

УДК 551.509.313+551.509.324.2+551.508.85

Наукастинг метеорологических параметров и опасных явлений: опыт реализации и перспективы развития

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

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

Малый временной интервал наукастинга (до 2–6 ч) и наличие пространственно-временной инерции погодных систем делают возможным прогнозирование с помощью статистической экстраполяции текущей погоды, при этом прогноз на последующие сроки – с растущим влиянием нелинейности – все больше базируется на гидродинамическом моделировании. В статье обсуждаются основные подходы к решению задач наукастинга, рассматриваются технологии, используемые в Гидрометцентре России, и формулируются соображения о перспективах мировых и отечественных разработок в данной области прогнозирования.

Ключевые слова: наукастинг, сверхкраткосрочный прогноз погоды, статистическое и гидродинамическое моделирование, комбинированные прогнозы, радиолокационные оценки осадков, бесшовное прогнозирование, метеорологическое обеспечение Олимпийских Игр

Nowcasting of meteorological parameters and hazards: implementation experience and development prospects

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

Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia

The short time interval of nowcasting (up to 2-6 hours) and the presence of spatio-temporal inertia of weather systems make it possible to forecast weather using its statistical extrapolation, while the forecast for the longer periods – with the growing influence of nonlinearity – is mainly based on hydrodynamic modeling. The paper considers the main nowcasting approaches and nowcasting technologies used at the Hydrometcentre of Russia as well as the prospects of world and domestic developments in this area of forecasting.

Keywords: nowcasting, very short-range weather forecasting, statistical and hydrodynamic modeling, blended forecasts, radar precipitation estimates, seamless forecasting, meteorological support of the Olympic Games

Введение

Наукастинг, называемый также прогнозом текущей погоды, – это детализированный прогноз погоды на ближайшие часы. В соответствии с действующим определением ВМО, приведенном в Наставлении

по глобальной системе обработки данных и прогнозирования [2], временная граница диапазона наукастинга составляет 2 ч. В настоящее время в ВМО обсуждается вопрос о пересмотре этого определения и расширении временного диапазона наукастинга.

Понятие «наукастинг» обычно ассоциируется с экстраполяцией последних тенденций, выявленных в данных метеорологических наблюдений, и в первую очередь радарных данных. Это связано с тем, что при современном уровне развития систем регионального усвоения данных наблюдений и мезомасштабного моделирования гидродинамической численный прогноз погоды (ЧПП) в его первые часы обычно уступает в точности экстраполяции данных предшествующих наблюдений. Проблемной стороной ЧПП остается менее точная начальная локализация мезометеорологических объектов и структур и эффект спинапа (начальной несогласованности метеорологических полей) на раннем этапе прогноза. При этом качество прогнозов текущей погоды на основе экстраполяции выявленной в последних наблюдениях тенденций быстро ухудшается по мере проявления нелинейных эффектов и за пределами первых нескольких часов уступает качеству ЧПП на основе гидродинамического моделирования. В любом случае предсказуемость на конвективных пространственно-временных масштабах очень ограничена. В большинстве современных систем наукастинга экстраполяция данных наблюдений комбинируется с выходными ЧПП.

Важным резервом повышения успешности мезомасштабного моделирования может стать развитие систем регионального усвоения данных наблюдений. В условиях достаточно разреженной наземной наблюдательной сети синоптических метеорологических станций радары часто являются основным доступным источником информации о мезомасштабной структуре атмосферы в начальных данных. Помимо повышения детализации и развития физического содержания моделей эффективное усвоение данных для конвективных пространственно-временных масштабов является одной из актуальнейших задач в ближайшие годы.

Ниже обсуждаются некоторые связанные с наукастингом терминологические вопросы, приводятся исторические сведения, описываются основные подходы к решению задач прогноза текущей погоды, рассматриваются используемые в Гидрометцентре России (ГМЦ) технологии наукастинга и формулируются соображения о перспективах мировых и отечественных разработок в данной области прогнозирования.

1. Краткая история развития технологий наукастинга

Термином «наукастинг» (в вольном переводе «прогноз на сейчас») английский метеоролог Кит Браунинг обозначил в 80-х годах прошлого века прогноз осадков на основе экстраполяции последовательности радиолокационных изображений [11]. При этом сами прогнозы называются иногда «наукастами». Несмотря на отсутствие языковой «элегантности», термин «наукастинг» перекочевал во многие языки мира.

Подчеркивание экстраполяции (лагранжевого подхода) в «проецировании» данных на ближайшее время отделяет наукастинг от сверхкраткосрочного (на срок до 12 ч) прогноза погоды, основанного главным образом на мезомасштабном гидродинамическом моделировании.

По убеждению английских метеорологов, первым опытом наукастинга можно считать распространение адмиралом Фицроем в 1860-х годах штормовых предупреждений по тем прибрежным портам, которые находились в подветренной стороне от мест обнаружения штормов. Наукастинг в современном понимании начинается примерно с середины прошлого века с использованием вначале только средств наблюдений (в основном спутников и радаров), а затем с активным привлечением продукции мезомасштабных гидродинамических моделей. В августе 1981 г. в Гамбурге был проведен первый симпозиум по наукастингу, сборник выступлений которого под редакцией К. Браунинга появился в 1982 г. [27]. Редактор сборника подчеркивал, что к началу XXI века не менее 80 % мировой метеорологической информации будет добываться, распространяться и обрабатываться в рамках идеологии и технологии наукастинга.

В обзоре [13] представлены многочисленные методики наукастинга, разработанные к началу 1990-х в развитых странах, а результаты зарубежных исследований с охватом следующих двадцати лет изложены в [26]. Между прочим, выяснилось, что термин *nowcasting* был предложен в США на несколько лет раньше публикации Браунинга для обозначения экстраполяции последовательных спутниковых снимков [25]. Прочитанное выше мнение Браунинга о растущей роли наукастинга откорректировано последующими годами: отсутствие специфической научной проблематики в прогнозе такого типа не выделило его в отдельную отрасль метеорологии, но востребованность «прогноза на сейчас» сделала его важной частью современных специализированных экспертных систем прогнозирования опасных явлений погоды и их последствий. Обстоятельный обзор с обсуждением методологических и технологических аспектов наукастинга дается в [4].

В 2017 г. вышло Руководство ВМО [35, 36], где рассматриваются связанные с наукастингом ключевые проблемы: наблюдения, способы и системы прогнозирования, методы верификации, обучение, приложения, рекомендации для построения систем наукастинга в развивающихся странах и т. д. Во введении наукастинг назван «одним из наиболее важных компонентов системы бесшовного прогнозирования». Помимо разнообразия в технологических подходах в системах наукастинга также может в той или степени использоваться вмешательство человека в процесс прогнозирования. В первую очередь это касается ситуаций опасных явлений погоды. В [36] перечислены этапы, в которых роль человека незаменима: (1) общий анализ синоптической ситуации; оценка вероятности опасного явления в конкретном месте на основе знания локальной климатологии и концептуальной модели эволюции погодного явления; (2) анализ данных

зондирования для оценки вертикального сдвига ветра и устойчивости; оценка типа конвективных очагов (отдельная ячейка, супер-ячейка, линия шквалов...); (3) непрерывный мониторинг линии конвергенции по спутниковым и радарным данным для выделения признаков (предвестников) опасных явлений и местоположения их наиболее вероятного развития. После этого прогнозист может использовать автоматическую экстраполяцию для определения местоположения зон опасной погоды.

Еще десять лет назад тема наукастинга практически не звучала в Росгидромете, хотя соответствующие технологии были уже знакомы и отчасти освоены в России [1, 6]. Формирование на территории страны единого радиолокационного поля на базе сети метеорологических радаров ДМРЛ-С, развитие систем мезомасштабного моделирования и расширение сети автоматических метеостанций с высокой частотой наблюдений создали предпосылки для развития технологий наукастинга в нашей стране. Мощным толчком для продвижения в этой области стала подготовка к метеорологическому обеспечению XXII Олимпийских зимних игр и XI Паралимпийских зимних игр 2014 года в Сочи.

Подготовка и проведение Олимпийских игр и предшествующих им тестовых соревнований предъявляют высокие требования к детализации и точности метеорологических прогнозов. Традиционно страны-организаторы стремятся радикально модернизировать и усилить наблюдательные сети в районах проведения Олимпиад, что позволяет использовать олимпийские площадки как своего рода полигоны для новых прогностических технологий. Начиная с 2000 года, эти возможности неоднократно использовались для организации демонстрационных и/или исследовательских проектов под эгидой ВМО. Целью демонстрационных проектов при этом является внедрение и демонстрация эффективности научных разработок, а исследовательские проекты нацеливаются на развитие метеорологической науки и новых методов и технологий прогнозирования. Каждый такой проект приносит методологическую новизну в проблематику наукастинга, сверхкраткосрочного и краткосрочного прогнозов погоды, при этом в каждом случае создается дружественная атмосфера метеорологического сообщества с традицией передачи опыта и списка нерешенных проблем команде метеорологического обеспечения следующей Олимпиады. Несомненно, выходные результаты проектов обоих типов оказываются мощным вкладом в развитие национальных служб погоды. Перечислим вкратце эти «олимпийские» этапы «эволюции науки наукастинга».

Сидней-2000. Первый демонстрационный проект ВМО: первая оценка полезности систем наукастинга в действии; автоматизированное обнаружение гроз и оценка их характеристик; особое внимание к летней конвекции [23].

Пекин-2008. Комбинация разных технологий наукастинга и увеличение прогностического срока; вероятностный наукастинг; верификация

в режиме реального времени; ансамблевое мезомасштабное прогнозирование [15].

Ванкувер-2010. Проект SNOW-V10 (Science of Nowcasting Olympic Weather for Vancouver-2010): зимний наукастинг в условиях сложной горной топографии; расширение номенклатуры прогнозируемых элементов (температура, влажность и видимость, а не только отражаемость и осадки) [21].

Лондон-2012. Оперативное использование системы ассимиляции 4DVAR; технология учащенных стартов численной модели высокого разрешения; целенаправленное сравнение качества наукастинга, ЧПП и их комбинирования [20].

Впечатляющим результатом летней Олимпиады в Лондоне явилось то, что даже для равнинного региона основанные на ЧПП сверхкраткосрочные прогнозы осадков и, тем более, комбинация модели и радарной экстраполяции оказались в общем более успешными на интервале примерно 2–6 ч, чем традиционная экстраполяция радарных полей [5, 28, 30, 31]. По этому поводу на сайте MetОфиса дается принципиальное пояснение: «Традиционно наукастинг проводился синоптиком-прогнозистом или автоматизированными технологиями, основанными на экстраполяции самых свежих метеорологических наблюдений, в частности радарных и спутниковых данных. Развитие доступных компьютерных мощностей, позволяющее использовать более сложные модели высокого разрешения, открывает возможность разработки систем наукастинга на базе численного прогноза погоды – это позволит предсказывать начало, развитие и разрушение гроз с использованием фундаментальных законов динамики жидкостей и физических процессов, которые не могут быть представлены в технологиях простой экстраполяции».

С метеорологическим обеспечением XXII Олимпийских и XI Паралимпийских зимних игр 2014 года в Сочи был связан проект The Forecast and Research in the Olympic Sochi Testbed (FROST-2014), включающий в себя как демонстрационную, так и исследовательскую компоненты [24]. В рамках проекта были задействованы шесть систем наукастинга: три из Канады (ABOM, INTW, CARDS), одна из Австрии (INCA) и две из России (JOINT, MeteoExpert). Большинство предыдущих систем наукастинга разрабатывались для прогноза летних конвективных явлений и регионов с относительно плоской топографией.

Пионерский опыт зимнего наукастинга для горной местности был получен при проведении Олимпийских игр 2010 года в Ванкувере и расширен в период олимпийских мероприятий в Сочи в рамках проекта FROST-2014. Некоторые из проверенных в Ванкувере методов и технологий наукастинга были применены на сочинском «испытательном полигоне», что позволило выявить общие и уникальные стороны использованных прогностических комплексов и степень универсальности положенных в их основу подходов.

Продукция проекта FROST-2014 была интегрирована в информационную систему Олимпийских Игр в Сочи. Разработанная в Гидрометцентре России в период подготовки к Олимпиаде система JOINT генерирует наукасты и краткосрочные прогнозы в местах расположения станций в качестве взвешенного мульти-модельного среднего прогноза, скорректированного по данным последних наблюдений. Такой подход хорошо зарекомендовал себя в период проведения сочинской Олимпиады. Автоматически генерируемый комплексный мульти-модельный прогноз использовался в качестве «первого приближения» для подготовки ежечасных прогностических сводок по спортивным объектам для информационной системы Олимпийских Игр с возможностью коррекции этого автоматизированного прогноза (при наличии такой необходимости) специалистами-прогнозистами через специальный веб-интерфейс.

2. Наукастинг непрерывных переменных в Гидрометцентре России

В период олимпийских мероприятий система JOINT агрегировала детерминированные прогнозы моделей участников проекта FROST-2014 для непрерывных метеорологических величин – приземной температуры, влажности, параметров ветра, давления. В постолимпийский период набор используемых модельных данных изменился: сегодня в него входят данные модели COSMO-Ru [9] и нескольких глобальных моделей.

Преимущества использования «синтезированных» мульти-модельных прогнозов известны давно. Так, в 1977 году Ф. Томпсон писал о возможности оптимального комбинирования независимых метеорологических прогнозов из разных источников, позволяющего добиться *в среднем* более высокой успешности результирующего комплексного прогноза по сравнению с участвующими в этой процедуре индивидуальными прогнозами [33]. Лежащие в основе этого подхода идеи были сформулированы еще в начале XIX века К.Ф. Гауссом. В прогностических приложениях мульти-модельные ансамбли давно и широко используются в средне- и долгосрочных прогнозах и несколько реже – в задачах прогнозирования на краткие сроки. В последние годы этот подход стал использоваться и в задачах наукастинга [22].

Для построения оптимальной линейной комбинации независимых прогнозов различных моделей используется статистическая информация об ошибках прогнозов этих моделей за некоторый предшествующий период («тренировочный период»). При этом оперативные прогностические системы изменяются и совершенствуются, что затрагивает и особенности их систематического поведения (систематические ошибки). Помимо систематических ошибок в средних за достаточно большой период прогностических полей возможны также систематические ошибки в нестационарных компонентах атмосферных течений, зависящие от характера циркуляции. Выбор продолжительности тренировочного периода

на практике обычно является компромиссом между достаточно противоречивыми требованиями статистической обеспеченности и необходимостью учета особенностей текущей погодной ситуации.

Рассмотрим особенности системы более подробно. Первым шагом статистической пост-обработки прогнозов в системе JOINT является калибровка агрегируемых прогнозов. Калибровка в данном случае представляет собой устранение систематического смещения в прогнозах каждой из моделей путем вычитания средних за тренировочный период ошибок прогнозов (прогноз минус факт) из соответствующих прогностических значений; более сложные варианты калибровки могут включать коррекцию прогностических вероятностных распределений значений метеорологических параметров.

Следующим шагом статистической пост-обработки результатов ЧПП является их комплексирование – построение оптимальной линейной комбинации текущих откалиброванных прогнозов различных моделей. Веса прогнозов индивидуальных моделей рассчитываются таким образом, чтобы минимизировать ошибку совместного прогноза по данным наблюдений и прогнозов за тренировочный период.

Помимо использования самых последних прогнозов различных моделей система JOINT включает в прогностические ансамбли данные нескольких предшествующих частично перекрывающихся во времени последовательных прогнозов каждой модели (т. е. используется осреднение прогнозов с временным сдвигом, выпущенных за последние сутки). Процедура построения комплексного прогноза при этом дает наибольший вес самым последним прогнозам и последовательно убывающие веса – предшествующим прогнозам.

Еще одним задействованным в системе JOINT способом пост-обработки ЧПП является использование последних данных наблюдений. Как правило, прогностические центры выпускают прогнозы в основные синоптические сроки (00, 06, 12 и 18 ч ВСВ). Между этими сроками последние выпущенные прогнозы можно корректировать по данным наблюдений, которые становятся доступными уже после момента выпуска прогноза (рис. 1). Коррекция по данным наблюдений представляет собой статистическое комплексирование полученного мульти-модельного среднего прогноза с инерционным прогнозом с учетом качества этих прогнозов за скользящий тренировочный период. Результирующий прогноз при этом уточняется по мере появления новых данных наблюдений.

Важно отметить, что для непрерывных метеорологических переменных (температура, влажность и др.) в первые десятки минут простой инерционный прогноз (т. е. сохранение последнего метеорологического наблюдения в качестве прогностического значения) является очень серьезным конкурентом для других, более сложных схем прогноза. На рис. 2, заимствованном из [24], показаны графики средних абсолютных ошибок различных участвовавших в проекте FROST-2014 схем наукастинга в зависимости от заблаговременности прогноза.

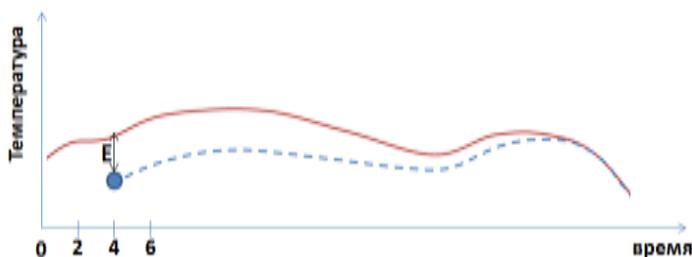


Рис. 1. По оси абсцисс схематически показана заблаговременность прогноза, выпущенного в 00 ч, по оси ординат – прогностическая температура. Красная кривая – исходный прогноз, синяя пунктирная кривая – скорректированный прогноз. E – ошибка прогноза на момент последнего наблюдения.

Fig. 1. The abscissa schematically shows the lead-time of the forecast, run at 00 h, the ordinate axis shows the forecast temperature. The red curve denotes the initial forecast, the dotted blue curve denotes the corrected forecast. E is the forecast error at the last observation time moment.

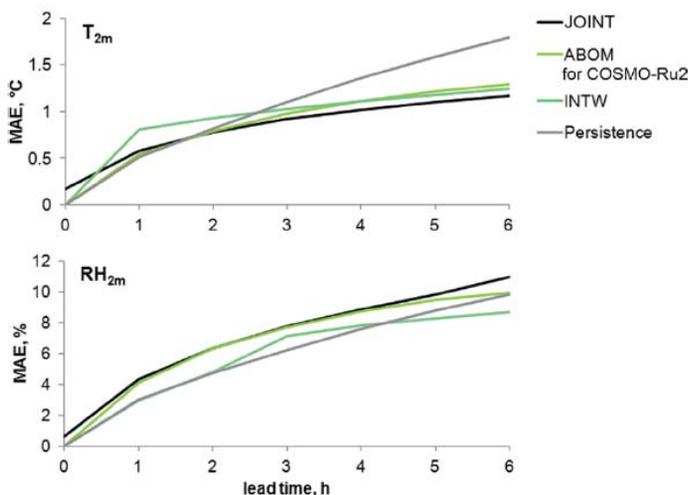


Рис. 2. Средняя абсолютная ошибка (MAE) наукастинга температуры (сверху) и относительной влажности (снизу) в сравнении с системами наукастинга ABOM, INTW, JOINT и с инерционным прогнозом (Persistence). По оси абсцисс – заблаговременность, ч; по оси ординат – значения MAE. Агрегирование данных произведено по периоду 15.01–18.03.2014 с осреднением модельных прогнозов по часовым периодам.

Fig. 2. Mean absolute error of temperature nowcasting (upper panel) and of relative humidity (bottom panel) in comparison to nowcasting systems ABOM, INTW, JOINT and to persistence forecast. The abscissa shows the lead-time [h], the ordinate shows MAE values. Aggregation period ranges from 15 Jan to 18 Mar 2014, averaged over hourly runs.

Можно видеть, что в условиях сложного горного рельефа инерционный прогноз был вполне конкурентен в сравнении с более сложными прогностическими схемами. Так, для приземной температуры основанные на моделях системы стали превосходить инерцию лишь после первых полутора часов прогноза. После полутора часов вплоть до конца прогностического интервала JOINT генерировала прогнозы температуры с наименьшим значением MAE. При этом наукасты приземной температуры были более успешны, чем наукасты относительной влажности.

По сравнению со статистическим постпроцессингом непрерывных метеорологических переменных ЧПП постпроцессинг осадков имеет свою специфику. Прямое распространение на поля осадков взвешенного мульти-модельного осреднения по аналогии с осреднением по ансамблю для непрерывных переменных ведет к систематическому завышению площади с осадками в прогностических полях. Прогноз осадков также предъявляет повышенные требования к объему обучающих выборок, так как осадки – относительно редкое явление. Для учета этих особенностей полей осадков была разработана отдельная процедура комплексирования ЧПП различных моделей, но основным для прогнозов на первые часы сегодня в Гидрометцентре России является подход, представленный ниже.

3. Наукастинг осадков в Гидрометцентре России

3.1. Наукастинг осадков с помощью статистического моделирования

Поля интенсивности осадков были исторически первым элементом наукастинга. Хотя впоследствии номенклатура выходной продукции была сильно расширена, однако и сегодня осадки остаются настолько важным объектом исследований, моделирования и прогнозирования на всех пространственно-временных масштабах, включая наукастинг, что часто используются в качестве критической оценки метеорологических моделей [32].

Сегодня в Гидрометцентре России для наукастинга осадков используется система ансамблевого краткосрочного прогноза STEPS [10]. В основу технологии положен принцип экстраполяции последовательности полей данных радиолокационного зондирования как оптического потока на основе мультипликативной каскадной модели (оптический поток – технология, используемая в различных областях автоматизированного визуального слежения за объектами для определения сдвигов, сегментации, выделения объектов и анализа их структуры, компрессии видео и т. д.).

Система STEPS была в списке систем наукастинга, заявленных для обеспечения Олимпиады Сочи-2014, однако к оперативной работе по разным причинам она не была подготовлена. Первые эксперименты со схемой STEPS в Гидрометцентре России начались в 2015 г. Прогнозы

для отдельных случаев составлялись на 2 ч с дискретностью 10 мин, ансамбли формировались по принципу лагов, то есть при старте от трех соседних пар начальных полей порождались три траектории прогнозов, так что на каждом сроке имелось три прогноза, а на полном интервале – 36 прогностических реализаций.

Полученные прогностические поля анализировались качественно по следующим признакам: форма зон осадков (связность, отдельные очаги), направление и скорость перемещения очагов, значение интенсивности осадков. Прогностические поля вполне удовлетворительно воспроизводили фактические поля самой разнообразной исходной конфигурации и разных типов перемещения в зонах радиолокаторов, от прямолинейных до круговых.

Были отмечены многочисленные особенности прогнозирования методом «кусочно-линейной экстраполяции» с двумерной Фурье-фильтрацией полей интенсивности осадков: (1) сглаженность из-за каскадного представления полей, (2) консервативность в удержании интенсивности в очагах и систематически более медленная потеря связности, (3) заметное расширение «трубы траекторий», (4) систематическая диссипация общей интенсивности (вероятно, иногда чрезмерная в условиях средних широт России), (5) способность «сливать» и «разливать» очаги интенсивности. Большинство неблагоприятных особенностей отражают фундаментальный недостаток такого рода моделей – линейность и неспособность учитывать источники и стоки энергии (хотя последнее непросто и для гидродинамических моделей).

С мая 2016 г. система детерминистского и вероятностного наукастинга осадков на срок до 2 ч по последовательным наблюдениям отдельных радиолокаторов на территории ЦФО стала функционировать в режиме реального времени, при этом начальные поля поступали в Гидрометцентр России из Центральной аэрологической обсерватории. Продукция состояла из цифровой и графической информации следующего типа: (1) последняя (из трех) серия прогнозов на 2,5 ч, пятнадцать «детерминистских» полей в 10-минутном интервале; (2) статистические характеристики прогностического ансамбля: средние, медианы, максимумы, стандарты, интерквартильный размах; (3) прогнозы вероятностей превышения порогов: десять полей вероятностей $\geq 1, 3, \dots, 19$ мм/ч. При этом была создана система объединения наблюдений и прогностических результатов по отдельным радиолокационным зонам в единую прогностическую карту территории ЦФО. Задача цифрового и графического объединения отдельных полей усложнена двумя обстоятельствами: (1) наличием границ и, соответственно, граничных эффектов, а также (2) неоднозначностью полей интенсивности в областях пересечений. Некоторые из этих трудностей до сих пор не преодолены.

Для сопоставления станционных и радарных данных важно плотное распределение станций по территории обзора. При интерполировании

на географическую сетку имеются мощные методы геостатистического анализа данных, учитывающие как топографические особенности, так и статистические пространственно-временные свойства данных. Как правило, требуются предварительные эксперименты с параметрами интерполяции (например, с радиусом осреднения), чтобы получить удовлетворительный вывод о возможности интерполирования и о конкретных значениях параметров.

Рассмотрим в качестве примера территорию ЦФО, попадающую в зону обзора радиолокатора Внуково, и сопоставим изображения двумерных массивов радарных данных в исходной километровой (географически нерегулярной) сетке размером 504×504 и доступных точечных данных примерно от полусотни станций территории обзора. Радарные оценки 10-минутных интенсивностей были просуммированы до интервала 720 мин с синхронизацией со станционными данными. Радарные и станционные данные переводились на географическую сетку методом ближайшего соседа и методом Крессмана, соответственно. По станционным данным строились два изображения единой географической области – размерности 100×100 и 50×50 узлов. Очевидно, вторая сетка оказывается менее детальной, но более сглаженной и с меньшим количеством пустых клеток, для которых не нашлось ни одной внутренней станции со значением. На рис. 3 приведены примеры сопоставления по срокам 2016.05.15-08:00, 2016.05.23-06:00 и 2016.06.05-18:00.

Очевидно, что калибровка радарных данных с помощью средних по пространству – единственно возможная в таких условиях [3]. А использование станционных данных для верификации прогностических осадков такого же накопления возможно только для точечной верификации при сопоставлении станционных значений либо с исходными значениями в ближайшей точке, либо с осредненным значением по окрестным точкам радарной сетки. Все эти методы исключают применение мезомасштабной верификации, одним из средств которой является взаимное сопоставление пространственных структур, или объектов [14, 17, 19]. В силу дефицита автоматических метеорологических станций с высокой частотой измерений единственным практически доступным источником рассматриваемых в качестве «истины» наблюдений для верификации наукастинга осадков стали последовательности радарных полей.

В период с мая по сентябрь («теплый период года») 2017 г. были проведены оперативные испытания системы наукастинга осадков на основе программного комплекса STEPS по данным девяти радиолокаторов ЦФО: Курск (RAKU), Тула (RATL), Внуково (RAVN), Воейково (RAVO), Брянск (RUDB), Кострома (RUDK), Смоленск (RUDL), Нижний Новгород (RUDN) и Валдай (RUWJ). Расчет прогнозов стартовал каждые 10 минут, при этом полный расчет с формированием ансамблей, архивацией, подготовкой графической продукции и пересылкой данных занимал около 3,5 минут.

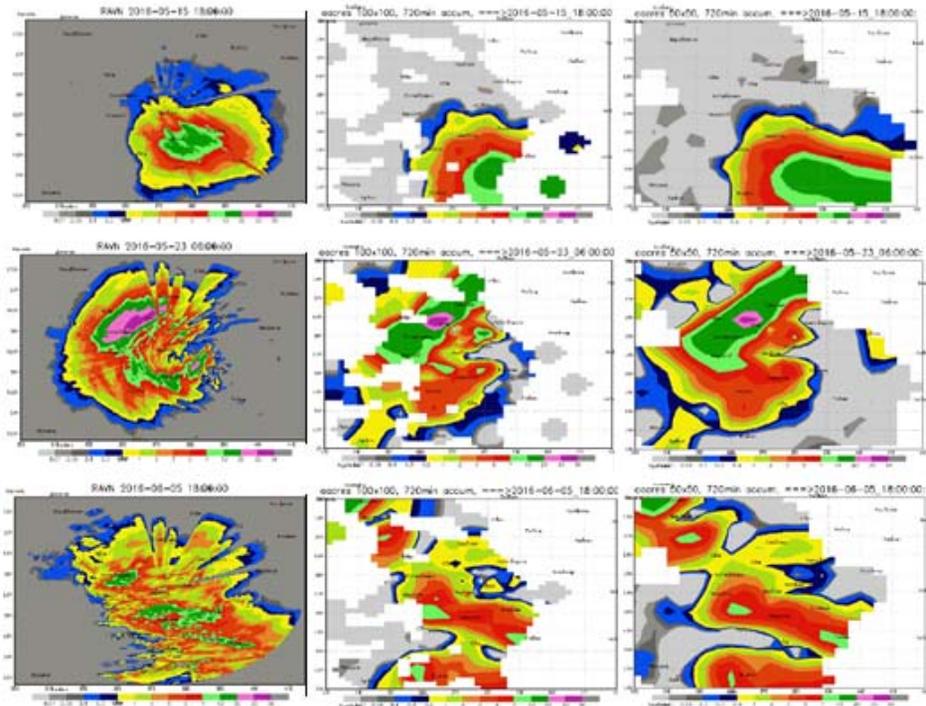


Рис. 3. Графическое представление 12-часовых сумм осадков по радарным (левый столбец) и станционным (средний и правый столбцы) данным с интерполяцией методом «ближайшего соседа» на сетку размерности 504×504 (левый столбец) и методом Крессмана на сетку размерности 100×100 (средний столбец) и 50×50 (правый столбец).

Fig. 3. Graphical representation of 12-hour precipitation sums from radar (left column) and station data (middle and right columns) using the "nearest neighborhood" interpolation method on the 504×504 -grid (left column), and Cressman interpolation on the 100×100 (middle column) and on the 50×50 -grid (right column).

Верификация была проведена с использованием как традиционных, так и новых рекомендованных оценок качества, включая оценки для экстремальных величин и для пространственных объектов [12, 14, 16–18, 29]. Результаты испытаний развернутой системы оказались вполне удовлетворительными и решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 01.12.2017 г. было рекомендовано внедрить в оперативную практику Гидрометцентра России в качестве основной «Технологию наукастинга интенсивности осадков на срок до 90 мин в теплый период года». Некоторые результаты испытаний сформулированы в [7].

Во-первых, наукастинг осадков оказался полезным на интервале одного-полутора часов как в точках выделенной сетки, так и по областям сильных осадков. Исходного архива (около 20 тыс. прогнозов по одному

радару) было достаточно для статистической обеспеченности оценок осадков интенсивности лишь ≥ 4 мм/ч, хотя в наблюдениях и прогнозах наблюдались значения и существенно более сильных осадков.

Во-вторых, использование объектно-ориентированной верификации позволило оценить полезность системы в прогнозировании связанных областей осадков при пороге интенсивности в 1 мм/ч. Так, в интервале до полутора часов не менее половины объектов размером 35×35 точек сетки и выше (размер ячейки сетки около 2 км) прогнозируются таким образом, что площадь пересечения соответствующих объектов прогноза и наблюдения занимает не менее четверти площади объекта наблюдения.

Наконец, в-третьих, испытания выявили некоторые особенности радиолокационных данных, которые критично сказываются на качестве прогнозов (например, «местники» и выбросы в значениях).

Испытания схемы наукастинга осадков за холодный период года были проведены по данным тех же девяти радиолокаторов на Европейской территории России в ноябре 2017 г. – марте 2018 г. За этот период количество прогнозов по каждому локатору составило те же порядка 20 тыс., что сделало возможным статистически обеспеченное сравнение оценок качества наукастинга для теплого и холодного периодов, при этом сами оценки проводились поточечно по стандартной схеме расчетов таких показателей, как коэффициент корреляции, систематический сдвиг, критерий Пирса-Обухова (PSS) и критический индекс успешности (ETS) [7, 8].

Сравнение качества наукастинга осадков по двум периодам года привело к отчасти противоречивым выводам и для радаров, и для показателей. Так, качество прогнозов в холодный период оказалось в целом более высоким по коэффициенту корреляции с практической предсказуемостью для некоторых радаров до конца прогностического интервала (2,5 ч). По систематической ошибке (BIAS) качество прогнозов в двух периодах существенного различия не выявило. В то же время качество прогнозов по критериям PSS и ETS в холодный период было выше лишь в областях, не превышающих четверти полной площади обзора локаторов, то есть заметно ниже качества прогнозов тех же категорий в летний период.

Следует заметить, что сравнение категорийных прогнозов (особенно PSS и ETS) для двух периодов года по выбранным категориям интенсивности было не совсем корректным из-за примерно вдвое меньшей интенсивности осадков в холодный период. Это отразилось и на статистической обеспеченности категорийных оценок: в отличие от теплого периода, в который этот порог оценок был равен 4 мм/ч, в холодный период минимально обеспеченное значение категории оказалось в два раза меньше, при этом и в холодный период система прогнозирует местами высокие значения интенсивности осадков вплоть до экстремальных.

В ходе испытаний схемы наукастинга в холодный период выяснилось, что качество радиолокационных данных уступает качеству данных

в теплый период из-за более выраженных помех и кольцевых структур вокруг пункта расположения радара, вызванных либо техническими свойствами радиолокации, либо особенностями оценок радиолокационных осадков. Все эти обстоятельства серьезно влияют на показатели верификации в холодный период.

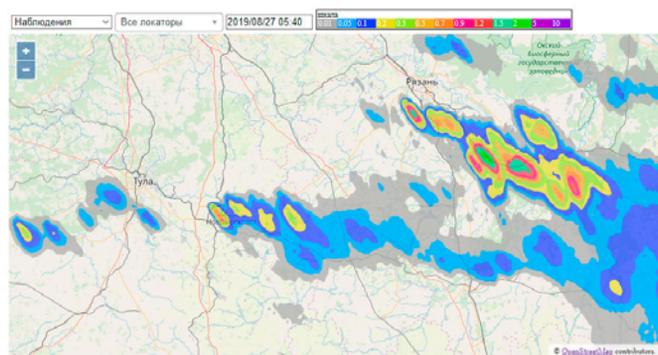
В течение 2018 г. были проведены тесты с обновленной версией схемы STEPS, в которой размер расчетной области и пространственная детализация определяются исходными полями произвольного размера. Увеличение расчетной области за пределы зоны обзора отдельного лоатора позволяет уменьшить влияние граничных эффектов и корректировать поля осадков в области пересечения зон видимости смежных лоаторов. В 2019 г. начались эксперименты с данными 27 лоаторов ДМРЛ-С. При 10-минутном цикле радиолокационных наблюдений расчеты прогнозов с заблаговременностью до 2 часов в области размером 504×504 км занимают не более 5 мин для каждого лоатора, что позволяет обновлять результаты наукастинга на сайте Гидрометцентра России (<https://meteoinfo.ru/nowcasting>) каждые 10 минут.

3.2. Наукастинг осадков на основе комбинации статистической модели и ЧПП

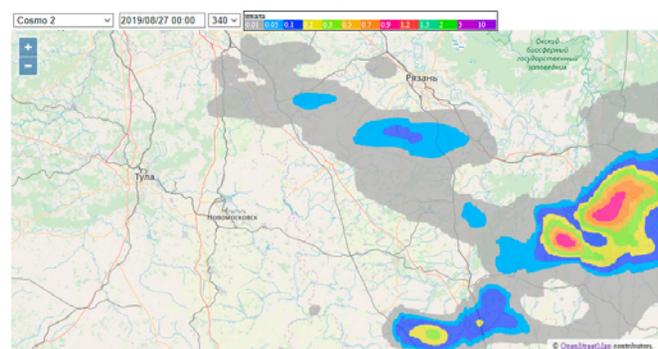
Комбинация статистической экстраполяции и результатов гидродинамического моделирования реализована в программном комплексе STEPS_NWP, представляющем собой естественное расширение STEPS. Входными данными являются поля радиолокации, дополненные региональными численными прогнозами, отображенными на ту же географическую сетку.

В настоящее время в Гидрометцентре России тестируется технология комплексирования радарного наукастинга интенсивности осадков с прогностическими полями региональной мезомасштабной модели COSMO-Ru [9]. Расчет ЧПП с пространственным разрешением 2,2 км на 48 ч с 10-минутным шагом по заблаговременности производится четыре раза в сутки. При этом при подготовке начальных данных для расчетов ЧПП усваиваются данные радарных наблюдений.

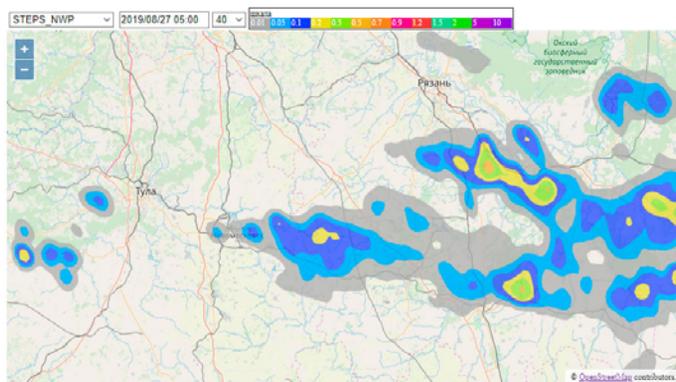
Регион ЦФО покрывают данными наблюдений двенадцать ДМРЛ-С. Текущие данные этих радаров объединяются в единое поле. Для инициации прогноза оптического потока используются последовательные сшитые радарные поля интенсивности осадков. Для объединения данные ЧПП и радарного наукастинга преобразуются в географический формат единого радиолокационного поля. В первые часы прогноза приоритет отдается экстраполяции наблюдений, затем постепенно увеличивается влияние результатов прогностической продукции COSMO-Ru (рис. 4). Подготовка данных и расчет занимают примерно 5 минут. Это позволяет обновлять объединенный сверхкраткосрочный прогноз по мере появления новых радарных наблюдений, то есть каждые 10 минут.



а)



б)



в)

Рис. 4. Примеры прогностических полей интенсивности осадков для одного момента времени: радарное поле наблюдения (а); численный прогноз модели COSMO (б); комплексный прогноз (в).

Fig. 4. Examples of precipitation intensity forecast fields for one time moment (panels from top to bottom): radar observation field (а); numerical COSMO model forecast (б); blended forecast (в).

Заключение

Востребованность наукастинга связана с его способностью обеспечивать потребителей более детализированной информацией, чем это позволяют другие виды метеорологических прогнозов. Это особенно существенно при прогнозе опасных явлений погоды, многие из которых характеризуются коротким жизненным циклом и небольшой пространственной протяженностью.

Диагноз зон опасных явлений погоды по данным наблюдений является важной частью наукастинга. В условиях редкой наблюдательной сети важнейшим источником информации для такого диагноза являются данные дистанционного зондирования атмосферы (данные метеорологических радаров, спутников, профиломеров и т. д.). Стоит заметить, что диагностические возможности этого инструментария (прежде всего, доплеровских метеорологических радиолокаторов с двойной поляризацией ДМРЛ-С) пока используются не в полной степени. Реализация этого потенциала требует специальных сфокусированных исследований и комплексного использования различных информационных источников.

Хотя наукастинг и считается важным компонентом систем «бесшовного» прогнозирования, сегодня эта «бесшовность» достигается склейкой результатов достаточно разнородных технологий. При этом можно ожидать, что дальнейшее развитие наукастинга будет во все большей степени связано с развитием ЧПП и систем усвоения данных наблюдений с высоким разрешением. Эта общая тенденция последних лет в области развития систем наукастинга проявляется и в Росгидромете. Так, в Гидрометцентре России будет продолжена работа по реализации непрерывного усвоения данных (в том числе и радарных) с быстрым циклом обновления ЧПП на основе модели COSMO-Ru. Предполагается, что одним из главных приложений этой технологии станут задачи наукастинга и сверхкраткосрочного прогноза погоды. Параллельно ведется работа по комбинированию наукастинга на основе экстраполяции данных наблюдений с выходными данными ЧПП.

Качество моделирования и прогнозов погоды во многом определяется уровнем усвоения данных наблюдений. Для моделей с высоким пространственным разрешением усвоение данных имеет свою специфику. Так, балансовые соотношения (гидростатическое и геострофическое приближения) могут плохо выполняться на конвективных масштабах. Особый интерес для процессов такого масштаба представляет усвоение данных новых видов наблюдений с высокой пространственно-временной детализацией (радары, профиломеры и др.). При этом принципиально важен также и метод усвоения этой информации. Дискретное усвоение, при котором данные наблюдений внутри окна усвоения сносятся на конец этого временного окна (например, 3D-VAR), в определенной степени провоцирует периодический вычислительный шок на начальном этапе прогноза, т. е. на временных масштабах наукастинга. В этом отношении

такие методы усвоения, такие как 4D-VAR или гибридное ансамблево-вариационное усвоение являются более предпочтительными для данного класса прогностических задач [31].

Помимо этого, остаются и другие многочисленные связанные с развитием систем наукастинга вопросы:

- улучшение калибровки радарных данных;
- совершенствование процедур построения композитных радарных полей;
- уточнение алгоритмов количественной оценки осадков по данным об отражаемости;
- оптимальная процедура склейки радарных данных и данных ЧПП;
- выбор оптимальных процедур для перехода от отражаемости к явлениям (грозы, шквалы и т. д.);
- разработка новых форм выходной продукции и т. д.

Учитывая, что технологии наукастинга в Росгидромете появились недавно, опыт их использования в отечественной прогностической практике пока весьма скромнен. Роль человека в наукастинге также требует осмысления, которое должно найти отражение в соответствующей нормативной базе.

Список литературы

1. Белоцерковский А.В. Адаптивные методы сверхкраткосрочного прогнозирования в мезомасштабных задачах метеорологии: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. СПб., 1996. 480 с.
2. ВМО Наставление по Глобальной системе обработки данных и прогнозирования, Том I (Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО). Глобальные аспекты // ВМО-№ 485, обновлено в 2012 г.
3. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического лоатора ДМРЛС в синоптической практике: М.: Росгидромет, 2017. 121 с.
4. Иванова А.Р., Шакина Н.П. Перспективы развития наукастинга для метеорологического обеспечения авиации в рамках реализации Глобального аэронавигационного плана (ГАНП) // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 360. С. 113-134.
5. Киктёв Д.Б., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Заринов Р.Б., Муравьев А.В., Ривин Г.С., Розинкина И.А., Смирнов А.В., Цырульников М.Д. Развитие прогностических технологий для метеорологического обеспечения Олимпиады «Сочи-2014» // Метеорология и гидрология. 2013. № 10. С. 5-15.
6. Кузнецов А.Д. Разработка методов и средств текущего прогнозирования: Дисс. ... докт. физ.-мат. наук. СПб.: Рос. Гидрометеорологический ун-т, 1998. 355 с.
7. Муравьев А.В., Киктёв 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.
8. Муравьев А.В., Киктёв Д.Б., Смирнов А.В. 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.
9. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М. и др. Система COSMO-Ru негидростатического краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 58-71
10. Bowler N.E., 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. 132. P. 2127-2155. DOI: 10.1256/qj.04.100.
11. Browning K.A. Local weather forecasting // Proc. R. Soc. London Ser. 1980. A 371. P. 179-211. <https://doi.org/10.1098/rspa.1980.0076>.
12. Bullock R., Brown B., Fowler T. Method for object-based diagnostic evaluation (MODE) // NCAR Technical Notes, NCAR/TN-532+STR, 2016. <http://library.ucar.edu/research/publish-technote>.

13. Conway B.J. An overview of nowcasting techniques // Nowcasting and Very Short Range
14. Davis C., Brown B., Bullock R. Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Methodology and application mesoscale rain areas // *Mon. Wea. Rev.* 2006. Vol. 134. P. 1772-1784.
15. Duan Y., Gong J., Du J., Charron M., Chen J., Deng G., DiMego G., Hara M., Kumii M., Li X., Li Y., Saito K., Seko H., Wang Y., Wittmann C. An overview of the Beijing 2008 Olympics Research and Development Project (B08RDP) // *BAMS.* 2012. Vol. 93, no. P. 381-403.
16. Ebert E.E. Suggested methods for the verification of precipitation forecasts against high resolution limited area observations (JWGFVR). Geneva, Switzerland: WMO, November 2013.
17. Ebert E.E., McBride J.L. Verification of precipitation in weather systems: Determination of systematic errors // *J. Hydrology.* 2000. Vol. 239. P. 179-202.
18. *Forecast Verification. A Practitioner's Guide in Atmospheric Science* // John Wiley & Sons Ltd, 2012. 274 p.
19. Gilleland E. Testing Competing Precipitation Forecasts Accurately and Efficiently: The Spatial Prediction Comparison Test // *Mon. Wea. Rev.* 2013. Vol. 141. P. 340-355.
20. Golding B.W., Ballard S.P., Mylne K., Roberts N., Saulter A., Wilson C., Agnew P., Davis L.S., Trice J., Jones C., Simonin D., Li Z., Pierce C., Bennett A., Weeks M., Moseley S. Forecasting capabilities for the London 2012 Olympics // *BAMS.* 2014. Vol. 95, no. 6. P. 883-986.
21. Joe P., Doyle C., Wallace A., Cober S.G., Scott B., Isaac G.A., Smith T., Mailhot J., Snyder B., Belair S., Jansen Q., Denis B. Weather Services, Science Advances and the Vancouver 2010 Olympic and Paralympic Winter Games // *BAMS.* 2010. Vol. 91, no. 1. P. 31-36.
22. Huang L.X., Isaac G.A. Integrating NWP Forecasts and Observation Data to Improve Nowcasting Accuracy // *Weather and Forecasting.* 2012. Vol. 27. P. 938-953.
23. Keenan T. et al. The Sydney 2000 World Weather Research Programme Forecast Demonstration Project: Overview and current status // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2003. Vol. 84. P. 1041-1054.
24. Kiktev D., Joe P., Isaac G.A., Montani A., Frogner I.-L., Nurmi P., Bica B., Milbrandt J., Tsyrunikov 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 // *BAMS.* 2017. Vol. 98, no. 9. P. 1908-1929.
25. Lushine J.B. Convective growth and movement as seen from GOES-1 // *Mon. Wea. Rev.* 1976. Vol. 104. P. 1449-1450.
26. Mass C. Nowcasting: the promise of new technologies of communication, modeling and observation // *BAMS.* 2012. Vol. 93. P. 797-809.
27. Nowcasting. London: Academic Press, 1982. 256 p.
28. Pierce C., Seed A., Ballard S., Simonin D., Zhihong Li. Nowcasting // Doppler radar observations – weather radar, wind profiler, ionospheric radar and other advanced applications. InTech, 2012. P. 97-142.
29. Recommendations for the Verification and Intercomparison of QPFS and PPFPS from Operational NWP Models. Revision 2. WWRP/WGNE Joint Working Group on Verification // WMO/TD-No. 1485. Geneva, Switzerland: WMO, October 2008. 43 p.
30. Simonin D., Pierce C., Roberts N., Ballard S.P., Lia Z. Performance of Met Office hourly cycling NWP-based nowcasting for precipitation forecasts // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2017. Vol. 143. P. 2862-2873.
31. Sun J., Xue M., Wilson J.W., Zawadzki I., Ballard S.P., Onvlee-Hoimeyer J., Joe P., Barker D.M., Li P.-W., Golding B., Xu M., Pinto J. Use of NWP for nowcasting convective precipitation: recent progress and challenges // *BAMS.* 2014. Vol. 95. P. 409-426.
32. Tapiador F.J., Roca R., Del Genio A., Dewitte B., Petersen W., Zhang F. Is precipitation a good metric for model performance? // *B.A.M.S.* 2019. Vol. 100. P. 223-233. DOI:10.1175/BAMS-D-17-0218.1.
33. Thompson P.D. How to Improve Accuracy by Combining Independent Forecasts // *Mon. Wea. Rev.* 1977. Vol. 105. P. 228-229.
34. Woodcock F., Engel C. Operational Consensus Forecasts // *Weather and Forecasting.* 2005. Vol. 20. P. 101-111.
35. *WMO Manual on the Global Data-processing and Forecasting System. Volume I (Annex IV to WMO Technical Regulations). Global Aspects* // WMO-No. 485, Updated in 2017.
36. *WMO Guidelines for Nowcasting Techniques* // WMO-No. 1198. 2017. 82 p.

References

1. Belocerkovskii A.V. Adaptivnye metody sverhkratkosrochnogo prognozirovaniya v mezomasshtabnykh zadachah meteorologii: Dis. dokt. fiz.-mat. nauk. Saint Petersburg, 1996, 480 p. [in Russ.].
2. *WMO Manual on the Global Data-processing and Forecasting System. Volume I (Annex IV to WMO Technical Regulations). Global Aspects. WMO-No. 485, Updated in 2017.*
3. Vremennye metodicheskie ukazaniya po ispol'zovaniyu informacii doplerovskogo meteorologicheskogo lokatora DMRL-S v sinopticheskoi praktike. Moscow, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, 2017, 121 p. [in Russ.].

4. Ivanova A.R., Shakina N.P. Future development of nowcasting for aviation meteorological service in the framework of Global aeronavigation plan (GANP) implementation. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 360, pp. 113-134 [in Russ.].
5. Kiktev D.B., Astakhova E.D., Blinov D.V., Zaripov R.B., Murav'ev A.V., Rivin G.S., Rozinkina I.A., Smirnov A.V., Tsyrl'nikov M.D. Development of forecasting technologies for meteorological support of the Sochi-2014 Winter Olympic Games. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 10, pp. 653-660. DOI: 10.3103/S1068373913100014.
6. Kuznecov A.D. Razrabotka metodov i sredstv tekushego prognozirovaniya: Diss. ... dokt. fiz.-mat. nauk. Saint Petersburg, Ros. Gidrometeorologicheskii un-t, 1998, 355 p. [in Russ.].
7. 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.].
8. Muravev A.V., Kiktev D.B., Smirnov A.V., Zaichenko 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.].
9. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M., Alferov D.Yu., Astakhova E.D., Blino v D.V., Bundel' A.Yu., Kazakova E.V., Kirsanov A.A., Nikitin M.A., Perov V.L., Surkova G.V., Revokatova A.P., Shatunova M.V., Chumakov M.M. 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. DOI: 10.3103/S1068373915060060.
10. Bowler N.E., 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, 132, pp. 2127-2155. DOI: 10.1256/qj.04.100.
11. Browning K.A. Local weather forecasting. *Proc. R. Soc. London Ser.*, 1980, A 371, pp. 179-211. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1980.0076>.
12. Bullock R., Brown B., Fowler T. Method for object-based diagnostic evaluation (MODE). NCAR Technical Notes, NCAR/TN-532+STR, 2016. Available at: <http://library.ucar.edu/research/publish-technote>.
13. Conway B.J. An overview of nowcasting techniques // Nowcasting and Very Short Range
14. Conway B.J. An overview of nowcasting techniques // Nowcasting and Very Short Range Davis C., Brown B., Bullock R. Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Methodology and application mesoscale rain areas. *Mon. Wea. Rev.*, 2006, vol. 134, pp. 1772-1784.
15. Duan Y., Gong J., Du J., Charron M., Chen J., Deng G., DiMego G., Hara M., Kunii M., Li X., Li Y., Saito K., Seko H., Wang Y., Wittmann C. An overview of the Beijing 2008 Olympics Research and Development Project (B08RDP). *BAMS*, 2012, vol. 93, pp. 381-403.
16. Ebert E.E. Suggested methods for the verification of precipitation forecasts against highresolution limited area observations (JWGfVR). Geneva, Switzerland: WMO, November 2013.
17. Ebert E.E., McBride J.L. Verification of precipitation in weather systems: Determination of systematic errors. *J. Hydrology.*, 2000, vol. 239, pp. 179-202.
18. *Forecast Verification. A Practitioner's Guide in Atmospheric Science.* John Wiley & Sons Ltd, 2012, 274 p.
19. Gilleland E. Testing Competing Precipitation Forecasts Accurately and Efficiently: The Spatial Prediction Comparison Test. *Mon. Wea. Rev.*, 2013, vol. 141, pp. 340-355.
20. Golding B.W., Ballard S.P., Mylne K., Roberts N., Sautler A., Wilson C., Agnew P., Davis L.S., Trice J., Jones C., Simonin D., Li Z., Pierce C., Bennett A., Weeks M., Moseley S. Forecasting capabilities for the London 2012 Olympics. *BAMS*, 2014, vol. 95, no. 6, pp. 883-986.
21. Joe P., Doyle C., Wallace A., Cober S.G., Scott B., Isaac G.A., Smith T., Mailhot J., Snyder B., Belair S., Jansen Q., Denis B. Weather Services, Science Advances and the Vancouver 2010 Olympic and Paralympic Winter Games. *BAMS*, 2010, vol. 91, no. 1, pp. 31-36.
22. Huang L.X., Isaac G.A. Integrating NWP Forecasts and Observation Data to Improve Nowcasting Accuracy. *Weather and Forecasting*, 2012, vol. 27, pp. 938-953.
23. Keenan T. et al. The Sydney 2000 World Weather Research Programme Forecast Demonstration Project: Overview and current status. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2003, vol. 84, pp. 1041-1054.
24. Kiktev D., Joe P., Isaac G.A., Montani A., Frogner I.-L., Nurmi P., Bica B., Milbrandt J., Tsyrl'nikov 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. *BAMS*, 2017, vol. 98, no. 9, pp. 1908-1929.
25. Lushine J.B. Convective growth and movement as seen from GOES-1. *Mon. Wea. Rev.*, 1976, vol. 104, pp. 1449-1450.

26. *Mass C.* Nowcasting: the promise of new technologies of communication, modeling and observation. *BAMS*, 2012, vol. 93, pp. 797-809.
27. Nowcasting. London: Academic Press, 1982, 256 p.
28. *Pierce C., Seed A., Ballard S., Simonin D., Zhihong Li.* Nowcasting // Doppler radar observations – weather radar, wind profiler, ionospheric radar and other advanced applications. InTech, 2012, pp. 97-142.
29. Recommendations for the Verification and Intercomparison of QPFS and PQPFS from Operational NWP Models. Revision 2. WWRP/WGNE Joint Working Group on Verification. WMO/TD-No. 1485. Geneva, Switzerland: WMO, October 2008, 43 p.
30. *Simonin D., Pierce C., Roberts N., Ballard S.P., Lia Z.* Performance of Met Office hourly cycling NWP-based nowcasting for precipitation forecasts. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2017, vol. 143, pp. 2862-2873.
31. *Sun J., Xue M., Wilson J.W., Zawadzki I., Ballard S.P., Onvlee-Hooimeyer J., Joe P., Barker D.M., Li P.-W., Golding B., Xu M., Pinto J.* Use of NWP for nowcasting convective precipitation: recent progress and challenges. *BAMS*, 2014, vol. 95, pp. 409-426.
32. *Tapiador F.J., Roca R., Del Genio A., Dewitte B., Petersen W., Zhang F.* Is precipitation a good metric for model performance? *BAMS*, 2019, vol. 100, pp. 223-233. DOI:10.1175/BAMS-D-17-0218.1.
33. *Thompson P.D.* How to Improve Accuracy by Combining Independent Forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 1977, vol. 105, pp. 228-229.
34. *Woodcock F., Engel C.* Operational Consensus Forecasts. *Weather and Forecasting*, 2005, vol. 20, pp. 101-111.
35. *WMO Manual on the Global Data-processing and Forecasting System. Volume I (Annex IV to WMO Technical Regulations). Global Aspects.* WMO-No. 485, Updated in 2017.
36. *WMO Guidelines for Nowcasting Techniques.* WMO-No. 1198. 2017. 82 p.

Поступила в редакцию 24.10.2019 г.

Received by the editor 24.10.2019.