не должны приниматься за приговор, так как, помимо качества радиолокационных наблюдений, нельзя исключать особенностей показателя FSS и влияния внешних параметров верификации, например, площади домена [62, 73]. Причина выставленных рангов может скрываться не в наблюдениях или в модели, а в самом методе верификации. На самом деле, установленное в статье "преимущество" данных локатора Брянск (RUDB) может быть мнимым из-за большой теневой области в южной части обзора, и причина высокого ранга может заключаться в способе числового заполнения указанной области.

Как известно, при переходе от точечных оценок к пространственным оценкам объем информации существенно возрастает и на место устраненных проблем (например, двойного штрафа и близкого промаха) встают новые, не менее сложные и важные проблемы.

Одной из новых, но требующих решения проблем окрестной верификации оперативного радиолокационного наукастинга Гидрометцентра России является сложная граница домена с внутренними пустотами, что заставляет искать нетривиальные формы окрестностей, а также учитывать переменное количество этих окрестностей для одного масштаба.

Методологической проблемой остается и сама формула расчета FSS как вероятностной оценки Брайера относительно качества наихудшего прогноза. Не является ли "наихудший прогноз", эквивалентный случайному прогнозу, слишком слабым уровнем сопоставления? Если пользоваться уровнем качества реальной прогностической системы (например, оперативной системы ЧПП, как в Германской службе погоды по рекомендации работы [77]), то корреляция между прогнозом и наблюдением (точнее, между соответствующими долями) окажется ненулевой и знаменатель формулы расчета "критерия мастерства" уменьшится. При этом оценки качества станут строже, т. е. заведомо меньше FSS, и на экстремальных параметрах верификации эти оценки могут стать отрицательными.

Работа выполнена в рамках темы 1.1.5 Плана НИТР Росгидромета.

Авторы благодарят Анастасию Юрьевну Бундель за полезные советы и ценные замечания.

#### Список литературы

1. Алибегова Ж.Д. Пространственно-временная структура полей жидких осадков. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 224 с.
2. Бундель А.Ю, Муравьев А.В, Ольховая Е.Д. Обзор методов пространственной верификации и их применение для ансамблевых прогнозов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 4 (382). С. 30-49.

3. Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы. М.: Географический факультет МГУ, 2006. 100 с.
4. ВМО-168. Руководство по гидрологической практике. Том II. Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов: Изд. 6. 2012 (2009).
5. Гандин Л.С. Объективный анализ метеорологических полей. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 118 с.
6. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геоestatистика. Теория и практика. М.: Наука, 2010. 330 с.
7. Казакевич Д.И. Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1977, 320 с.
8. Киктев Д.Б., Астахова Е.Д., Зарипов Р.Б., Муравьев А.В., Смирнов А.В., Цырульников М.Д. Проект FROST-2014 и метеорологическое обеспечение Олимпиады "Сочи-2014" // Метеорология и гидрология. 2015. № 8. С. 19-30.
9. Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Бундель А.Ю. Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов. М.: АМА ПРЕСС, 2021. 94 с.
10. 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 г. Тезисы докладов. С. 27.
11. Кисельникова В.З. Объектно-ориентированная оценка качества прогноза осадков WRF // Метеорология и гидрология. 2013. № 4. С. 5-10.
12. Кисельникова В.З. Объектно-ориентированная оценка качества прогноза осадков для теплого периода (май–сентябрь) 2016–2020 гг. по модели COSMO-Ru2 // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 43-51.
13. Кисельникова В.З. Результаты объектно-ориентированной оценки качества прогнозов осадков по мезомасштабной модели Гидрометцентра России // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С. 34-42.
14. Матерон Ж. Основы прикладной геоestatистики. М.: Мир, 1968. 407 с.
15. Методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике: Третья редакция. М.: Росгидромет, 2019. 129 с. [https://method.meteorf.ru/norma/document/dop\\_3red](https://method.meteorf.ru/norma/document/dop_3red).
16. Монин А.С. Прогноз погоды как задача физики. М.: Наука, 1969. 184 с.
17. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Том 2. Изд. 2-е. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 742 с.
18. Муравьев А.В. Программа верификации метеорологических прогнозов с помощью окрестной оценки «отношения пространственных долей» (FSS) для больших выборок с использованием методов Монте-Карло: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020618547. Дата регистрации 30 июля 2020 г.
19. Муравьев А.В., Бундель А.Ю., Киктев Д.Б., Смирнов А.В. Опыт пространственной верификации радиолокационного наукастинга осадков: определение и статистика объектов, ситуаций и условных выборок // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 2 (384). С. 6-52.
20. Муравьев А.В., Бундель А.Ю., Киктев Д.Б., Смирнов А.В. Верификация радиолокационного наукастинга областей осадков значительной площади с помощью обобщенного распределения Парето. Часть 1: элементы теории и методы оценки параметров // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 3 (385). С. 6-41.
21. Муравьев А.В., Бундель А.Ю., Киктев Д.Б., Смирнов А.В. Верификация радиолокационного наукастинга областей осадков значительной площади с помощью обобщенного распределения Парето. Часть 2: приложение к прогнозам в теплый и холодный периоды 2017–2018 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 3 (385). С. 42-77.
22. 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 // Метеорология и гидрология. 2015. № 9. С. 31-48.

23. 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 г.) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 1 (367). С. 6-38.

24. Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В. Усовершенствованная технология радиолокационного наукастинга осадков и результаты верификации в теплый период года (май-сентябрь 2020 г.) // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2021. Информационный сборник № 48. С. 13-41.

25. Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В., Зайченко М.Ю. Оперативная технология наукастинга осадков на основе радиолокационных данных и сравнительные результаты точечной верификации для теплого и холодного периодов года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 2 (372). С. 12-40.

26. Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В., Павлюков Ю.Б., Серебрянник Н.И. Верификация детерминистского и вероятностного радиолокационного наукастинга осадков в теплый и холодный периоды года на Европейской территории России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 1 (387). С. 21-66.

27. Alferov D. and Coauthors. Intercomparison of Spatial Verification Methods for COSMO Terrain (INSPECT): Preliminary Results // EMS Annual Meeting Abstracts. Vol. 12. EMS2015-140. 2015. 15th EMS/12th ECAM.

28. Blaylock B., Horel J.D. Comparison of Lightning Forecasts from the High-Resolution Rapid Refresh Model to Geostationary Lightning Mapper Observations // Weather and Forecasting. 2020. Vol. 35. P. 401-416.

29. 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.

30. Brown, B. G., E. Gilleland, and E. E. Ebert, 2012: Forecasts of spatial fields. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science, 2nd ed. / I.T. Jolliffe and D.B. Stephenson, Eds. Wiley. P. 95-117. <https://doi.org/10.1002/9781119960003.ch6>.

31. Bundel A., Muravyev A. The contiguous rain area (CRA) method application for the MesoVICT cases in the framework of the COSMO INSPECT project. Annalen der Meteorologie 51, 7th International Verification Methods Workshop, 03-11. May 2017, Berlin, Germany. Programme and Abstracts. P. 59.

32. Bundel A. and Coauthors. Spatial verification application in COSMO. ICCARUS 2018 // Book of Abstracts Offenbach. February 26–28. 2018. P. 35.

33. Bundel A. and Coauthors. The COSMO Priority Project INSPECT. Final Report // COSMO Technical Report No. 37. January 2019. DOI: 10.5676/DWD pub/nw/cosmo-tr37.

34. Casati B., Wilson L.J., Stephenson D.B., Nurmi P., Ghelli A., Pocerlich M., Damrath U., Ebert E.E., Brown B.G., Mason S. Forecast verification: Current status and future directions // Meteor. Appl. 2008. Vol. 15. P. 3-18.

35. Coleman A., Ancell B. Toward the Improvement of High-Impact Probabilistic Forecasts with a Sensitivity-Based Convective-Scale Ensemble Subsetting Technique // Mon. Wea. Rev. 2020. Vol. 148. P. 4995-5014.

36. Davis C.A., Brown B.G., Bullock R.G. Object-based verification of precipitation forecasts, Part I: Methodology and application to mesoscale rain areas // Mon. Wea. Rev. 2006. Vol. 134. P. 1772-1784.

37. Dougherty K.J., Horel J.D., Nachamkin J.E. Forecast Skill for California Heavy Precipitation Periods from the High-Resolution Rapid Refresh Model and the Coupled Ocean–Atmosphere Mesoscale Prediction System // Weather and Forecasting. 2020. Vol. 36. P. 2275-2288.

38. Ebert E.E. Fuzzy verification of high resolution gridded forecasts: A review and proposed framework // Meteorol. Appl. 2008. Vol. 15. P. 51-64.

39. Ebert E.E. Neighborhood verification: A strategy for rewarding close forecasts // Weather and Forecasting. 2009. Vol. 24. P. 1498-1510. DOI:10.1175/2009WAF2222251.1.

40. Faggian N., Roux B., Steinle P., Ebert B. Fast calculation of the fractions skill score // Mausam. 2015. Vol. 66. P. 457-466. [http://metnet.imd.gov.in/mausamdocs/166310\\_F.pdf](http://metnet.imd.gov.in/mausamdocs/166310_F.pdf).

41. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science, 2nd ed. / Eds. Jolliffe, I.T., Stephenson, D.B. Wiley-Blackwell. 2012. 274 p.

42. Gallo B.T., Kalb C.P., Gotway J.H., Fisher H.H., Roberts B., Jirak I.I., Clark A.J., Alexander C., Jensen T. Initial development and testing of a convection-allowing model scorecard // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2019. Vol. 12. P. 367-383.

43. Gallo B.T., Wilson K.A., Choate J., Knopfmeier K., Skinner P., Roberts B., Heinselman P., Jirak I., Clark A.J. Exploring the Watch-to-Warning Space: Experimental Outlook Performance during the 2019 Spring Forecasting Experiment in NOAA's Hazardous Weather Testbed // Weather and Forecasting. 2022. Vol. 37. P. 617-637.

44. Gelfand, A.E., Diggle, P., Guttorp, P., Fuentes M. Handbook of Spatial Statistics. Chapman & Hall/CRC Handbooks of Modern Statistical Methods. CRC Press. 2010.

45. Gilleland, E., Ahijevych, D., Brown, B.G., Casati B., Ebert E.E. Intercomparison of spatial verification methods // Weather and Forecasting. 2009. Vol. 24. P. 1416-1430.

46. Gilleland E. 2022. <https://cran.r-project.org/web/packages/SpatialVx/SpatialVx.pdf>

47. Gilleland E. Two-dimensional kernel smoothing: Using the R package "smoothie" // NCAR Tech. Note NCAR/TN-5021STR. 2013. 17 p. <https://doi.org/10.5065/D61834G2>.

48. Gofa F. and Coauthors. Appraisal of Challenging Weather forecasts (AWARE) in COSMO. Program and abstracts of the Nov 2020 International Verification Method Workshop - Online. P. 47. [https://backend.univie.ac.at/fileadmin/user\\_upload/i\\_jwgfvr/AbstractsBook2020ivmwo.pdf](https://backend.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/i_jwgfvr/AbstractsBook2020ivmwo.pdf)

49. Houze R.A.Jr. 100 years of research on mesoscale convective systems // A Century of Progress in Atmospheric and Related Sciences: Celebrating the American Meteorological Society Centennial, Meteor. Monogr. 2019. No. 59. <https://doi.org/10.1175/AMSMONOGRAPHIS-D-18-0001.1>

50. Kiktev D., Joe P., Isaac G.A., Montani A., Frogner I.-L., Nurmi P., Bica B., Milbrandt J., Tsyrlunikov M., Astakhova E., Bundel A., Belair S., Pyle M., Muravyev A., Rivin G., Rozinkina I., Paccagnella T., Wang Y., Reid J., Nipen T., Ahn K.-D. FROST-2014: The Sochi Winter Olympics International Project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2017. Vol. 98. P. 1908-1929.

51. Lagerquist R., Stewart J.Q., Ebert-Uphoff I., Kumler C. Using Deep Learning to Nowcast the Spatial Coverage of Convection from Himawari-8 Satellite Data // Mon. Wea. Rev. 2021. Vol. 149. P. 3897-3921.

52. Lledó L., Haiden T., Schrötle J., Forbes R. Scale-dependent verification of precipitation and cloudiness at ECMWF // Newsletter No. 174. Winter 2022/23. P. 18-22.

53. Lorenz E.N. Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues // J. Atm. Sci. 1969. Vol. 26. P. 636-646.

54. Mass C.F., Ovens D., Westrick K., Colle B.A. Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts? // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2002. Vol. 83. P. 407-430.

55. Melsom A., Palermé C., and Müller M. Validation metrics for ice edge position forecasts // Ocean Sci. 2019. Vol. 15. P. 615-630.

56. Mittermaier M. How interpolation and resolution can affect verification scores: A study based on the fractions skill score // Meteor. Z. 2019. Vol. 28. P. 181-192. <https://doi.org/10.1127/metz/2018/0890>.

57. Mittermaier M.A. "Meta" Analysis of the Fractions Skill Score: The Limiting Case and Implications for Aggregation // Mon. Wea. Rev. 2021. Vol. 149. P. 3491-3504.

58. Mittermaier M., Roberts N. Inter-comparison of spatial forecast verification methods: Identifying skillful spatial scales using the fractions skill score // Weather and Forecasting. 2010. Vol. 25. P. 343-354. <https://doi.org/10.1175/2009WAF2222260.1>.

59. Mittermaier M., Thompson S. A long-term assessment of precipitation forecast skill using the fractions skill score // Meteor. Appl. 2013. Vol. 20. P. 176-186. <https://doi.org/10.1002/met.296>.

60. Muravev A., Bundel A., Kiktev D., Bocharnikov N., Bazlova T. On the spatial verification of FROST-2014 precipitation forecast fields. EMS Annual Meeting Abstracts. 2015. Vol. 12. EMS2015-154-2. 15th EMS / 12th ECAM.

61. Muraviev A., Bundel A., Kiktev D., Bocharnikov N., Bazlova T. On the spatial verification of FROST-2014 precipitation forecast fields. COSMO GM, 07.09.2015. [https://www.cosmo-model.org/content/consortium/generalMeetings/general2015/parallel/Bundel\\_SPATIAL\\_IN-SPECT\\_session\\_GM2015.pdf](https://www.cosmo-model.org/content/consortium/generalMeetings/general2015/parallel/Bundel_SPATIAL_IN-SPECT_session_GM2015.pdf)



62. *Nachamkin J.E., Schmidt J.* Applying a neighborhood fractions sampling approach as a diagnostic tool // *Mon. Wea. Rev.* 2015. Vol. 143. P. 4736-4749. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00411.1>.
63. *Pulkkinen S., Nerini D., Hortal A., Velasco-Forero C., Seed A., Germann U., Foresti L.* Pysteps: an open-source Python library for probabilistic precipitation nowcasting (v1.0) // *Geosci. Model Dev.* 2019. Vol. 12. P. 4185-4219. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4185-2019>
64. *Richardson L.F.* Weather prediction by numerical process. Cambridge University Press (republished by Dover). 1965). 1922.
65. *Ripley B.D.* Spatial Statistics. John Wiley & Sons, Inc, 1981. 267 p.
66. *Roberts N.* Assessing the spatial and temporal variation in the skill of precipitation forecasts from an NWP model // *Meteor. Appl.* 2008. Vol. 15. P. 163-169. DOI: 10.1002/met.57.
67. *Roberts N., Lean H.* Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events // *Mon. Wea. Rev.* 2008. Vol. 136. P. 78-97. <https://doi.org/10.1175/2007MWR2123.1>.
68. *Schertzer D., Lovejoy S.* Physical modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative processes // *J. Geophys. Res.* 1987. Vol. 92. P. 9692-9714.
69. *Seed A.W.* Modelling and forecasting rainfall in space and time // *Scales in Hydrology and Water management (IAHS Publ. 287)*. 2004. P. 137-152.
70. *Simecek-Beatty D., Lehr W.J.* Oil spill forecast assessment using Fractions Skill Score // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 164. 112041. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112041>.
71. *Skamarock W.C.* Evaluating mesoscale NWP models using kinetic energy spectra // *Mon. Wea. Rev.* 2004. Vol. 132. P. 3019-3032. <https://doi.org/10.1175/MWR2830.1>.
72. *Skok G.* Analysis of fraction skill score properties for a displaced rainband in a rectangular domain // *Meteor. Appl.* 2015. Vol. 22. P. 477-484. DOI: 10.1002/met.1478.
73. *Skok G.* Analysis of fraction skill score properties for a displaced rainy grid point in a rectangular domain // *Atmos. Res.* 2016. Vol. 169. P. 556-565. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.04.012>.
74. *Skok G., Hladnik V.* Verification of Gridded Wind Forecasts in Complex Alpine Terrain: A New Wind Verification Methodology Based on the Neighborhood Approach // *Mon. Wea. Rev.* 2018. Vol. 146. P. 63-75.
75. *Skok G., Roberts N.* Analysis of fractions skill score properties for random precipitation fields and ECMWF forecasts // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 2016. Vol. 142. P. 2599-2610, <https://doi.org/10.1002/qj.2849>.
76. *Sun X., Huang X.-Y., Gordon C., Mittermeier M., Beckett R., Cheong W. K., Barker D., North R., Semple A.* A Subjective and Objective Evaluation of Model Forecasts of Sumatra Squall Events // *Weather and Forecasting*. 2020. Vol. 35. P. 489-506.
77. *Theis S.E., Hense A., Damrath U.* Probabilistic precipitation forecasts from a deterministic model: A pragmatic approach // *Meteor. Appl.* 2005. Vol. 12. P. 257-268.
78. *WMO-No. 237.* Manual for depth-area-duration analysis of storm precipitation. 1969. TP. 129.
79. *WMO-No. 168.* Guide to Hydrological Practices, Volume II: Management of Water Resources and Applications of Hydrological Practices. 2009.
80. *Woodhams B.J., Birch C.B., Marsham J.H., Bain C.L., Roberts N.M., Boyd D.F.A.* What Is the Added Value of a Convection-Permitting Model for Forecasting Extreme Rainfall over Tropical East Africa? // *Mon. Wea. Rev.* 2018. Vol. 146. P. 2757-2780.

## References

1. *Alibegova Zh.D.* Prostranstvenno-vremennaja struktura polej zhidkih osadkov Leningrad: *Gidrometeoizdat publ.*, 1985, 224 p. [in Russ.]
2. *Bundel A.Yu., Muraviev A.V., Olkhovaya E.D.* Overview of spatial verification methods and their application to ensemble forecasting. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 382, pp. 30-49 [in Russ.].
3. *Vel'tishhev N.F., Stepanenko V.M.* *Mezometeorologicheskie processy*. Moscow: Geograficheskij fakul'tet MGU publ., 2006, 100 p. [in Russ.]

4. WMO-168. Rukovodstvo po gidrologicheskoy praktike. Tom II. Upravlenie vodnymi resursami i praktika primeneniya gidrologicheskikh metodov. Izd.6. 2012 (2009) [in Russ.].

5. Gandin L.S. Ob'ektivnyy analiz meteorologicheskikh polej. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1963, 118 p. [in Russ.]

6. Dem'janov V.V., Savel'eva E.A. Geostatistika. Teorija i praktika. Moscow: Nauka publ., 2010, 330 p. [in Russ.]

7. Kazakevich D.I. Osnovy teorii sluchajnyh funkcij i ejo primenenie v gidrometeorologii. L.: Gidrometeoizdat, 1977, 320 p. [in Russ.]

8. Kiktev D.B., Astahova E.D., Zaripov R.B., Murav'ev A.V., Smirnov A.V., Cyril'nikov M.D. FROST-2014 project and meteorological support of the Sochi-2014 Olympics. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 8, pp. 504-512. DOI: 10.3103/S1068373915080026.

9. Kiktev D.B., Murav'ev A.V., Bundel' A.Ju. Metodicheskie rekomendacii po verifikacii meteorologicheskikh prognozov. Moscow: AMA PRESS publ., 2021, 94 p. [in Russ.]

10. Kiktev D.B., Murav'ev A.V., Smirnov A.V. Prognozirovanie osadkov s pomoshh'ju modeli mul'tiplikativnogo kaskada: opyt radarnogo naukastinga. Mezhdunarodnaja konferencija «Turbulentnost', dinamika atmosfery i klimata», posvjashhennaja 100-letiju so dnja rozhdenija akademika A.M. Obuhova, Moskva, 16-18 maja 2018, tezisy dokladov, 27 p. [in Russ.]

11. Kisel'nikova, V.Z. Object-based evaluation of precipitation forecast quality. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 4, pp. 217-221. DOI: 10.3103/S1068373913040018.

12. Kisel'nikova V.Z. Object-oriented assessment of COSMO-Ru2 precipitation forecast quality for the warm season (May-September) in 2016-2020. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 380, no. 2, pp. 43-51 [in Russ.]

13. Kisel'nikova V.Z. The results of object-oriented estimation of precipitation forecast quality using the mesoscale model of the Hydrometcentre of Russia. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2014, vol. 351, pp. 34-42 [in Russ.]

14. Matheron G. Trait  de g ostatistique appliqu e. Vol. 1. 1962, Editions Technip, Paris, 334 p.

15. Metodicheskie ukazaniya po ispol'zovaniju informacii dopplerovskogo meteorologicheskogo radiolokatora DMRL-S v sinopticheskoy praktike: Tret'ja redakcija. Moscow: Rosgidromet publ., 2019, 129 p. Available at: [method.meteorf.ru/norma/document/dop\\_3red](http://method.meteorf.ru/norma/document/dop_3red) [in Russ.]

16. Monin A.S. Prognoz pogody kak zadacha fiziki. Moscow: Nauka publ., 1969, 184 p. [in Russ.]

17. Monin A.S., Jaglom A.M. Statisticheskaja gidromehanika. Tom 2. Izd. 2-e. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat publ., 1996, 742 p. [in Russ.]

18. Murav'ev A.V. Programma verifikacii meteorologicheskikh prognozov s pomoshh'ju okrestnoj ocenki «otnosheniya prostranstvennyh dolej» (FSS) dlja bol'shih vyborok s ispol'zovaniem metodov Monte-Karlo. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2020618547. Data registracii 30 ijulja 2020 g. [in Russ.]

19. Murav'ev A.V., Bundel' A.Ju., Kiktev D.B., Smirnov A.V. Expertise in spatial verification of radar precipitation nowcasting: identification and statistics of objects, situations and conditional samples. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2022, vol. 384, no. 2, pp. 6-52 [in Russ.]

20. Murav'ev A.V., Bundel' A.Ju., Kiktev D.B., Smirnov A.V. Verification of radar precipitation nowcasting of significant areas using the generalized Pareto distribution. Part 1: Elements of theory and methods for estimating parameters. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2022, vol. 385, no. 3, pp. 6-41 [in Russ.]

21. Murav'ev A.V., Bundel' A.Ju., Kiktev D.B., Smirnov A.V. Verification of radar precipitation nowcasting of significant areas using the generalized Pareto distribution. Part 2: Application to forecasts in warm and cold periods of 2017–2018. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2022, vol. 385, no. 3, pp. 42-77 [in Russ.]

22. Murav'ev A.V., Kiktev D.B., Bundel' A.Ju., 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.

23. Muravev 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.].

24. Murav'ev A.V., Kiktev D.B., Smirnov A.V. Usovershenstvovannaja tehnologija radiokacionnogo naukastinga osadkov i rezul'taty verifikacii v teplyj period goda (maj-sentjabr' 2020 g.). Rezul'taty ispytaniya novyh i usovershenstvovannyh tehnologij, modelej i metodov gidrometeorologicheskijh prognozov. 2021. *Informacionnyj sbornik № 48*, pp. 13–41 [in Russ.].

25. Muravev A.V., Kiktev D.B., Smirnov A.V., Zajchenko M.Yu. Operational precipitation nowcasting system based on radar data and comparative pointwise verification results for the warm and cold seasons. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*. [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2019, vol. 372, no. 2, pp. 12–40 [in Russ.].

26. Murav'ev A.V., Kiktev D.B., Smirnov A.V., Pavljukov Ju.B., Serebrjannik N.I. Verification of deterministic and probabilistic radar precipitation nowcasting in warm and cold seasons in the European part of Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2023, vol. 387, no. 1, pp. 21–66 [in Russ.].

27. Alferov D. and Coauthors. Intercomparison of Spatial Verification Methods for COSMO Terrain (INSPECT): Preliminary Results. *EMS Annual Meeting Abstracts*, 2015, vol. 12, EMS2015-140, 15th EMS/12th ECAM.

28. Blaylock B., Horel J.D. Comparison of Lightning Forecasts from the High-Resolution Rapid Refresh Model to Geostationary Lightning Mapper Observations. *Weather and Forecasting*, 2020, vol. 35, pp. 401–416.

29. 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.

30. Brown B.G., Gilleland E., Ebert E.E. Forecasts of spatial fields. *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*, 2nd ed. 2012/ I. T. Jolliffe and D. B. Stephenson, Eds. Wiley, pp. 95–117. <https://doi.org/10.1002/9781119960003.ch6>.

31. Bundel A., Muravyev A. The contiguous rain area (CRA) method application for the MesoVICT cases in the framework of the COSMO INSPECT project. *Annalen der Meteorologie*, 51, 7th International Verification Methods Workshop, 03–11 May 2017, Berlin, Germany, Programme and Abstracts, p 59.

32. Bundel A. and Coauthors. Spatial verification application in COSMO, ICCARUS 2018. *Book of Abstracts*, Offenbach, February 26–28, 2018, pp. 35.

33. Bundel A. and Coauthors. The COSMO Priority Project INSPECT. Final Report. *COSMO Technical Report No. 37*, January 2019. DOI: 10.5676/DWD/pub/nwv/cosmo-tr37.

34. Casati, B., Wilson L.J., Stephenson D.B., Nurmi P., Ghelli A., Pocernich M., Damrath U., Ebert E.E., Brown B.G., Mason S. Forecast verification: Current status and future directions. *Meteor. Appl.*, 2008, vol.15. pp. 3–18.

35. Coleman A., Ancell B. Toward the Improvement of High-Impact Probabilistic Forecasts with a Sensitivity-Based Convective-Scale Ensemble Subsetting Technique. *Mon. Wea. Rev.*, 2020, vol. 148, pp. 4995–5014.

36. Davis C.A., Brown B.G., Bullock R.G. Object-based verification of precipitation forecasts, Part I: Methodology and application to mesoscale rain areas. *Mon. Wea. Rev.*, 2006, vol. 134, pp. 1772–1784.

37. Dougherty K.J., Horel J.D., Nachamkin J.E. Forecast Skill for California Heavy Precipitation Periods from the High-Resolution Rapid Refresh Model and the Coupled Ocean–Atmosphere Mesoscale Prediction System. *Weather and Forecasting*, 2020, vol. 36, pp. 2275–2288.

38. Ebert E.E. Fuzzy verification of high resolution gridded forecasts: A review and proposed framework. *Meteorol. Appl.*, 2008, vol. 15, pp. 51–64.

39. Ebert E.E. Neighborhood verification: A strategy for rewarding close forecasts. *Weather and Forecasting*, 2009, vol. 24, pp. 1498–1510. DOI:10.1175/2009WAF2222251.1.

40. Faggian N., Roux B., Steinle P., Ebert B. Fast calculation of the fractions skill score. *Mausam*, 2015, vol. 66, pp. 457–466. [http://metnet.imd.gov.in/mausamdocs/166310\\_F.pdf](http://metnet.imd.gov.in/mausamdocs/166310_F.pdf).

41. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science, 2nd ed. / Eds Jolliffe, I.T., Stephenson, D.B. Wiley-Blackwell, 2012, 274 p.

42. Gallo B.T., Kalb C.P., Gotway J.H., Fisher H.H., Roberts B., Jirak I.I., Clark A.J., Alexander C., Jensen T. Initial development and testing of a convection-allowing model scorecard. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2019, vol. 12, pp. 367-383.

43. Gallo B.T., Wilson K.A., Choate J., Knopfmeier K., Skinner P., Roberts B., Heinselman P., Jirak I., Clark A.J. Exploring the Watch-to-Warning Space: Experimental Outlook Performance during the 2019 Spring Forecasting Experiment in NOAA's Hazardous Weather Testbed. *Weather and Forecasting*, 2022, vol. 37, pp. 617-637.

44. Gelfand, A.E., Diggle P., Guttorp P., Fuentes M. *Handbook of Spatial Statistics*. Chapman & Hall/CRC Handbooks of Modern Statistical Methods, CRC Press. 2010, Retrieved 2023-04-04.

45. Gilleland, E., Ahijevych D., Brown B.G., Casati B., Ebert E.E. Intercomparison of spatial verification methods. *Weather and Forecasting*, 2009, vol. 24, pp. 1416-1430.

46. Gilleland E. 2022. <https://cran.r-project.org/web/packages/SpatialVx/SpatialVx.pdf>

47. Gilleland E. Two-dimensional kernel smoothing: Using the R package "smoothie." *NCAR Tech. Note NCAR/TN-5021STR*, 2013, 17 p. <https://doi.org/10.5065/D61834G2>.

48. Gofa F. and Coauthors. Appraisal of Challenging Weather forecasts (AWARE) in COSMO. Program and abstracts of the Nov 2020 International Verification Method Workshop - Online. p. 47. [https://backend.univie.ac.at/fileadmin/user\\_upload/i\\_jwgfvr/AbstractsBook2020ivmwo.pdf](https://backend.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/i_jwgfvr/AbstractsBook2020ivmwo.pdf)

49. Houze R.A.Jr. 100 years of research on mesoscale convective systems. A Century of Progress in Atmospheric and Related Sciences: Celebrating the American Meteorological Society Centennial. *Meteor. Monogr.*, 2019, no. 59. <https://doi.org/10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0001.1>

50. Kiktev D. Joe P., Isaac G.A., Montani A., Frogner I.-L., Nurmi P., Bica B., Milbrandt J., Tsyrunnikov M., Astakhova E., Bundel A., Belair S., Pyle M., Muravyev A., Rivin G., Rozinkina I., Paccagnella T., Wang Y., Reid J., Nipen T., Ahn K.-D. FROST-2014: The Sochi Winter Olympics International Project. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2017, vol. 98, pp. 1908-1929.

51. Lagerquist R., Stewart J.Q., Ebert-Uphoff I., Kumler C. Using Deep Learning to Nowcast the Spatial Coverage of Convection from Himawari-8 Satellite Data. *Mon. Wea. Rev.*, 2021, vol. 149, pp. 3897-3921.

52. Lledó L., Haiden T., Schröttele J., Forbes R. Scale-dependent verification of precipitation and cloudiness at ECMWF. *Newsletter no. 174*, Winter 2022/23, pp. 18-22.

53. Lorenz E.N. Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues. *J. Atm. Sci.*, 1969, vol. 26, pp. 636-646.

54. Mass C.F., Ovens D., Westrick K., Colle B.A. Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2002, vol. 83, pp. 407-430.

55. Melsom A., Palerme C., Müller M. Validation metrics for ice edge position forecasts. *Ocean Sci*, 2019, vol. 15, pp. 615-630.

56. Mittermaier M. How interpolation and resolution can affect verification scores: A study based on the fractions skill score. *Meteor. Z.*, 2019, vol. 28, pp. 181-192. DOI: 10.1127/metz/2018/0890

57. Mittermaier M.A. "Meta" Analysis of the Fractions Skill Score: The Limiting Case and Implications for Aggregation. *Mon. Wea. Rev.*, 2021, vol. 149, pp. 3491-3504.

58. Mittermaier M., Roberts N. Inter-comparison of spatial forecast verification methods: Identifying skillful spatial scales using the fractions skill score. *Weather and Forecasting*, 2010, vol. 25, pp. 343-354. DOI: 10.1175/2009WAF2222260.1

59. Mittermaier M., Thompson S. A long-term assessment of precipitation forecast skill using the fractions skill score. *Meteor. Appl.*, 2013, vol. 20, pp. 176-186. DOI: 10.1002/met.296

60. Muravev A., A. Bundel, D. Kiktev, N. Bocharnikov, and T. Bazlova. On the spatial verification of FROST-2014 precipitation forecast fields. *EMS Annual Meeting Abstracts*, 2015, vol. 12, EMS2015-154-2, 15th EMS / 12th ECAM.

61. Muraviev A., Bundel A., Kiktev D., Bocharnikov N., Bazlova T. On the spatial verification of FROST-2014 precipitation forecast fields. COSMO GM, 07.09.2015. [https://www.cosmo-model.org/content/consortium/generalMeetings/general2015/parallel/Bundel\\_SPATIAL\\_IN-SPECT\\_session\\_GM2015.pdf](https://www.cosmo-model.org/content/consortium/generalMeetings/general2015/parallel/Bundel_SPATIAL_IN-SPECT_session_GM2015.pdf)

62. Nachamkin J.E., Schmidt J. Applying a neighborhood fractions sampling approach as a diagnostic tool. *Mon. Wea. Rev.*, 2015, vol. 143, pp. 4736-4749. DOI: 10.1175/MWR-D-14-00411.1
63. Pulkkinen S., Nerini D., Hortal A., Velasco-Forero C., Seed A., Germann U., Foresti L. Pysteps: an open-source Python library for probabilistic precipitation nowcasting (v1.0). *Geosci. Model Dev.*, 2019, vol. 12, pp. 4185-4219. DOI: 10.5194/gmd-12-4185-2019
64. Richardson L.F. Weather prediction by numerical process. Cambridge University Press (republished by Dover. 1965), 1922.
65. Ripley B.D. Spatial Statistics. John Wiley & Sons, Inc, 1981, 267 pp.
66. Roberts N. Assessing the spatial and temporal variation in the skill of precipitation forecasts from an NWP model. *Meteor. Appl.*, 2008, vol.15, pp. 163-169. DOI: 10.1002/met.57
67. Roberts N., Lean H. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events. *Mon. Wea. Rev.*, 2008, vol. 136, pp. 78-97. DOI: 10.1175/2007MWR2123.1
68. Schertzer D., Lovejoy S. Physical modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative processes. *J. Geophys. Res.*, 1987, vol. 92, pp. 9692-9714.
69. Seed A.W. Modelling and forecasting rainfall in space and time. *Scales in Hydrology and Water management* (IAHS Publ. 287), 2004, pp. 137-152.
70. Simecek-Beatty D., Lehr W.J. Oil spill forecast assessment using Fractions Skill Score. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, vol. 164, 112041. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112041
71. Skamarock W.C. Evaluating mesoscale NWP models using kinetic energy spectra. *Mon. Wea. Rev.*, 2004, vol. 132, pp. 3019-3032. DOI: 10.1175/MWR2830.1
72. Skok G. Analysis of fraction skill score properties for a displaced rainband in a rectangular domain. *Meteor. Appl.*, 2015, vol. 22, pp. 477-484. DOI: 10.1002/met.1478
73. Skok G. Analysis of fraction skill score properties for a displaced rainy grid point in a rectangular domain. *Atmos. Res.*, 2016, vol. 169, pp. 556-565. DOI: 10.1016/j.atmosres.2015.04.012
74. Skok G., Hladnik V. Verification of Gridded Wind Forecasts in Complex Alpine Terrain: A New Wind Verification Methodology Based on the Neighborhood Approach. *Mon. Wea. Rev.*, 2018, vol. 146, pp. 63-75.
75. Skok G., Roberts N. Analysis of fractions skill score properties for random precipitation fields and ECMWF forecasts. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2016, vol. 142, pp. 2599-2610. DOI: 10.1002/qj.2849.
76. Sun X., Huang X.-Y., Gordon C., Mittermaier M., Beckett R., Cheong W.K., Barker D., North R., Semple A. A Subjective and Objective Evaluation of Model Forecasts of Sumatra Squall Events. *Weather and Forecasting*, 2020, vol. 35, pp. 489-506.
77. Theis S.E., Hense A., Damrath U. Probabilistic precipitation forecasts from a deterministic model: A pragmatic approach. *Meteor. Appl.*, 2005, vol. 12, pp. 257-268.
78. WMO-No. 237. Manual for depth-area-duration analysis of storm precipitation, 1969, Tpp. 129.
79. WMO-No.168. Guide to Hydrological Practices, Volume II: Management of Water Resources and Applications of Hydrological Practices, 2009.
80. Woodhams B.J., Birch C.B., Marsham J.H., Bain C.L., Roberts N.M., Boyd D.F.A. What Is the Added Value of a Convection-Permitting Model for Forecasting Extreme Rainfall over Tropical East Africa? *Mon. Wea. Rev.*, 2018, vol. 146, pp. 2757-2780.

Поступила 21.08.2023; одобрена после рецензирования 20.09.2023;

принята в печать 06.10.2023.

Submitted 21.08.2023; approved after reviewing 20.09.2023;

accepted for publication 06.10.2023.