

УДК 551.58(268.46)(045)

Использование радиолокационной информации при оценке прогноза погоды с высоким разрешением

Р.Б. Зарипов^{1,2}, Ю.Б. Павлюков², А.А. Шумилин², А.В. Травов²

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия*

*²Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный, Московская обл., Россия
zaripov@mecom.ru*

Рассматриваются описанные в литературе методы оценки прогностических полей осадков с высоким пространственным разрешением. Основное внимание уделяется методам, при которых принимается во внимание пространственное распределение осадков. Подобные методы предлагается применять не только при оценке полей осадков, но также верхней границы облачности и явлений погоды, рассчитываемых по прогностическим полям радиолокационной отражаемости. В качестве источника фактической информации используются данные наблюдений радиолокационной отражаемости, по которым рассчитываются интенсивность и суммы осадков, верхняя граница облачности и явления погоды. В качестве примера приводятся некоторые оценки экспериментальной системы сверхкраткосрочного прогноза погоды, подготовленной в ФГБУ «ЦАО» с использованием модели атмосферы WRF ARW, системы 3-х мерного вариационного усвоения данных WRF 3D-Var и технологий даунскейлинга.

Ключевые слова: оценка прогнозов осадков; учет при оценке пространственного распределения осадков; оценка прогнозов по радиолокационным наблюдениям; сверхкраткосрочный прогноз погоды

Application of radar information for verification of the high-resolution numerical weather prediction

R.B. Zaripov^{1,2}, Yu.B. Pavlyukov², A.A. Shumilin², A.V. Travov²

*¹ Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia*

*² Central Aerological Observatory, Dolgoprudny, Moscow region, Russia
zaripov@mecom.ru*

The described in literature verification methods for high-resolution precipitation fields are considered. The main attention is paid to methods at which spatial distribution of rainfall is considered. Similar methods are offered not only for precipitation fields, but also for the cloud top and weather phenomena obtained from modeled fields of radar reflectivity. The observations of radar reflectivity are used to calculate precipitation rate and precipitation sums, the cloud top and weather phenomena. These fields are used as fact fields in verification. Some verification scores of the experimental nowcasting system are considered to make the description of methods more clear. The experimental system is developed in «CAO», it contains WRF ARW model, WRF 3D-Var and downscaling technologies.

Keywords: precipitation forecast verification, spatial forecast verification methods, forecast verification on radar data, nowcasting

Введение

В последние годы развитие прогностических моделей атмосферы сопровождается повышением их пространственного разрешения и переходом к прямому воспроизведению конвективных процессов [15, 22, 34, 40]. В результате многие мезомасштабные процессы, ранее воспроизводимые с использованием различных параметризаций, теперь воспроизводятся напрямую – с восстановлением 3-х мерной структуры воздушных течений, полей облачности и осадков различных типов.

Однако оказалось, что при повышении разрешения прогностических полей традиционные метрики оценки качества прогнозов, основанные на сравнении рассчитываемых и наблюдаемых значений только в пунктах наблюдений, во многих случаях не предоставляют достоверной информации о качестве прогнозов [18, 24]. Проблему можно представить на следующем простом примере: в прогнозе воспроизведена конвективная система, присутствующая и в наблюдениях – но с пространственным сдвигом (подобные ошибки чаще встречаются с повышением разрешения моделей [30]). В этом случае традиционные оценки (см. следующий раздел) покажут, что подобный прогноз заметно хуже прогноза, в котором система не воспроизведена вообще. Хотя с точки зрения потребителей первый прогноз явно более полезен – он предупреждает о возможности конвекции и опасных явлений. Но этот более полезный прогноз оказывается «оштрафованным» дважды – первый раз за отсутствие конвективной системы там, где она должна быть, а второй раз за то, что она предсказана там, где ее быть не должно.

В рамках совместных работ Гидрометцентра России и Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) работы по воспроизведению динамики атмосферы с помощью воспроизводящей конвекцию модели WRF-ARW (далее WRF) [20, 39] проводятся на протяжении многих лет [3–5]. При этом задаче обоснованного различия «хороших» и «плохих» прогнозов придавалось немаловажное значение [3, 10].

Однако при оценке результатов регулярного счета системы «анализ-прогноз» [14] ранее применявшиеся в Гидрометцентре России и ЦАО подходы оказались малоприменимыми. Рассмотрев представленные в литературе методы оценки качества прогнозов с высоким пространственным разрешением, авторы подготовили систему оценки, которую сочли полезной и для использования в других исследованиях. Для повышения «самодостаточности» описания ряд сведений, заимствованных из литературных источников, включены в текст.

1. Типичные оценки прогноза факта явления

Рассмотрим прогноз какого-либо явления. К примеру, прогноз превышения количеством выпавших за определенный период осадков некоторого порогового значения. В выбранном пункте наблюдений

в рассматриваемый отрезок времени данное явление может наблюдаться или нет. Также явление может прогнозироваться или нет. При рассмотрении значительного числа прогнозов (не обязательно для одного и того же пункта – может рассматриваться группа станций или ячейки выбранной регулярной сетки) все случаи прогноза сводятся в таблицу сопряженности (табл. 1).

Таблица 1. Распределение возможных случаев при прогнозе факта явления

Table 1. Contiguous table for occurrence and non-occurrence prediction

| | | Факт | |
|---------|-----|----------|----------|
| | | Да | Нет |
| Прогноз | Да | A_{11} | A_{12} |
| | Нет | A_{21} | A_{22} |

В табл. 1: A_{11} – число случаев успешных прогнозов явления – когда оно наблюдалось и было спрогнозировано (hits в англоязычной литературе); A_{12} – число «ложных тревог» (false alarms), когда явление спрогнозировано, но не наблюдалось; A_{21} – непредсказанные события (misses), т. е. наблюдались, но не были спрогнозированы; A_{22} – правильные прогнозы отсутствия явления (correct negatives). Общее число рассматриваемых случаев (сумма элементов A_{ij} в табл. 1) обозначим N .

В монографиях [33, 43] рассматриваются следующие характеристики прогнозов, которые могут быть получены по содержимому табл. 1.

Общая оправдываемость прогнозов (ассигасу) определяется соотношением:

$$ACC = \frac{A_{11} + A_{22}}{N}. \quad (1)$$

Доля случаев наступления явления, которая была предсказана (Probability of Detection, также называемая Hit Rate) – предупрежденность явления, рассчитывается как

$$POD = \frac{A_{11}}{A_{11} + A_{21}}. \quad (2)$$

Предупрежденность случаев без явления (распространенного термина в англоязычной литературе нет – назовем POND – Probability of Negative Detection), используется при получении более сложных оценок:

$$POND = \frac{A_{22}}{A_{22} + A_{12}}. \quad (3)$$

Доля ложных тревог (False Alarm Ratio) определяется как

$$\text{FAR} = \frac{A_{12}}{A_{11} + A_{12}}. \quad (4)$$

Смещение в числе прогнозируемых случаев осадков относительно наблюдаемых (Quantitative BIAS):

$$\text{BIASQ} = \frac{A_{11} + A_{12}}{A_{11} + A_{21}}. \quad (5)$$

В том случае, когда прогнозируемое явление (к примеру, сильные осадки) имеет малую повторяемость, информативной является величина TS (Threat Score), обозначаемая в ряде работ и как CSI (Critical Success Index):

$$\text{TS} = \frac{A_{11}}{A_{11} + A_{12} + A_{21}}. \quad (6)$$

Распространенными являются и более сложные характеристики качества прогнозов. Так, для повышения информативности величина TS (Thread Score) часто (в работах зарубежных исследователей по количественной оценке прогнозов осадков) трансформируется в ETS (Equitable Threat Score):

$$\text{ETS} = \frac{A_{11} - A_{11}^{\text{rand}}}{A_{11} + A_{12} + A_{21} - A_{11}^{\text{rand}}}, \quad (7)$$

где A_{11}^{rand} – доля правильных прогнозов факта осадков, которая могла бы получиться случайно:

$$A_{11}^{\text{rand}} = \frac{(A_{11} + A_{12})(A_{11} + A_{21})}{N}. \quad (8)$$

ETS удобен тем, что дает более взвешенную оценку и в том случае, когда прогнозируемое событие происходит редко (к примеру, прогноз осадков в сухом климате: значение $(A_{12} + A_{21})/N$ невелико), и когда оно происходит достаточно часто. ETS абсолютно точного прогноза 1, нижний предел $-1/3$, полностью бесполезный прогноз 0.

В качестве критериев качества прогнозов в Советском Союзе, а затем и в России широкое распространение получили коэффициенты Пирси-Обухова (PSS – Peirce's Skill Score) и Багрова-Хайдке (HSS – Heidke Skill Score) (см. раздел «Оценки прогнозов» сайта Методического кабинета Гидрометцентра России (<http://method.meteorf.ru>)). В [1] на примере рассмотрены некоторые показатели качества прогнозов: имеется 100 дней наблюдений, в 10 из них выпадают осадки, а в остальных 90 – нет. Показано, что простые критерии по отдельности не всегда характеризуют успешность прогноза: например, $\text{POD} = 100\%$ для факта дождя легко добиться, если все время давать один и тот же прогноз «дождь»; снижения False Alarm Rate (FAR) можно добиться, выдавая все время прогноз «без

осадков»; а повышения ACC – предсказываемая наиболее часто встречающаяся ситуация.

Однако «манипуляциями» такого типа комбинацию критериев POD+POND правильно увеличить сложно. Данная характеристика равна 0 при абсолютно неудачных прогнозах и 2 при абсолютно точных прогнозах. Сумма POD+POND – по-видимому, самая простая характеристика качества прогноза бинарных событий, позволяющая оценить качество прогноза без рассмотрения других характеристик. Можно предположить, что разные авторы придумывали эту характеристику независимо друг от друга. Для применения на практике оказалось удобным ввести слегка измененный коэффициент $PSS = POD + POND - 1$, меняющийся в пределах от -1 до 1. Преобразуя выражение можно получить более простую формулу для расчета PSS:

$$PSS = POD + POND - 1 = \frac{A_{11}}{A_{11} + A_{21}} + \frac{A_{22}}{A_{12} + A_{22}} = \frac{A_{11}A_{22} - A_{21}A_{12}}{(A_{11} + A_{21})(A_{12} + A_{22})}. \quad (9)$$

На примере из [1] можно рассмотреть особенность PSS при редких явлениях: правильный прогноз 1 случая дождя вносит в PSS такой же вклад, как и 9 правильных прогнозов отсутствия осадков, т. е. относительно хорошие значения PSS можно получить и при значительном смещении прогноза в сторону завышения числа прогнозов более редких явлений. Так, если из 100 дней (10 с осадками, 90 без) предсказывать осадки в 50 днях (т. е. завысив их число в 5 раз), но при этом правильно предсказать все 10 дней с осадками, то PSS будет равен 0,56, что считается полезным прогнозом [17]. В то же время, очевидно, что подобная систематическая ошибка (прогнозируемых осадков в 5 раз больше наблюдаемых) существенно понижает ценность прогноза.

Коэффициент Хайдке, или критерий надежности Багрова-Хайдке, в свое время получил распространение как самый простой способ оценки превышения качества прогноза относительно прогноза по «климатической норме». К примеру, из [1]: пусть генератор случайных чисел выдает «дождь» 1 раз из 10 и «без осадков» – в остальных 9 случаях. Если будет предлагаться система прогноза, которая ненамного лучше генератора случайных чисел, то полезность ее явно сомнительна.

Вводится характеристика:

$$HSS = \frac{ACC - E}{1 - E}, \quad (10)$$

где E – вероятность случайного угадывания факта явления, может быть рассчитано как

$$E = \frac{A_{11} + A_{21}}{N} \cdot \frac{A_{11} + A_{12}}{N} + \frac{A_{12} + A_{22}}{N} \cdot \frac{A_{21} + A_{22}}{N}. \quad (11)$$

Отметим, что в [1] HSS использовался в качестве меры превосходства методики прогноза относительно использования в качестве прогноза «климатической нормы». В современных работах по оценке качества численного прогноза погоды разность PSS–HSS характеризует такую величину, как BIASQ.

Перечисленные выше характеристики удобны при оценке прогноза факта осадков и наступления каких-либо явлений в пунктах. Когда требуется оценка прогноза количества осадков, используют те же характеристики, но рассматривается факт превышения количеством или интенсивностью осадков того или иного порогового значения.

Для количественной оценки качества прогноза осадков в России существует официальный метод, описанный в введенном в действие в 2009 году Наставлении [13]. В данном документе предложено использовать оправдываемость количества выпадающих за период 12 часов осадков (что определено интервалом сбора осадков на российской сети синоптических станций), рассчитываемую по формуле:

$$P_{\text{quan}} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m N_{ij} \cdot P_{ij}}{N}, \quad (2)$$

где m – число градаций выпадающих осадков; N_{ij} – число случаев, когда наблюдаемое количество осадков попадает в i -ю градацию, а прогнозируемые осадки – в j -ю градацию; P_{ij} – значение оправдываемости прогноза, которое присваивается за попадание наблюдаемых и прогнозируемых осадков в те или иные задаваемые таблично градации [13], табл. 2 – для жидких и смешанных осадков, табл. 3 – для твердых, но без округления градаций.

Таблица 2. Оправдываемость (%) прогноза количества жидких и смешанных осадков Q (мм)

Table 2. Accuracy (%) for forecasts of liquid and mixed precipitation sums Q (mm)

| Прогноз количества 12-часовых осадков, мм | Фактическое количество 12-часовых осадков, мм | | | | |
|---|---|---------------|-----------------|------------------|-------------|
| | Без осадков | $0.0 < Q < 3$ | $3 \leq Q < 15$ | $15 \leq Q < 50$ | $Q \geq 50$ |
| Без осадков | 100 | 50 | 0 | 0 | 0 |
| $0.0 < Q < 3$ | 50 | 100 | 50 | 0 | 0 |
| $3 \leq Q < 15$ | 0 | 50 | 100 | 50 | 0 |
| $15 \leq Q < 50$ | 0 | 0 | 50 | 100 | 50 |
| $Q \geq 50^*$ | 0 | 0 | 0 | 50* | 100* |

Примечание: * Прогноз количества осадков ≥ 50 мм за 12 часов (опасное явление погоды) оценивается с допуском, т. е. считается оправдавшимся на 100 %, если было предсказано ≥ 40 мм осадков, и оправдавшимся на 50 %, если предсказано не менее 15 мм осадков.

Таблица 3. Оправдываемость (%) прогноза количества твердых осадков Q (мм)**Table 3.** Accuracy (%) of the forecast of solid precipitation Q (mm)

| Прогноз количества 12-часовых осадков, мм | Фактическое количество 12-часовых осадков, мм | | | | |
|---|---|-------------|-----------|------------|--------|
| | Без осадков | 0.0 < Q < 1 | 1 ≤ Q < 5 | 5 ≤ Q < 20 | Q ≥ 20 |
| Без осадков | 100 | 50 | 0 | 0 | 0 |
| 0.0 < Q < 1 | 50 | 100 | 50 | 0 | 0 |
| 1 ≤ Q < 5 | 0 | 50 | 100 | 50 | 0 |
| 5 ≤ Q < 20 | 0 | 0 | 50 | 100 | 50 |
| Q ≥ 20* | 0 | 0 | 0 | 50* | 100* |

Примечание: * Прогноз количества осадков ≥ 20 мм за 12 часов (опасное явление погоды) оценивается с допуском, т. е. считается оправдавшимся на 100 %, если было предсказано ≥ 16 мм осадков, и оправдавшимся на 50 %, если предсказано не менее 5 мм осадков.

Таблица, сформированная значениями N_{ij} (Multi-category Contingency Table), является полезным источником сведений о характере ошибок прогноза (см., к примеру, [44]).

2. Методы пространственной оценки прогнозов

Неэффективность традиционных метрик применительно к прогнозу с высоким пространственным разрешением привела к появлению альтернативных методов оценки качества таких прогнозов. Некоторые из подобных стратегий используют чисто субъективные подходы, в которых качество прогнозов оценивается синоптиком. Пример – выставление прогнозу оценок: «хороший», «плохой», «удовлетворительный» в результате визуальной оценки синоптиком по некоторому набору разработанных критериев [42]. Другие стратегии предлагают использование комбинированного подхода, к примеру – заполнение синоптиком типичной таблицы сопряженности (табл. 1), а затем расчет традиционных метрик (1) – (12) по полученной таким образом таблице.

Все большее распространение стали получать методики, в которых проводится сопоставление пространственной структуры полей наблюдаемых и рассчитанных осадков [18, 30, 31]. В англоязычной литературе подобные методы называются «Spatial forecast verification methods», будем использовать для подобных методов термин «методы пространственной оценки прогнозов». Наиболее полная классификация подобных методик, применяемых при оценке прогнозов осадков с высоким пространственным разрешением, приводится в [31].

В 2007 году был сформирован проект Spatial Forecast Verification Methods Intercomparison Project (ICP) [18, 31, 32]. Участникам проекта предлагается с использованием разрабатываемых методов провести оценку заданного набора прогнозов – 5 идеализированных геометрических

прогностических случаев и 7 возмущенных случаев с предписанными ошибками для проверки – дают ли методы оценки полезную информацию. На рис. 1 приводятся рассматриваемые в ICP идеализированные поля наблюдаемых и прогностических осадков. Рисунок демонстрирует сложность задачи пространственной оценки прогнозов. Методы пространственной оценки над областями со сложным рельефом рассматриваются в ходе проекта MesoVICT [2], являющимся развитием проекта ICP.

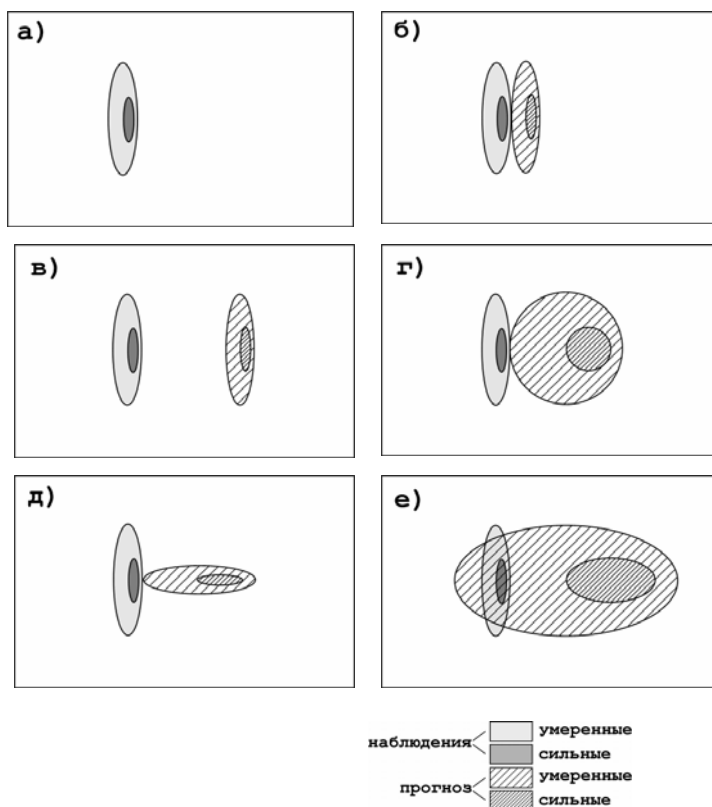


Рис. 1. Предлагаемые для рассмотрения в проекте ICP идеализированные случаи прогноза осадков [18].

Fig. 1. The idealized patterns of precipitation forecast proposed for consideration in the ICP project [18].

В обзорной работе [31] методы пространственной оценки качества прогнозов предлагается разделять на две категории – методы свертки и рассмотрение смещений. Методы свертки («filtering» в англоязычной литературе, на русский иногда переводятся как «фильтр» или «фильтрация»), в свою очередь, могут быть разделены на методы рассмотрения окружения («neighborhood») и деления масштабов («scale separation» или «scale

decomposition»). Рассмотрение смещений – на объектно-ориентированные методы («feature based» или «object based») и методы рассмотрения деформации полей («field deformation»). При этом «объектом» прогноза удобно назвать некоторую область, которую выделил бы при рассмотрении специалист по прогнозу погоды, к примеру область, где интенсивность осадков превышает некоторое пороговое значение. Методы всех перечисленных групп предоставляют значительно больше информации о качестве прогноза полей осадков с высоким пространственным разрешением, чем традиционные способы оценки (1) – (12). Но при этом неочевидно, какие из них более полезны при решении тех или иных задач.

Методы свертки предполагают пространственное преобразование («свертку») для одного или обоих рассматриваемых полей (прогноз и наблюдения), а затем расчет оценок для преобразованных полей. Обычно преобразование заключается в получении некоторой обобщенной информации о полях осадков (средние, минимальные и максимальные значения, доля площади, занятая осадками) с более грубым пространственным разрешением, чем тот, на котором был рассчитан прогноз.

Методы разделения масштабов предполагают использование различных разложений полей (преобразование Фурье, вейвлеты и т. д.) – таким образом, что оценки качества прогнозов на различных масштабах могут быть рассчитаны отдельно. Рассматриваемые масштабы часто представляют тот или иной класс метеорологических явлений, такие как крупномасштабные фронтальные системы или мелкомасштабные конвективные ливни [2]. Различие между подходами заключается в том, что при использовании свертки обычно рассматриваются сглаженные прогнозы (нередко различной степени сглаженности), при этом теряется возможность рассмотрения мелких масштабов. При разделении масштабов структуры разных масштабов рассматриваются по отдельности, но из рассматриваемых полей можно восстановить исходные поля (т. е. потерь информации не происходит).

Объектно-ориентированные методы и методы деформации полей схожи в том, что в них предполагается сопоставление наблюдаемых и прогнозируемых объектов. Методы предоставляют информацию о том, насколько прогностическое поле должно быть трансформировано (смещением, поворотом, растяжением и т. д.) и позволяют оценить оставшиеся после преобразования поля ошибки с целью получения более весомой информации о качестве прогноза. Основное различие между методами заключается в том, что в объектно-ориентированных методах сначала идентифицируются атмосферные образования (объекты), которые будут рассматриваться (к примеру, кучево-дождевые облака), а затем каждое образование рассматривается отдельно. Методы деформации полей одновременно анализируют все прогностическое поле или некоторую его выбранную для оценки часть. Поскольку обе группы методов описывают,

какие смещения необходимы для того, чтобы прогностическое поле соотносилось бы с наблюдаемым полем, вместе они характеризуются как методы рассмотрения смещений.

Достаточно многочисленные и широко распространенные объектно-ориентированные методы предложены для более пристального рассмотрения воспроизведения прогнозом общей структуры метеорологических образований. Основное различие между собой подобных методов заключается в том, как они определяют: а) что является рассматриваемыми объектами; б) могут ли близко расположенные объекты считаться одним, более крупным; в) как сопоставляются объекты в прогностических и наблюдаемых полях; г) какие виды диагностики используются и какие статистические показатели рассчитываются. В отечественных работах [3, 10] при оценке прогноза систем глубокой конвекции по модели WRF-ARW [20, 39] использовался предложенный в [25, 26] метод, называемый Method for Object-based Diagnostic Evaluation (MODE), который предполагает выделение объектов с учетом порогового значения интенсивности после предварительной процедуры сглаживания полей. Следует отметить, что объектно-ориентированные методы оценки уже несколько десятилетий используются при оценке прогнозов тайфунов – оценивается их положение и интенсивность [25].

Методы деформации полей предполагают манипуляцию полями в пространстве с целью привести прогностическое поле как можно ближе (в фазовом пространстве) к полю наблюдаемому. При этом воспроизводится поля векторов смещений, которые и анализируются. Возможны различные способы представления смещения. К примеру, в [19, 28] используется полиномиальное представление смещений.

Следует указать на возможные области применения методов смещения. Данные методы могут сообщать исследователю достаточно полезную информацию об успешности моделирования развития той или иной конвективной системы или же о движении крупномасштабного атмосферного образования. Но они малопригодны в том случае, если требуется получить оценку в ситуации, когда в области моделирования имеются несколько объектов прогноза. Кроме этого, неочевидно, как следует осреднять результаты, полученные для серии прогнозов. При неполном покрытии рассматриваемой области наблюдениями [14, рис. 1] не всегда понятно, как трактовать отсутствие в полях наблюдений воспроизведенного моделью образования: воспроизведено ошибочно или просто не попало в покрытые наблюдениями области. Поэтому методы смещения применяются в основном в исследовательских работах, в России [3, 10].

Для оценки же прогнозов с высоким пространственным разрешением на регулярной основе более удобными выглядят методы, основанные на рассмотрении окружения. Хотя данные методы предоставляют не так много информации об успешности прогноза положения тех или иных конвективных систем, они предоставляют полезную потребителям информацию

о том, в какой степени можно доверять прогнозу, полученному с помощью того или иного прогностического метода.

Рассмотрим данные методы более подробно.

1. Понижение детализации (upscaling). Данный метод является старейшим и наиболее распространенным среди методов рассмотрения окружения. В данном методе наблюдения и прогноз приводятся к более грубому представлению в пространстве (более грубая сетка) и во времени (большая длина рассматриваемых периодов), а затем к огрубленным прогнозам применяются обычные оценки (1) – (12). Подобные оценки являются, фактически, лишь оценками средних значений. Поэтому для ряда приложений они не очень показательны, так как при осреднении заметная часть полезной информации (например, о максимальной интенсивности осадков и о покрытии рассматриваемой области осадками), теряется. Можно дополнить обычное осреднение по ячейкам рассмотрением максимальной (по рассматриваемым ячейкам) интенсивности того или иного явления (осадков). Нередко рассматриваются оценки поля с различной степенью огрубления, например без огрубления, по областям 3×3 точки сетки, 5×5 и т. д. – вплоть до наибольшего размера областей осреднения, представляющего интерес. Для разных критериев (например, PSS или ETS) существуют значения, при превышении которых прогноз считается практически значимым. К примеру – для коэффициента Пирси-Обухова это пороговое значение 0,3 [17], для ETS – 0,5 [24]. Рассматривая значения критериев при разном огрублении полей, можно сказать, прогноз до какого масштаба имеет смысл использовать.

2. Рассмотрение окружения без понижения детализации [30]. В методах оценки качества прогнозов с рассмотрением окружения рассчитываются метрики качества для набора выделенных в области моделирования пространственных участков, где окрестность представляет собой группу ячеек сетки, центрированную в каждой индивидуальной ячейке сетки. Окно может быть круглым или прямоугольным. Согласно [30], это оказывает относительно небольшое влияние на результат, при этом с прямоугольными участками работать проще. Размер рассматриваемой окрестности возрастает с 1×1 к 3×3 узлов сетки и далее – вплоть до наибольшего размера, допустимого на данной области расчетов. Поскольку многие ошибки прогноза связаны со сдвигом в прогнозе прохождения фронта или конвективного образования, то имеет смысл также расширять понятие «окрестности» и во времени.

На рис. 2 показан искусственный пример прогноза факта осадков с высоким пространственным разрешением. На рис. 2 а красной штриховкой выделены ячейки используемой при оценке сетки, в которых наблюдались осадки, а синей штриховкой – где они были спрогнозированы. R – радиус, в котором проводится рассмотрение окружения. Соответственно, ячейки сетки, где осадки и наблюдались, и прогнозировались, заштрихованы и красным и, синим цветом. В данном конкретном примере

коэффициент Пирси-Обухова для выделенной области без понижения разрешения составляет около 0,15, а при огрублении полей (рис. 2 б) – 0,25, т. е. хотя PSS остается невысоким, он все же выше, чем до огрубления.

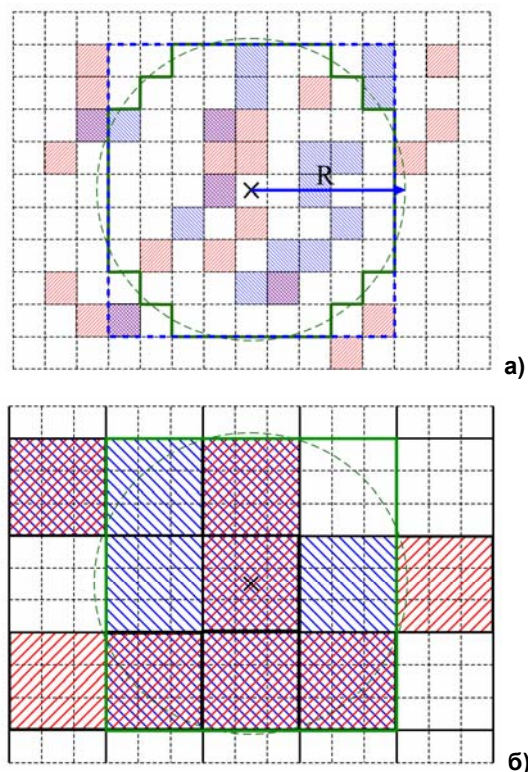


Рис. 2. Рассмотрение окружения при оценке прогноза осадков с высоким пространственным разрешением: а) данные на детальной сетке; б) данные на огрубленной сетке (upscaling). Выделены зеленым рассматриваемые ячейки, синим – спрогнозированы осадки, красным – наблюдались осадки, крестом помечена точка, в окрестностях которой проводится рассмотрение окружения.

Fig. 2. Consideration of the neighborhood for the assessment of high-resolution precipitation forecast: a) data on the detailed grid; b) data on the coarse grid (upscaling). The green square includes the analyzed cells, the blue ones are those where precipitation was predicted, the red ones are those where precipitation was observed, the cross is the point in the vicinity of which the neighborhood is considered

В работах [24, 30] предлагается использовать при оценке прогнозов осадков с высоким пространственным разрешением характеристику ETS, рассчитываемую с использованием соотношений (7), (8), но при несколько измененном способе заполнения табл. 1:

A_{11} (успешные прогнозы явления) – явление наблюдалось в точке, при этом было спрогнозировано или в этой же точке, или в пределах окружности с центром в данной точке и заданной радиусом. Также если в какой-то ячейке явление предсказывалось, то прогноз считался верным в том случае, если явление наблюдалось в окружности с заданным радиусом;

A_{12} (ложные тревоги) – явление прогнозировалось в точке, но ни в ней, ни в окружности заданного радиуса R не наблюдалось;

A_{21} (непредсказанные события) – явление наблюдалось в ячейке, но ни в ней, ни в окружности радиуса R не прогнозировалось;

A_{22} (правильный прогноз отсутствия явления) – явление не наблюдалось и не прогнозировалось в ячейке.

Целесообразным представляется расчет по заполненной таким образом таблице не только ETS, а и других характеристик: POD, FAR, PSS, HSS и др. При этом очевидно, что при увеличении R значения A_{11} увеличиваются за счет уменьшения A_{12} и A_{21} .

В [37] рассматривается использование такой величины, как Fractions Skill Score (FSS), которая служит для сравнения прогностического и наблюдаемого покрытия области осадками. Предлагается разделять рассматриваемую область на подобласти (пусть их число будет N), для каждой из которых рассчитывать доли покрытия рассчитанными (P_{fct}) и наблюдаемыми (P_{obs}) осадками как отношение числа ячеек с осадками к общему числу ячеек в рассматриваемой подобласти. FSS основана на вариации Brier skill score, используемой при оценке вероятностных прогнозов погоды:

$$FBS = \frac{1}{N} \sum_N (P_{fct} - P_{obs})^2. \quad (13)$$

Здесь FBS – Fractional Brier Score. FBS трансформируется в положительно определенную FSS делением ее на FBS для случайного прогноза:

$$FSS = 1 - \frac{FBS}{\frac{1}{N} \sum_N (P_{fct}^2 + P_{obs}^2)}. \quad (14)$$

FSS находится в диапазоне от 0 (полностью несовпавший прогноз) до 1 для идеально точного прогноза. Целесообразно выбирать неперекрывающиеся подобласти для расчета FSS (к примеру, прямоугольники в координатах рассматриваемой сетки – на рис. 2 показано синим пунктиром), в то время как при заполнении табл. 1, с целью более удобной интерпретации результатов, имеет смысл рассматривать ячейки сетки, находящиеся на расстоянии не более R (т. е. рассматривать окружности, см. рис. 2 а).

В [37] показано значение FSS, выше которого прогнозы могут считаться полезными (т. е. лучше, чем однородно распределенный прогноз с наблюдаемым покрытием области расчета осадками f_{obs}):

$$FSS_{\text{use}} = 0.5 + \frac{f_{\text{obs}}}{2}. \quad (15)$$

При этом наименьший масштаб, на котором FSS превышает FSS_{use} , может рассматриваться как «полезный масштаб» полученного прогноза.

FSS, рассчитываемый (и сравниваемый с FSS_{use}) для отдельных прогнозов, служит характеристикой того, насколько удачно восстанавливается пространственная структура поля явления. FSS, рассчитываемый по данным серии прогнозов, в определенной степени показывает – насколько удачно прогностическая система воспроизводит временной ход крупномасштабных полей явления.

Однако в [37] рассматриваются прогнозы при отсутствии систематических ошибок ($\text{BIASQ} = 0$) в прогнозе частоты явления. При наличии систематических ошибок (например, завышении площади областей, занятых осадками) FSS резко ухудшается, даже если прогноз и выглядит полезным. Ввиду этого на данном этапе работ в ФГБУ «ЦАО» FSS рассматривается как вспомогательная метрика.

3. Использование пространственной оценки качества прогнозов для подготавливаемых в ФГБУ «ЦАО» сверхкраткосрочных прогнозов погоды

С 2015 года в ФГБУ «ЦАО» проводятся эксперименты с опытной системой анализа и сверхкраткосрочного прогноза погоды с использованием численной негидростатической прогностической модели WRF [20, 36], пакета усвоения данных WRF Data Assimilation в режиме 3D-Var [21, 41], технологии циклического даунскейлинга, разработанной и представленной в [8, 9] и системы анализа качества прогнозов с использованием данных радарного зондирования [14].

Внешняя и вложенная области расчета, используемые в численных экспериментах, [14, рис. 1], имеют шаг сетки 9 и 3 км.

Оценка качества численного прогноза по модели WRF с высоким пространственным разрешением проводилась по радарным данным в специальной системе анализа, разработанной в ФГБУ «ЦАО» на базе Веб-ГИС «МЕТЕОРАД» для оценки основных вторичных (метеорологических) продуктов (карт) ДМРЛ: высоты ВГО, интенсивности осадков R, накопленной суммы осадков за один час Q1, явлений погоды, связанных с облачностью и осадками (табл. 4). Эти продукты рассчитываются в результате обработки данных радарных наблюдений с использованием пакета программного обеспечения вторичной обработки (ПО ВОИ) «ГИМЕТ-2010» [6; 11].

Таблица 4. Кодирование явлений погоды в ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» [6]
Table 4. Coding of weather events in "GIMET-2010" software [6]

| Код явления | Явление погоды |
|-------------|--|
| 1 | Облачность верхнего и среднего яруса |
| 2 | Слоистая облачность |
| 3 | Обложные слабые осадки |
| 4 | Обложные умеренные осадки |
| 5 | Обложные сильные осадки |
| 6 | Кучевая облачность |
| 7 | Ливневые слабые осадки |
| 8 | Ливневые умеренные осадки |
| 9 | Ливневые сильные осадки |
| 10 | Гроза с вероятностью 30–70 % |
| 11 | Гроза с вероятностью 71–90 % |
| 12 | Гроза с вероятностью >90 % |
| 13 | Град слабый |
| 14 | Град умеренный |
| 15 | Град сильный |
| 16 | Гроза со шквалом слабым (15–20 м/с) |
| 17 | Гроза со шквалом умеренным (20–25 м/с) |
| 18 | Гроза со шквалом сильным (>25 м/с) |
| 19 | Смерч |

Для расчета перечисленных карт в состав выходной продукции модели WRF включаются поля радиолокационной отражаемости Z , которые затем обрабатываются в ПО ВОИ, аналогично данным наблюдений реальных радиолокаторов.

Анализ качества прогноза проводится путем сопоставления карт (цифровых значений) модельного прогноза WRF с заблаговременностью до 4–5 ч и наблюдений сети ДМРЛ Росгидромета. Для упрощения процедур оценки карты модельного прогноза готовятся в координатной проекции вычислительных сеток модели WRF, но с пространственным разрешением 1 км. При оценке прогнозов на сетках 3×3 или 9×9 км данные осредняются (осадки) или выбираются максимальные значения (цифры кода явления и высота верхней границы облачности).

Использование собственного программного обеспечения для оценки модельных полей представляется авторам более эффективным, чем использование для этих целей свободно распространяемых систем оценки качества прогнозов, например Model Evaluation Tool (MET) [35] ввиду более удобной интеграции программ в технологии оперативной работы ФГБУ «ЦАО».

В табл. 4 из идентифицируемых по радарным данным явлений погоды можно выделить несколько групп явлений одного типа с возрастающей интенсивностью. Явления с кодами от 1 до 5 характеризуют возрастающие степени развития слоистой облачности; явления с кодами 6–19 характеризуют возрастающую интенсивность конвективных явлений: от относительно безопасных кучевых облаков до кучево-дождевой облачности и затем особенно мощных систем глубокой конвекции, сопровождающихся градом и шквалами. Отмеченная в табл. 4 иерархия явлений облегчает анализ качества прогноза: удобно рассматривать прогнозы превышения кодов явления различных пороговых значений, подобно тому, как во многих работах (см. предыдущей раздел) рассматривается интенсивность и/или количество осадков.

Если прогнозировались слабые ливневые осадки (код 7), а по радарным данным наблюдалась гроза с вероятностью $> 90\%$ (код 12), то прогноз слабых ливневых осадков и наличия кучевой облачности (код 6) считается оправдавшимся (успешный прогноз), прогноз явлений с кодами 8–12 оказался ошибочен (непредсказанное событие), прогноз явлений с кодами > 12 также оправдался (успешный прогноз отсутствия явления) (рис. 3). Аналогично, если прогнозировалась гроза со слабым шквалом (код явления 16), а по радарным данным наблюдалась гроза с вероятностью 30–70 % (код 10), то прогноз грозы с вероятностью 30–70 % считается успешным; прогноз грозы, сопровождаемый слабым шквалом (код 16) – ошибочным (ложная тревога), прогноз отсутствия грозы, сопровождавшейся умеренным или сильным шквалом, считается успешным (отсутствие явления).

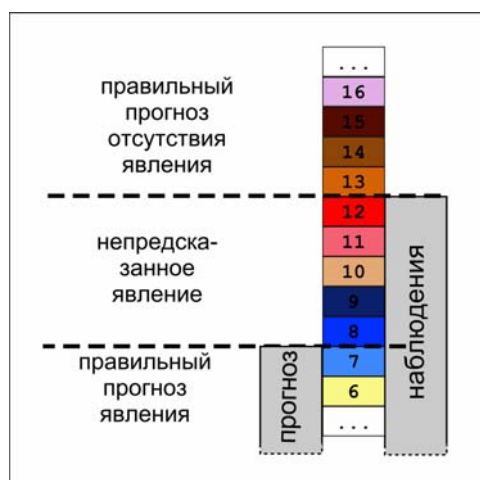


Рис. 3. Пример прогноза явлений (цифры кода прогнозируемого явления согласно табл. 4).

Fig. 3. The example of the forecast of the events (code numbers of the predicted phenomenon are given according to Table 4).

Аналогичный подход применяется при рассмотрении карт ВГО: оценивается успешность прогноза высоты ВГО выше пороговых значений, соответствующих градациям на картах в Веб-ГИС «МЕТЕОРАД»: 1) нет облачности; 2) ВГО <1 км; 3) 1–2 км; 4) >2–3 км; 5) >3–4 км; 6) >4–5 км; 7) >5–6 км; 8) >6–7 км; 9) >7–8 км; 10) >8–10 км; 11) >10–12 км; 13) >12 км.

Рассмотрим методы пространственной оценки качества прогнозов полей интенсивности и сумм осадков на примере двух погодных ситуаций: мезомасштабный конвективный комплекс [2] в районе Нижнего Новгорода 31 июля 2014 года (рис. 4) и перемещение холодного фронта по территории ЦФО 30 июля 2014 года (рис. 5).

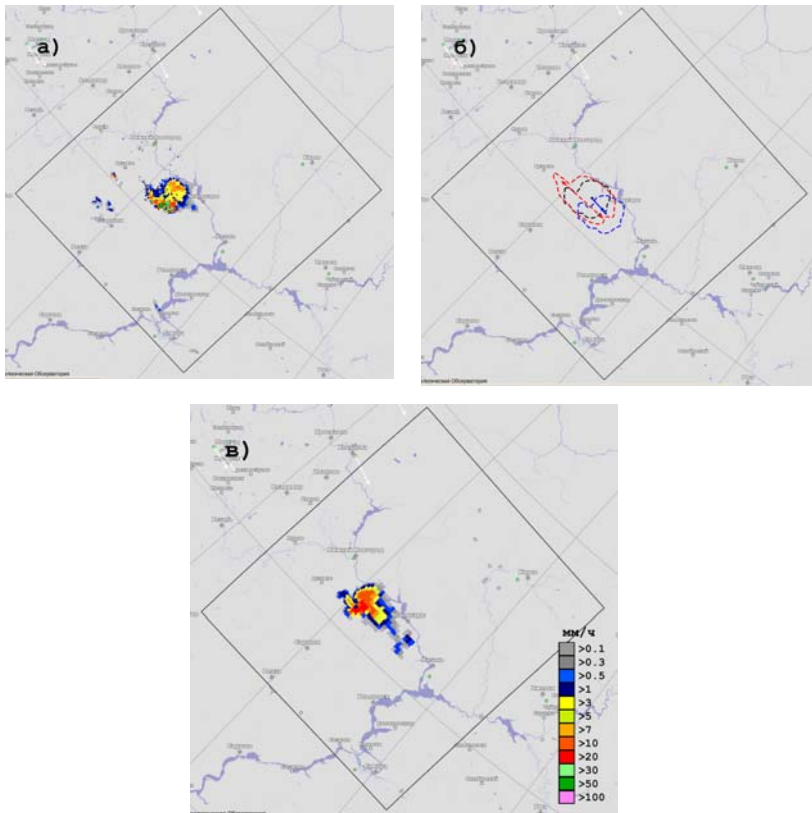


Рис. 4. Интенсивность осадков для 06 ч ВСВ 31 июля 2014 года: наблюдаемое на радаре поле (а); контуры наблюдаемого поля (черный пунктир) результаты сдвига (синий пунктир) и растяжения наблюдаемого поля (красный пунктир) (б); прогноз интенсивности осадков от 03 ч ВСВ (т. е. с заблаговременностью 3 ч) (в).

Fig. 4. Precipitation intensity for 06:00 UTC on 31 July, 2014: the field observed by the radar (a); the contours of the observed field (black dotted line) the results of the shift (blue dotted line) and of the stretching of the observed field (red dotted line) (b); the forecast of rainfall intensity from 03:00 UTC (i.e., with a lead time of 3 hours) (b).

Прямоугольной рамкой на рисунках обозначены границы областей оценки. В обоих случаях поля для рассмотрения методов оценки получаются путем искажения фактических полей, также используется прогноз WRF. Искаженные поля считаются "прогнозом", который и оценивается по наблюдавшимся полям.

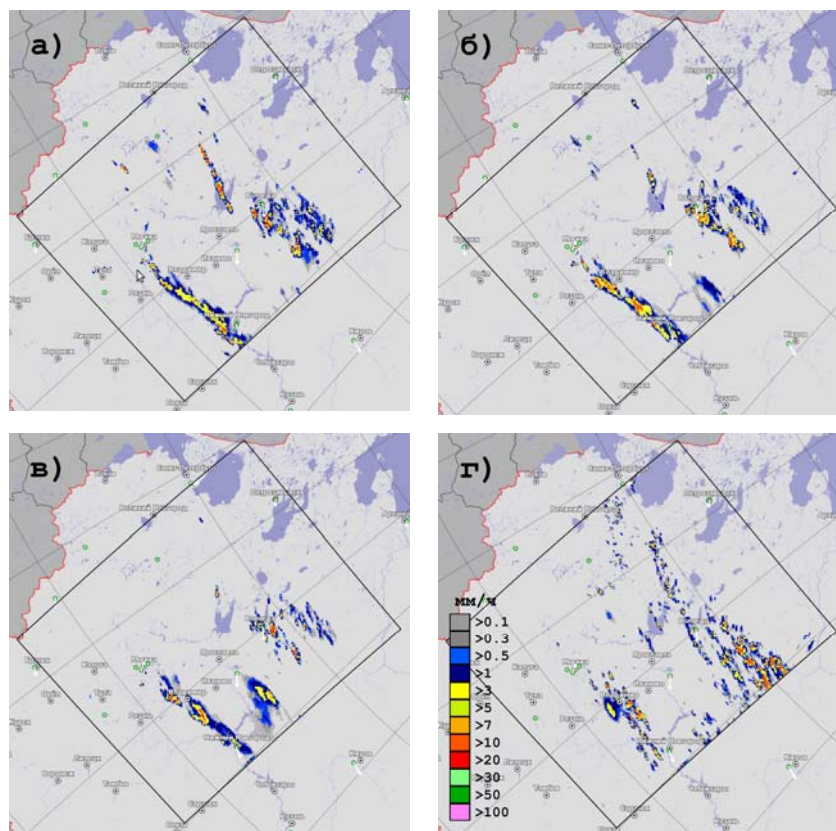


Рис. 5. Сумма осадков за период 11–12 ч ВСВ 30 июля 2014 г.: наблюдаемое на радаре поле (а); результат сдвига поля по времени на 1 час назад (т. е. сумма осадков за 10–11 ч ВСВ) (б); на 2 часа назад (т. е. сумма осадков за 9–10 ч ВСВ) (в); прогноз поля от 09 ч ВСВ на 11–12 ч ВСВ (3-й час прогноза) (г).

Fig. 5. Total precipitation for the period of 11:00-12:00 UTC on July 30, 2014: the field observed by the radar (a); the result of field shift by 1 hour ago (i.e., total precipitation for 10:00-11:00 UTC) (b); by 2 hours ago (i.e., total precipitation for 09:00-10:00 UTC) (b); the forecast of the field from 09:00 UTC for 11:00-12:00 UTC (i.e., the 3rd hour of the forecast) (d).

В ситуации с развитием мезомасштабного конвективного комплекса (МКК) наблюдаемое на данных радара поле осадков (рис. 4 а) имеет форму "запятной" размером около 250 км. Прогнозируемое положение МКК

практически совпадает с наблюдаемым, также близки и размеры. Но формы полей осадков не совпадают (рис. 4а, в). Рассматривается изменение метрик оценки качества прогноза при пространственном сдвиге наблюдаемых полей осадков, а также при растяжении МКК в 1,5 раза вдоль одной из осей (рис. 4 б).

В табл. 5 приводятся значения коэффициентов PSS и HSS (выбраны как наиболее распространенные в оперативной практике в России) при сдвиге наблюдаемых полей осадков и при различном радиусе поиска осадков с интенсивностью выше заданных пороговых значений.

Таблица 5. Пространственная оценка (PSS/HSS) интенсивности осадков для 06 ч ВСВ 31 июля 2014 года при различных искажениях наблюдаемого поля и по результатам прогноза WRF от 03 ч ВСВ 31 июля 2014 года
Table 5. Spatial verification (PSS/HSS) of precipitation intensity for 06:00 UTC on July 31, 2014 for various distortions of the observed field and based on the results of the WRF forecast from 03:00 on July 31, 2014

| Способ получения оцениваемого поля | | | Осадки (мм/ч) | Радиус поиска (км) | | | | | |
|------------------------------------|-------------|----|---------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | | | 0 | 6 | 9 | 15 | 24 | 30 |
| Искажение наблюдаемого поля | Сдвиг (км) | 9 | >1 | 0.78/0.78 | 0.96/0.96 | 1./1. | 1./1. | 1./1. | 1./1. |
| | | 18 | | 0.67/0.67 | 0.86/0.84 | 0.91/0.90 | 0.98/0.98 | 1./1. | 1./1. |
| | | 27 | | 0.56/0.56 | 0.77/0.75 | 0.83/0.82 | 0.92/0.92 | 0.99/0.99 | 1./1. |
| | | 54 | | 0.20/0.20 | 0.43/0.42 | 0.54/0.53 | 0.69/0.69 | 0.83/0.83 | 0.89/0.89 |
| | Растяжение | | | 0.90/0.73 | 0.96/0.87 | 0.96/0.90 | 0.97/0.95 | 0.98/0.97 | 0.98/0.97 |
| | Прогноз WRF | | | 0.54/0.53 | 0.74/0.73 | 0.80/0.79 | 0.89/0.89 | 0.95/0.95 | 0.96/0.97 |
| Искажение наблюдаемого поля | Сдвиг (км) | 9 | >3 | 0.72/0.72 | 0.94/0.95 | 1./1. | 1./1. | 1./1. | 1./1. |
| | | 18 | | 0.59/0.59 | 0.83/0.82 | 0.90/0.88 | 0.98/0.97 | 1./1. | 1./1. |
| | | 27 | | 0.44/0.44 | 0.71/0.70 | 0.81/0.79 | 0.91/0.89 | 0.98/0.98 | 1./1. |
| | | 54 | | 0.04/0.04 | 0.30/0.29 | 0.45/0.43 | 0.63/0.59 | 0.79/0.74 | 0.86/0.82 |
| | Растяжение | | | 0.89/0.72 | 0.97/0.89 | 0.98/0.93 | 0.98/0.97 | 0.98/0.98 | 0.98/0.98 |
| | Прогноз WRF | | | 0.39/0.38 | 0.65/0.64 | 0.75/0.74 | 0.86/0.86 | 0.94/0.94 | 0.98/0.98 |
| Искажение наблюдаемого поля | Сдвиг (км) | 9 | >10 | 0.44/0.44 | 0.91/0.89 | 1./1. | 1./1. | 1./1. | 1./1. |
| | | 18 | | 0.34/0.34 | 0.72/0.70 | 0.85/0.82 | 0.96/0.95 | 1./1. | 1./1. |
| | | 27 | | 0.18/0.18 | 0.55/0.55 | 0.69/0.69 | 0.90/0.85 | 0.96/0.96 | 1./1. |
| | | 54 | | 0.0/0.0 | 0.10/0.10 | 0.20/0.19 | 0.54/0.49 | 0.78/0.68 | 0.84/0.76 |
| | Растяжение | | | 0.70/0.56 | 0.95/0.86 | 0.97/0.90 | 0.97/0.95 | 0.97/0.98 | 0.97/0.98 |
| | Прогноз WRF | | | 0.05/0.04 | 0.22/0.20 | 0.33/0.32 | 0.52/0.53 | 0.76/0.78 | 0.89/0.89 |

При сдвиге наблюдаемых полей значение коэффициента HSS ближе к значению коэффициента PSS, в том числе и потому, что нет изменения частоты явления. Если радиус поиска явления больше сдвига (согласно оценке прогноз является "абсолютно точным"), при рассмотрении подобных оценок нужно понимать границу их применимости. При сдвиге большем, чем радиус поиска явлений, оценки определяются в том числе и пространственной изменчивостью поля.

При растяжении полей размер занятой осадками области завышается (рис. 4 б), поэтому значения коэффициентов PSS и HSS различаются более

существенно, чем при сдвиге, так как на HSS дополнительно влияет смещение частоты явления. Для данной ситуации прогноз мезомасштабной моделью WRF осадков с интенсивностью более 1 и 3 мм/час может считаться полезным ($PSS > 0,3$) и без рассмотрения окружения, прогноз осадков большой интенсивности (> 10 мм/час) без рассмотрения окружения малополезен.

На рис. 5 и в табл. 6 рассматриваются часовые суммы осадков (11–12 ч ВСВ 30 июля 2014 г.) при прохождении холодного фронта по территории ЦФО. В качестве "прогностических" рассматриваются часовые суммы осадков Q1 с временным сдвигом на 1 и 2 ч назад (т. е. наблюдавшиеся в периоды 09–10 и 10–11 ч ВСВ), т. е. инерционные прогнозы.

Таблица 6. Пространственная оценка (PSS/HSS) суммы осадков для периода 11:00-12:00 ч ВСВ 30 июля 2014 года при различных искажениях наблюдаемого поля и по результатам прогноза WRF от 09 ч ВСВ 30 июля 2014 года

Table 6. Spatial verification (PSS/HSS) of total precipitation for the period of 11:00-12:00 UTC on July 30, 2014 for various distortions of the observed field and based on the results of the WRF forecast from 09:00 UTC on July 30, 2014

| Способ получения оцениваемого поля | Осадки (мм/ч) | Радиус поиска (км) | | | | | | |
|--|---------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 0 | 6 | 9 | 15 | 24 | 30 | |
| Временной сдвиг наблюдаемого поля (часы) | 1 | >1 | 0.26/0.27 | 0.59/0.61 | 0.71/0.73 | 0.84/0.86 | 0.93/0.93 | 0.96/0.96 |
| | 2 | | 0.04/0.05 | 0.19/0.22 | 0.27/0.31 | 0.42/0.47 | 0.61/0.66 | 0.72/0.76 |
| Прогноз WRF | | | 0.04/0.05 | 0.19/0.22 | 0.27/0.31 | 0.42/0.47 | 0.61/0.66 | 0.72/0.76 |
| Временной сдвиг наблюдаемого поля (часы) | 1 | >3 | 0.14/0.14 | 0.49/0.50 | 0.64/0.66 | 0.83/0.85 | 0.92/0.94 | 0.96/0.97 |
| | 2 | | 0.01/0.01 | 0.09/0.11 | 0.15/0.19 | 0.28/0.34 | 0.49/0.56 | 0.64/0.70 |
| Прогноз WRF | | | 0.05/0.05 | 0.30/0.28 | 0.44/0.41 | 0.65/0.59 | 0.80/0.73 | 0.87/0.79 |
| Временной сдвиг наблюдаемого поля (часы) | 1 | >10 | 0.05/0.05 | 0.22/0.22 | 0.33/0.34 | 0.51/0.52 | 0.69/0.74 | 0.75/0.81 |
| | 2 | | 0.00/0.01 | 0.02/0.03 | 0.03/0.04 | 0.06/0.08 | 0.14/0.19 | 0.23/0.30 |
| Прогноз WRF | | | 0.0/0.0 | 0.0/0.0 | 0.01/0.01 | 0.04/0.04 | 0.07/0.07 | 0.17/0.17 |

Основное отличие этих «прогностических» полей от реального поля – различная интенсивность конвекции. В прогнозе WRF (3-й час прогноза от 09 ч ВСВ) недооценивается конвекция на самом фронте (в районе Владимира – Нижнего Новгорода), но переоценивается конвекция несколько восточнее Вологды. Прогноз часовых сумм осадков > 10 мм по модели WRF оказывается малоуспешным, прогноз сумм > 1 мм и > 3 мм по значениям коэффициентов PSS и HSS находится между инерционными прогнозами с заблаговременностью 1 и 2 часа.

В табл. 7 и 8 приводятся осредненные оценки качества работы различных вариантов системы усвоения радарных данных/циклического даунскейлинга [7, 8] для области ($53\text{--}62^\circ$ с. ш., $30\text{--}42^\circ$ в. д.), полностью

расположенной во вложенной области расчета WRF с шагом сетки 3 км. Без усвоения радарных данных (т. е. только при коррекции состояния моделируемой атмосферы по крупномасштабным данным NCEP в сроки 00, 06, 12 и 18 ч ВСВ) система систематически недооценивает количество выпадающих осадков – почти в 2 раза. В вариантах 1 и 2 усвоение данных отличается используемыми радиусами корреляции ошибок первого приближения (вариант 2 – более короткие радиусы).

Таблица 7. Пространственная оценка (PSS/HSS) суммы осадков за 3-й час прогноза по данным радара для периода 14-31 июля 2014 г.

Table 7. Spatial verification (PSS/HSS) of total precipitation for the 3rd hour of the forecast based on radar data for the period of July 14-31, 2014

| Эксперимент | Осадки (мм/ч) | Радиус поиска (км) | | | | | | |
|-----------------------|---------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | 0 | 6 | 9 | 15 | 24 | 30 | 45 |
| Без усвоения данных | >0 | 0.15/0.19 | 0.29/0.35 | 0.34/0.41 | 0.42/0.50 | 0.50/0.59 | 0.54/0.63 | 0.61/0.70 |
| | >1 | 0.05/0.07 | 0.18/0.23 | 0.24/0.31 | 0.35/0.43 | 0.45/0.55 | 0.51/0.61 | 0.61/0.71 |
| | >3 | 0.02/0.03 | 0.11/0.14 | 0.16/0.21 | 0.26/0.33 | 0.36/0.44 | 0.42/0.51 | 0.52/0.62 |
| | >5 | 0.01/0.02 | 0.07/0.10 | 0.12/0.16 | 0.20/0.26 | 0.30/0.38 | 0.36/0.45 | 0.48/0.58 |
| | >10 | 0.01/0.01 | 0.04/0.05 | 0.07/0.10 | 0.12/0.17 | 0.19/0.26 | 0.24/0.32 | 0.36/0.46 |
| Вариант 1 | >0 | 0.18/0.21 | 0.32/0.37 | 0.38/0.44 | 0.46/0.53 | 0.54/0.62 | 0.58/0.66 | 0.64/0.73 |
| | >1 | 0.09/0.12 | 0.25/0.30 | 0.33/0.39 | 0.45/0.51 | 0.56/0.63 | 0.62/0.69 | 0.71/0.78 |
| | >3 | 0.04/0.05 | 0.17/0.19 | 0.24/0.27 | 0.36/0.40 | 0.48/0.53 | 0.55/0.60 | 0.66/0.72 |
| | >5 | 0.02/0.03 | 0.11/0.13 | 0.17/0.20 | 0.28/0.32 | 0.40/0.44 | 0.46/0.52 | 0.59/0.65 |
| | >10 | 0.01/0.01 | 0.05/0.06 | 0.08/0.10 | 0.14/0.18 | 0.22/0.27 | 0.28/0.34 | 0.40/0.47 |
| Вариант 2 | >0 | 0.18/0.22 | 0.33/0.38 | 0.38/0.44 | 0.46/0.54 | 0.54/0.62 | 0.58/0.66 | 0.65/0.73 |
| | >1 | 0.09/0.11 | 0.24/0.29 | 0.32/0.37 | 0.44/0.50 | 0.55/0.62 | 0.61/0.68 | 0.71/0.77 |
| | >3 | 0.04/0.05 | 0.15/0.18 | 0.22/0.25 | 0.33/0.38 | 0.46/0.51 | 0.53/0.58 | 0.64/0.70 |
| | >5 | 0.02/0.02 | 0.10/0.12 | 0.15/0.18 | 0.26/0.30 | 0.37/0.43 | 0.45/0.50 | 0.58/0.64 |
| | >10 | 0.01/0.01 | 0.05/0.07 | 0.08/0.10 | 0.14/0.17 | 0.22/0.27 | 0.28/0.34 | 0.41/0.48 |
| Вариант 2 + коррекция | >0 | 0.21/0.24 | 0.35/0.40 | 0.41/0.47 | 0.49/0.56 | 0.56/0.64 | 0.60/0.68 | 0.66/0.75 |
| | >1 | 0.12/0.14 | 0.29/0.32 | 0.37/0.41 | 0.49/0.53 | 0.60/0.65 | 0.65/0.71 | 0.74/0.79 |
| | >3 | 0.06/0.07 | 0.21/0.22 | 0.28/0.29 | 0.41/0.42 | 0.53/0.55 | 0.60/0.63 | 0.70/0.73 |
| | >5 | 0.04/0.04 | 0.15/0.15 | 0.21/0.22 | 0.32/0.34 | 0.44/0.46 | 0.51/0.53 | 0.63/0.66 |
| | >10 | 0.01/0.01 | 0.07/0.08 | 0.10/0.12 | 0.18/0.21 | 0.27/0.31 | 0.33/0.38 | 0.45/0.51 |

Можно отметить, что согласно стационарным оценкам (табл. 8) вариант 2 предпочтительнее при прогнозе осадков с интенсивностями $R > 3$ мм/12ч, при этом менее интенсивные осадки предпочтительнее для варианта 1. Но табл. 7, в которой рассматриваются часовые суммы осадков, не показывает какого-либо преимущества второго варианта при всех рассматриваемых радиусах поиска и интенсивностях осадков. В результате настоящего исследования можно сделать вывод о том, что один из вариантов усвоения данных подготавливает поля, которые лучше при осреднении результатов по 12-часовым интервалам, но хуже при рассмотрении результатов часовых прогнозов.

Таблица 8. Оценки (PSS/HSS) рассчитанных 12-часовых сумм осадков по данным синоптических станций для периода 14–31 июля 2014 г. (53–62° с. ш., 30–42° в. д.)

Table 8. Skill scores (PSS/HSS) of the calculated 12-hour total precipitation based on weather station data for the period of July 14–31, 2014 (53–62° N, 30–42° E)

| Эксперимент | Осадки >0 мм/12ч | | Осадки ≥ 3 мм/12ч | | Отношение количества прогнозируемых и наблюдаемых осадков |
|-----------------------|------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|---|
| | PSS/HSS | $N_{\text{FOR}}/N_{\text{OBS}}$ | PSS/HSS | $N_{\text{FOR}}/N_{\text{OBS}}$ | |
| Без усвоения данных | 0.52/0.41 | 671/411 | 0.16/0.22 | 87/180 | 0.52 |
| Вариант 1 | 0.60/0.44 | 763/411 | 0.31/0.35 | 138/180 | 1.05 |
| Вариант 2 | 0.57/0.40 | 784/411 | 0.38/0.40 | 161/180 | 0.99 |
| Вариант 2 + коррекция | 0.64/0.42 | 901/411 | 0.53/0.46 | 239/180 | 2.05 |

Примечание. $N_{\text{FOR}}/N_{\text{OBS}}$ – предсказанное и наблюдаемое число событий; красным цветом показаны лучшие показатели, синим - наихудшие.

При добавлении предварительной коррекции поля осадков и облачности по радарным данным перед использованием процедуры 3D-Var, результаты почти по всем приводимым "показателям", особенно при повышении рассматриваемой интенсивности осадков, улучшаются, но путем существенного завышения количества осадков (примерно в 2 раза). Отметим, что в рассматриваемой области в период расчетов 12-часовые периоды без осадков составляли 89 % случаев, с осадками более 3 мм/12ч – 4,8 % случаев. В связи с этим завышение количества осадков почти в 2 раза не было «критично» (см. раздел 1) для коэффициентов PSS и HSS.

Заключение

На примере проводимых в ФГБУ «ЦАО» работ по усвоению данных радаров и сверхкраткосрочному прогнозу погоды, рассматриваются современные, в основном применяемые за рубежом, способы оценки качества прогнозов осадков (интенсивности и сумм) и прогноза явлений погоды с высоким пространственным разрешением. Подготовленная система оценки связана с Веб-ГИС «МЕТЕОРАД» и позволяет сопоставлять прогнозируемое поле и аналогичное поле по радарным данным.

Рассмотрен прогноз характеристик осадков. В настоящее время проводится оценка по радиолокационным данным полей модели атмосферы WRF, в связи с чем перед расчетом показателей качества прогнозов подготавливаются радарные данные в используемой проекции WRF (но с более высоким пространственным разрешением). Для оценки качества других систем краткосрочного (сверхкраткосрочного) прогноза погоды/наукастинга (COSMO-Ru [15, 16], STEPS [23, 38]) с использованием

Веб-ГИС «МЕТЕОРАД» потребуется согласовать картографические проекции прогнозов и радарных данных.

Список литературы

1. Багров Н.А. К вопросу об оценке гидрометеорологических прогнозов // Метеорология и гидрология. 1953. № 6. С. 13-16.
2. Вельтищев Н.Ф. Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование: сб. лекций. Женева, 1988. 136 с.
3. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Эксперименты по усвоению радиолокационной отражаемости в модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2012. № 3. С. 5-19.
4. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Эксперименты по численному моделированию интенсивной конвекции // Метеорология и гидрология. 2008. № 9. С. 30-44.
5. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д., Павлюков Ю.Б. Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF // Метеорология и гидрология. 2011. № 1. С. 5-18.
6. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. М.: Росгидромет, 2017. 127 с.
7. Зарипов Р.Б. Обзор современных методов повышения детализации метеорологических полей // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата, 2010. Т. 1, № 1. С. 4-16.
8. Зарипов Р.Б., Коновалов И.Б., Глазкова А.А. Расчет концентраций загрязняющих веществ с использованием модели атмосферы WRF ARW и химико-транспортной модели CHIMERE // Метеорология и гидрология. 2013. № 12. С. 52-67.
9. Зарипов Р.Б., Мартынова Ю.В., Крупчатников В.Н., Петров А.П. Система анализа состояния атмосферы в сибирском регионе с использованием модели WRF-ARW и трехмерного вариационного усвоения данных WRF 3D-Var // Метеорология и гидрология. 2016. № 12. С. 33-43.
10. Кисельникова В.З. Объектно-ориентированная оценка качества прогноза осадков // Метеорология и гидрология. 2013. № 4. С. 5-11.
11. Методические указания по производству метеорологических радиолокационных наблюдений на ДМРЛ-С на сети Росгидромета. СПб., 2013. 137 с.
12. Методические указания. РД № 52.27.284-91. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. Комитет Гидрометеорологии при Кабинете министров СССР. М., 1991. 149 с.
13. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. РД 52.27.724-2009. 62 с.
14. Павлюков Ю.Б., Зарипов Р.Б., Лукьянов А.Н., Шестакова А.А., Шумилин А.А., Травов А.В. Оценка информативности радиолокационных данных при анализе состояния атмосферы в Московском регионе // Метеорология и гидрология. 2017. № 6. С. 5-21.
15. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В. и др. Мезомасштабная модель COSMO-Ru2 и результаты ее оперативных испытаний // Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. Информационный сборник № 44. 2017. С. 25-55.
16. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М. и др. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 58-70.
17. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р., Горлач И.А. Динамическая верификация численных моделей: анализ модельных механизмов генерации вертикальных движений и осадков // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада лтд, 2009. С. 289-312.

18. *Ahijevych D., Gilleland E., Brown B., Ebert E.* Application of spatial verification methods to idealized and NWP-gridded precipitation forecasts // *Wea. Forecast.* 2009. Vol. 24. P. 1485-1497.
19. *Alexander G.D., Weinman J.A., Karyampudi V.M., Olson W.S., Lee A.C.* The effect of assimilation rain rates derived from satellites and lightning on forecasts on the 1993 Superstorm // *Mon. Wea. Rev.* Vol. 127. P. 1433-1457.
20. ARW Version 3 modeling system user's guide. July 2012. URL: www.mmm.ucar.edu, 383 p.
21. *Barker D., Huang X.-Y., Liu Z. et al.* The Weather Research and Forecasting model's community variational/ensemble data assimilation system: WRFDA // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2012. Vol. 93, no 6. P. 831-843.
22. *Bengtsson L., Andrae U., Aspeliu T., Batrak Y. et al.* The HARMONIE-AROME model configuration in the ALADIN-HIRLAM NWP System // *Mon. Wea. Rev.* 2017. Vol. 145, no. 5. P. 1919-1935.
23. *Bowler N., Piercie C.E., Seed A.W.* 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.
24. *Clark A.J., Gallus W.A.Jr., Weisman M.L.* Neighborhood-based verification of precipitation forecasts from convection-allowing NCAR WRF model simulation and the operational NAM // *Wea. Forecast.* 2010. Vol. 25. P. 1495-1509.
25. *Davies C., Brown B., Bullock R.* Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Methodology and application to mesoscale rain areas // *Mon. Wea. Rev.* 2006. Vol. 134. P. 1772-1784.
26. *Davies C., Brown B., Bullock R.* Object-based verification of precipitation forecasts. Part II: Methodology and application to mesoscale rain areas // *Mon. Wea. Rev.* 2006. Vol. 134. P. 1785-1795.
27. *Davies C., Brown B., Bullock R., Halley-Gotway J.* The method for object-based diagnostic evaluation (MODE) applied to numerical forecasts from 2005 NSSL/SPC Spring Program // *Wea. Forecast.* Vol. 24. P. 1252-1267.
28. *Dickinson S., Brown R.* A study of near-surface winds in marine cyclones using multiple satellite sensors // *Meteo. Appl.* 2008. Vol. 15. P. 51-64.
29. *Dorninger M., Mittermaier M.P., Gilleland E., Ebert E.E., Brown B.G., Wilson L.J.* MesoVICT: Mesoscale Verification Inter-Comparison over complex terrain. NCAR technical notes (NCAR/TN-505+STR), 2013. 23 p.
30. *Ebert E.E.* Neighborhood verification: a strategy for rewarding close forecasts // *Wea. Forecast.* 2009. Vol. 24. P. 1498-1510.
31. *Gilleland E., Ahijevych D.A., Brown B.G., Casati B., Ebert E.E.* Intercomparison of spatial forecast verification methods // *Wea. Forecast.* 2009. Vol. 34. P. 1416-1430.
32. *Gilleland E., Ahijevych D.A., Brown B.G., Ebert E.E.* Verifying forecasts spatially // *BAMS.* 2010. Vol. 91. P. 1365-1373.
33. *Jolliffe I.T., Stephenson D.B.* Forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science // John Wiley & Sons Ltd. 2003. 240 p.
34. *Kurowski M.J., Wojcik D.K., Ziemianski M.Z., Rosa B., Piotrowski Z.P.* Convection-permitting regional weather modeling with COSMO-EULAG: Compressible and anelastic solution for a typical westerly flow over the Alps // *Mon. Wea. Rev.* 2016. Vol. 144, no 5. P. 1961-1982.
35. Model Evaluation Tools Version 7.0 (METv7.0) User's guide. Marth 2018, 407 p. URL: <https://dtcenter.org/met/users/docs/overview.php>
36. *Powers G.P., Klemp J.B., Skamarock W.C., Davis C.A. et al.* The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and future Directions // *BAMS.* 2017. Vol. 98, no 8. P. 1717-1737.
37. *Roberts N.M., Lean H.W.* Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events // *Mon. Wea. Rev.* 2008. Vol. 136. P. 78-97.

38. Seed A., Pierce C.E., Norman K. Formulation and evaluation of a scale decomposition-based stochastic precipitation nowcast scheme // *Water Resources Research*. 2013. Vol. 49(10). P. 6624-6641.
39. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.X., Wang W., Powers J.G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR/TN-475+STR, NCAR Technical Note, June 2008.
40. Sun J. Use of NWP for nowcasting convective precipitation: recent progress and challenges // *BAMS*. 2014. Vol. 95, no 3. P. 409-426. doi:10.1155/2013/815910
41. Sun J., Wang H. WRF-ARW Variational Storm-Scale Data Assimilation: Current capabilities and future developments // *Adv. Meteorol.* 2013. DOI 10.1155/2013/815910. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/815910>
42. Weisman M. L., Davis C., Wang W., Manning K.W., Klemp J.B. Experiences with 0–36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW model // *Wea. Forecasting*. 2008. Vol. 23. P. 407-437.
43. Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences. Academic Press, 1995. 467 p.
44. WWRP/WGNE Joint working group on forecast verification research. Forecast Verification: Issues, Methods and FAQ. URL: <http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/#ROC>.

References

1. Bagrov N.A. K voprosu ob otsenke gidrometeorologicheskikh prognozov. *Meteorologiya i gidrologiya*. 1953, no. 6, pp. 13-16 [in Russ.].
2. Vel'tishchev N.F. Mezometeorologiya i kratkosrochnoe prognozirovaniye: sb. lektsii. Zheneva, 1988, 136 p. [in Russ.].
3. Vel'tishchev N.F., Zhupanov V.D. Eksperimenty po usvoeniyu radiolokatsionnoi otrazhaemosti v modeli WRF-ARW [Experiments on the radar reflectivity data assimilation in the WRF-ARW model]. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, no. 3, pp. 149-158.
4. Vel'tishchev N.F., Zhupanov V.D. Eksperimenty po chislennomu modelirovaniyu intensivnoi konveksii [Experiments on numerical modeling of intense convection]. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2008, vol. 33, no. 9, pp. 560-569.
5. Vel'tishchev N.F., Zhupanov V.D., Pavlyukov Yu.B. Kratkosrochniy prognoz sil'nykh osadkov i vetra s pomoshch'yu razreshayushchikh konveksiyu modelei WRF [Short-range forecast of heavy precipitation and strong wind using the convection-allowing WRF models]. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 36, no. 1, pp. 1-10.
6. Vremennyye metodicheskie ukazaniya po ispol'zovaniyu informatsii doplerovskogo meteorologicheskogo radiolokatora DMRL-S v sinopticheskoi praktike. Moscow: Roshydromet, 2017, 127 p. [in Russ.].
7. Zaripov R.B. Obzor sovremennykh metodov povysheniya detalizatsii meteorologicheskikh polei [A review of modern methods for spacial detailing of meteorological fields]. *Dinamika okruzhayushchei sredy i global'nye izmeneniya klimata* [Environmental Dynamics and Global Climate Change], 2010, vol. 1, no. 1, pp. 4-16 [in Russ.].
8. Zaripov R.B., Kononov I.B., Glazkova A.A. Raschet kontsentratsii zagryaznyayushchikh veshchestv s ispol'zovaniem modeli atmosfery WRF ARW i khimiko-transportnoi modeli CHIMERE [Modeling the concentration of pollutants using the WRF-ARW atmospheric model and CHIMERE chemistry transport model]. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 12, pp. 828-839.
9. Zaripov R.B., Martynova Yu.V., Krupchatnikov V.N., Petrov A.P. Sistema analiza sostoyaniya atmosfery v sibirskom regione s ispol'zovaniem modeli WRF-ARW i trekhmernogo variatsionnogo usvoeniya dannykh WRF 3D-Var [Atmosphere data assimilation system for the Siberian region with the WRF-ARW model and three-dimensional variational analysis WRF 3D-Var]. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2016, vol. 41, no. 11-12, pp. 808-815 [in Russ.].
10. Kisel'nikova V.Z. Ob'ektno-orientirovannaya otsenka kachestva prognoza osadkov [Object-based evaluation of precipitation forecast quality]. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 4, pp. 217-221.

11. Metodicheskie ukazaniya po proizvodstvu meteorologicheskikh radiolokatsionnykh nablyudeni na DMRL-S na seti Rosgidrometa. Saint-Petersburg, 2013. 137 p. [in Russ].

12. Metodicheskie ukazaniya. RD № 52.27.284-91. *Provedenie proizvodstvennykh (operativnykh) ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh metodov gidrometeorologicheskikh i geliogeofizicheskikh prognozov*. Moscow, 1991, 149 p. [in Russ].

13. Nastavlenie po kratkosrochnym prognozam pogody obshchego naznacheniya. 62 p. RD 52.27.724-2009. [in Russ].

14. Pavlyukov Yu.B., Zaripov R.B., Luk'yanov A.N., Shestakova A.A., Shumilin A.A., Travov A.V. Otsenka informativnosti radiolokatsionnykh dannykh pri analize sostoyaniya atmosfery v Moskovskom regione [The impact of radar data assimilation on atmosphere state analysis in the Moscow region]. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 6, pp. 357-368.

15. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Bagrov A.N., Blinov D.V. i dr. Mezomasshtabnaya model' COSMO-Ru2 i rezul'taty ee operativnykh ispytaniy. *Rezul'taty ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*. Informatsionnyi sbornik № 44, 2017, pp. 25-55 [in Russ].

16. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M. et al. Sistema COSMO-Ru negidrostaticheskogo mezomasshtabnogo kratkosrochnogo prognoza pogody Gidromettsentra Rossii: vtoroi etap realizatsii i razvitiya [The COSMO-Ru system of nonhydrostatic mesoscale short-range weather forecasting of the Hydrometcenter of Russia: The second stage of implementation and development]. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 6, pp. 400-410.

17. Shakina N.P., Skriptunova E.N., Ivanova A.R., Gorlach I.A. Dinamicheskaya verifikatsiya chislennykh modelei: analiz model'nykh mekhanizmov generatsii vertikal'nykh dvizhenii i osadkov. *80 let Gidromettsentru Rossii*. Moscow: Triada ltd, 2009, pp. 289-312 [in Russ].

18. Ahijevych D., Gilleland E., Brown B., Ebert E. Application of spatial verification methods to idealized and NWP-gridded precipitation forecasts. *Wea. Forecast*, 2009, vol. 24, pp. 1485-1497.

19. Alexander G.D., Weinman J.A., Karyampudi V.M., Olson W.S., Lee A.C. The effect of assimilation rain rates derived from satellites and lightning on forecasts on the 1993 Superstorm. *Mon. Wea. Rev.*, vol. 127, pp. 1433-1457.

20. ARW Version 3 modeling system user's guide. July 2012, available at: www.mmm.ucar.edu, 383 p.

21. Barker D., Huang X.-Y., Liu Z. et al. The Weather Research and Forecasting model's community variational/ensemble data assimilation system: WRFDA. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2012, vol. 93, no. 6, pp. 831-843.

22. Bengtsson L., Andrae U., Aspeli T., Batrak Y. et al. The HARMONIE-AROME model configuration in the ALADIN-HIRLAM NWP System. *Mon. Wea. Rev.*, 2017, vol. 145, no. 5, pp. 1919-1935.

23. Bowler N., Pierce C.E., Seed A.W. 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.

24. Clark A.J., Gallus W.A.Jr., Weisman M.L. Neighborhood-based verification of precipitation forecasts from convection-allowing NCAR WRF model simulation and the operational NAM. *Wea. Forecast*. 2010, vol. 25, pp. 1495-1509.

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

26. Davies C., Brown B., Bullock R. Object-based verification of precipitation forecasts. Part II: Methodology and application to mesoscale rain areas. *Mon. Wea. Rev.*, 2006, vol. 134, pp. 1785-1795.

27. Davies C., Brown B., Bullock R., Halley-Gotway J. The method for object-based diagnostic evaluation (MODE) applied to numerical forecasts from 2005 NSSL/SPC Spring Program. *Wea. Forecast.*, vol. 24, pp. 1252-1267.

28. Dickinson S., Brown R. A study of near-surface winds in marine cyclones using multiple satellite sensors. *Meteo. Appl.*, 2008, vol. 15, pp. 51-64.

29. Dorninger M., Mittermaier M.P., Gilleland E., Ebert E.E., Brown B.G., Wilson L.J. MesoVICT: Mesoscale Verification Inter-Comparison over complex terrain. NCAR technical notes (NCAR/TN-505+STR), 2013, 23 p.
30. Ebert E.E. Neighborhood verification: a strategy for rewarding close forecasts. *Wea. Forecast.*, 2009, vol. 24, pp. 1498-1510.
31. Gilleland E., Ahijevych D.A., Brown B.G., Casati B., Ebert E.E. Intercomparison of spatial forecast verification methods. *Wea. Forecast.*, 2009, vol. 34, pp. 1416-1430.
32. Gilleland E., Ahijevych D.A., Brown B.G., Ebert E.E. Verifying forecasts spatially. *BAMS*, 2010, vol. 91, pp. 1365-1373.
33. Jolliffe I.T., Stephenson D.B. Forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science. *John Wiley & Sons Ltd*, 2003, 240 p.
34. Kurowski M.J., Wojcik D.K., Ziemianski M.Z., Rosa B., Piotrowski Z.P. Convection-permitting regional weather modeling with COSMO-EULAG: Compressible and anelastic solution for a typical westerly flow over the Alps. *Mon. Wea. Rev.*, 2016, vol. 144, no 5, pp. 1961-1982.
35. Model Evaluation Tools Version 7.0 (METv7.0) User's guide. Marth 2018, 407 p., available at: <https://dtcenter.org/met/users/docs/overview.php>
36. Powers G.P., Klemp J.B., Skamarock W.C., Davis C.A. et al. The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and future Directions. *BAMS*, 2017, vol. 98, no 8, pp. 1717-1737.
37. Roberts N.M., Lean H.W. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events. *Mon. Wea. Rev.*, 2008, vol. 136, pp. 78-97.
38. Seed A., Pierce C.E., Norman K. Formulation and evaluation of a scale decomposition-based stochastic precipitation nowcast scheme. *Water Resources Research*, 2013, vol. 49(10), pp. 6624-6641.
39. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.X., Wang W., Powers J.G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR/TN-475+STR, NCAR Technical Note, June 2008.
40. Sun J. Use of NWP for nowcasting convective precipitation: resent progress and challenges. *BAMS*, 2014, vol. 95, no. 3, pp. 409-426, doi:10.1155/2013/815910
41. Sun J., Wang H. WRF-ARW Variational Storm-Scale Data Assimilation: Current capabilities and future developments. *Adv. Meteorol.*, 2013, 13 p. Article ID 815910 <http://dx.doi.org/10.1155/2013/815910>
42. Weisman M.L., Davis C., Wang W., Manning K.W., Klemp J.B. Experiences with 0–36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW model. *Wea. Forecasting*, 2008, vol. 23, pp. 407-437.
43. Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences. Academic Press, 1995. 467 p.
44. WWRP/WGNE Joint working group on forecast verification research. Forecast Verification: Issues, Methods and FAQ. available at: <http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/#ROC>.

Поступила в редакцию 22.05.2018 г.

Received by the editor 22.05.2018.