

ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СИЛЬНЫХ ЛЕТНИХ ОСАДКОВ

А.А. Алексеева

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
alekseeva@metcom.ru*

Введение

Период конца XX– начала XXI вв. ознаменовался в метеорологии в мировом масштабе заметными успехами гидродинамического моделирования и численного прогнозирования атмосферных процессов, особенно в области создания негидростатических мезомасштабных моделей, способных воспроизводить конвекцию непосредственно без использования каких-либо процедур параметризации, применяемых в гидростатических моделях. Разрешающая способность сетки моделей, порядка 1 км, позволяет моделировать характерное кучево-дождевое облако горизонтальным и вертикальным размером ~ 10 км, а разрешение сетки несколько сот метров – эволюцию скоплений таких облаков. Вычислительная техника в ведущих мировых научных центрах позволяет использование такого горизонтального разрешения мезомасштабных моделей в практических целях.

В России базовая прогностическая мезомасштабная модель COSMO-Ru в настоящее время внедрена в практику решением ЦМКП Росгидромета с разрешением по горизонтали 7 км [12, 13, 28]. Версия этой модели с разрешением 2,2 км проходит оперативные испытания в рамках «Плана испытания новых и усовершенствованных методов (технологий) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов Росгидромета» на 2013 и 2014 гг. [70]. Модель WRF-ARW с горизонтальным разрешением 10 км также включена в испытания в рамках вышеупомянутых Планов Росгидромета. Вариант этой же модели с разрешением по горизонтали 0,6 км используется для прогноза сильных дождей и порывов ветра для ограниченной территории, например Северного Кавказа, в исследовательских целях. Согласно результатам испытаний моделей в России [5], мезомасштабные модели довольно точно прогнозируют метеорологические параметры атмосферных процессов с временной дискретностью один час. Главная же цель таких моделей – добиться качества (точности) прогнозов опасных явлений погоды (включая очень сильные ливни), сопровождающихся для разных отраслей хозяйствования значительным ущербом и нередко угрожающих жизни людей, необходимого для оперативного прогнозирования и превентивных мер. Эта цель пока не достигнута. Не решена эта задача и в других странах. Поэтому в последние десять-

пятнадцать лет должное внимание ученые всего мира уделяют исследованиям в области мезомасштабного моделирования конвективных атмосферных процессов и прогноза сильных ливней, града, а также порывов скорости ветра при шквалах.

Совершенствование подходов прогнозирования значительных осадков в мировой практике

В последние 10–15 лет совершенствование подходов к прогнозированию значительных осадков в мировой практике проводится во многих направлениях. Вкратце рассмотрим их.

Исследование возможности гидродинамических моделей различного пространственного разрешения прогнозировать количество осадков, в т.ч. сильных ливней, над территорией разных стран (Великобритании, Италии, Канады, Франции, Швейцарии, США, Германии, Японии, России) [9, 43, 46, 57, 65]. Например, сравнение прогнозов количества осадков над Великобританией оперативными численными моделями Канады, Германии, Японии, США, Великобритании (ЕЦСПП) [43] показало, что все модели преувеличивают число случаев с осадками. Наиболее успешно прогнозируются моделями осадки количеством ≥ 2 мм/день. Прогнозируемые осадки сравнивались с радиолокационными данными об осадках. Оценивались смещенность прогностических полей осадков и индекс критического успеха (успешность, ложные тревоги).

Сравнение прогнозов осадков мезомасштабными моделями Италии, Канады, Франции и Швейцарии [57] показало, что точность расчета сильных осадков больше меняется для различных случаев, чем для разных моделей для конкретного случая.

Исходя из анализа обзора работ данного направления исследований, можно сделать выводы:

- точность прогнозов сильных осадков больше меняется для различных случаев, чем для разных моделей сравнимого пространственного разрешения для конкретного случая;
- все гидродинамические модели на грубых сетках с параметризацией конвекции прогнозируют завышенные осадки в тропиках и заниженные во внетропических широтах. Этому недостатка лишена модель NICAM (Япония) [65];
- осадки в моделях имеют большую частоту («ложные тревоги»), чем измеренные (\sim в 2 раза), но меньшую интенсивность (\sim в 1,3–1,9 раза) [65];
- гидродинамические модели, используемые в России (включая мезомасштабные модели), достаточно точно прогнозируют факт выпадения осадков, но с недостаточной для практики точностью прогнозируют сильные осадки [6].

Моделирование осадков при отключенной и включенной параметризации конвекции. Результаты ряда исследований показывают, что при отключенной параметризации конвекции прогноз осадков в моделях менее точен. Например, такие исследования [49] проводились с версиями модели MM5 (три вложенные сетки: 24, 8 и 2 км) над территорией Афин. При этом использовалась параметризация конвекции – схема Каина и Фритша (1993 г.). При отключенной параметризации конвекции даже на сетке с разрешением 2 км ливни прогнозировались плохо. При включении параметризации конвекции качество прогнозов заметно улучшалось.

Исследование чувствительности прогноза осадков к выбору схем параметризации конвекции. Например, такие исследования [69] проводились на Тайване с использованием четырех схем параметризации конвекции в модели MM5: Антеса-Куо, Беттса-Миллера, Грела и Каина-Фритша. Шаг сетки модели 45 и 15 км. Исследования показали, что ни одна из четырех схем параметризации не превосходит другую при прогнозе осадков. Аналогичные исследования для теплых периодов проводились в Греции [53]. При использовании любой из трех схем параметризации конвекции: Антеса-Куо, Аракавы-Шуберта и Каина-Фритша завышается количество при прогнозе слабых и средних осадков и занижается при прогнозе сильных осадков.

Выбор оптимального, на взгляд исследователей, набора схем параметризаций конвекции, микрофизических процессов, погранслоя и др. для конкретных территорий. Качество прогноза осадков при этом повышается, считают в [9, 10, 49]. Например, в модели WRF-ARW [9, 10] используется такой набор: параметризация микрофизических процессов – схема Томпсона и др., учитывающая все основные процессы, происходящие в облаках и осадках в смешанной фазе; параметризация конвекции Каина-Фритша. Как показали исследования, другие параметризации играют меньшую роль в моделировании конвекции. Расчет подсеточной турбулентности в данной версии модели производится с использованием схемы расчета турбулентности кинетической энергии. Расчет потоков длинноволновой радиации – с использованием схемы Млоуера и др., коротковолновой радиации – схема Дудья. При параметризации погранслоя – схема Меллора-Ямады-Янича. При параметризации приземного слоя – схема Eta. При параметризации процессов поверхности суши и в почве – схема Noah.

В модели MM5 [49], например, используется такой набор: параметризация микрофизических процессов – схема Шульца (1995г.), параметризация конвекции – схема Каина-Фритша (1993г.), параметризация погранслоя – Хонга и Пана (1996г.).

Исследования по модификации схем параметризации конвекции [39, 44, 48]. Например, десятилетние исследования по модификации параметризации конвекции Каина-Фритша [48] привели к повышению качества прогноза конвекции. Другой пример, на базе параметризации конвекции Грела (1993–1994 гг.) (разные варианты методов учета скорости вовлечения и истечения из кучево-дождевого облака, потока массы в восходящих и нисходящих течениях, конвергенции влаги и т.д.) [44] создана серия подансамблей в каждом блоке параметризации, на которые возлагают надежды по уточнению прогноза конвекции.

Оценка роли механизмов возбуждения глубокой конвекции. Исследования точности прогнозирования ливневых осадков в модели NCEP с шагом сетки 10 км с использованием двух схем параметризации конвекции: Беттса-Миллера-Янича и Каина-Фритша, для двадцати теплых сезонов проводились в зависимости от крупномасштабного возбуждения конвекции [42]. Рассматривалось возбуждение такими крупномасштабными характеристиками, как дивергенция на уровне 200 гПа, адвекция вихря на 500 гПа, вертикальные упорядоченные движения на уровне 700 гПа, адвекция тепла на 850 гПа, приземный фронтогенез. Показано, что точность прогноза ливневых осадков более чувствительна к возбуждению в нижней атмосфере. Прогнозы осадков точнее при больших значениях индекса CAPE, хотя параметризация Беттса-Миллера-Янича менее чувствительна к величине CAPE, чем параметризация Каина-Фритша.

Создание ансамблей путем комбинирования различных схем параметризации, методов (моделей) [44, 69]. Использование на Тайване ансамбля из четырех вариантов модели MM5 (шаг сетки модели 45 и 15 км), отличающихся схемами параметризации конвекции [69]: Антеса-Куо, Беттса-Миллера, Грела и Каина-Фритша, показало наиболее высокие индексы критического успеха при осадках $\geq 0,25$ мм, чем при использовании каждого из этих вариантов в отдельности. Оптимальный подбор методов (моделей) в ансамбле дает повышение качества прогнозов факта осадков. При этом, как правило, переоценивается количество осадков малой интенсивности и недооценивается количество осадков большой интенсивности. Аналогичный подход используется в России А.Н. Багровым и В.А. Гординым [5, 6, 70] при прогнозе осадков комбинируются модели в ансамбле.

Использование набора ансамблей. Так, в работе [60] исследуются ансамбли, члены которых отличаются

- только начальными данными об осадках;
- параметризацией конвекции;
- набором моделей в ансамбле;

- используемым объективным анализом;
- использованием регрессионной модели с введением весовых коэффициентов моделей (SEK).

Кроме того, берется ансамбль, одновременно учитывающий все перечисленные конфигурации прогноза.

Использование разных моделей в ансамбле, а также одновременное использование всех конфигураций прогноза, дает возможность более точного прогнозирования осадков, чем использование ансамблей, отличающихся начальными данными об осадках и параметризацией конвекции. В первом случае осадки переоцениваются, во втором – недооцениваются. Для преодоления проблемы смещенности прогностических осадков относительно фактических наиболее эффективным является использование процедуры применения весовых коэффициентов моделей (SEK).

В другом исследовании [58] ансамблевого краткосрочного прогноза сильных осадков в Европе на ограниченной территории первый ансамбль представляет неопределенность в начальных и граничных условиях. Ансамбль создается по (50+1) прогонов модели ЕЦСПП. Из этих прогонов выбирается (5+1) член на основе накопленных осадков на рассматриваемой территории. Второй ансамбль создается из серии прогнозов с различными схемами параметризации конденсации и конвекции (4+1 член). Как показали эксперименты, оба ансамбля имеют малый разброс. Ансамбль с различными схемами параметризации имеет больший разброс в прогнозе осадков, чем ансамбль, состоящий из прогнозов ЕЦСПП.

Усвоение дополнительных начальных данных в гидродинамических моделях: радиолокационных, доплеровских данных измерений о радиальном влагозапасе столба воздуха и ветре, данных лидарных измерений, микроволновых измерений со спутников, наземных наблюдений [41, 42, 50, 55, 59, 60, 63, 67, 68]. Показано, что усвоение спутниковых, радиолокационных и доплеровских измерений улучшает прогноз осадков. Привлечение наземных данных, как показали указанные исследования, не дало заметного повышения качества прогноза ливней.

Так, в работе [68] исследовалось влияние усвоения оценок осадков по спутниковым ИК и микроволновым измерениям (геостационарный спутник и спутник TRMM) на прогноз ливней моделью NCEP с сеткой 4 км и моделью MM5 (с блоком 4-мерного усвоения данных) с сетками 20 и 30 км на юго-западе США. Получено, что усвоение данных об осадках со спутников повышает качество их прогноза: коэффициент корреляции увеличивается с 0,29 до 0,55 при прогнозе с заблаговременностью 6 ч; с 0,33 до 0,47 – с заблаговременностью 12 ч. Следует заметить, что изменение разрешения сетки заметно не

сказалось на качестве прогноза осадков. При прогнозе с заблаговременностью 6 ч лучше использовать период усвоения 3 ч, а при прогнозе с заблаговременностью 12 ч – период усвоения 6 ч.

В работе [67] исследовалось влияние усвоения доплеровских скоростей на прогнозы модели MM5 в случае интенсивных осадков. В региональной системе вариационного усвоения усваивались данные о радиальном ветре с радиолокатора (10 см, разрешение 1 км и 1° по азимуту, радиус измерения доплеровских скоростей 240 км). Усваивался инкремент вертикальной скорости и радиальной скорости. Усвоение радиолокационных данных улучшило прогноз осадков с заблаговременностью 6 ч и прогноз ветра. В этом случае лучше воспроизводится структура осадков. В [59] приводятся результаты влияния усвоения радиального ветра и данных об осаждаемом водяном паре на прогноз сильных осадков в Японии.

В [50] исследовалось влияние четырехмерного вариационного усвоения данных на прогноз сильных осадков в Японии моделью NHM Японского метеорологического агентства (негидростатическая модель) с разрешением 2 и 5 км и с большим шагом сетки (гидростатическая модель). В системе усвоения использовались данные доплеровских локаторов о радиальном ветре, информация о влагозапасе столба воздуха по измерениям на станциях GPS и наземные наблюдения. Без усвоения доплеровских измерений и данных о влагозапасе сильные осадки не воспроизводились, с усвоением – воспроизведены осадки с близкой интенсивностью. Усвоение наземных данных не дало заметного вклада в повышение качества прогнозов осадков.

В работе [63] используется метод WVC (поправка на водяной пар) для усвоения радарной отражаемости в NWP модели COSMO (LM, версия 3.18) с горизонтальным шагом 2,8 км. Метод WVC учитывает различия между модельными и полученными с помощью радара осадками путем преобразования вертикальных профилей отношения смеси водяного пара в каждом модельном шаге.

Исследовалось также влияние улучшения объективного анализа на прогноз осадков [42] за счет включения дополнительных приземных данных с мезосети и исправления поля влажности с учетом радиолокационных данных.

Использование аналоговых методов приближения – статистической адаптации выходных модельных данных об осадках [21, 26, 54], что повышает качество прогнозов осадков.

Эксперименты на сетках с разным разрешением (до 1 км) и прямым моделированием конвекции. Такие эксперименты проводятся с разными моделями, но они

пока немногочисленны и получающиеся у разных авторов выводы не единодушны. Так, например, в работе Котрони и Лагувардоса [49], где изложены результаты экспериментов с моделью MM5, отмечается, что переход на сетку с разрешением 2 км и прямым расчетом конвекции не улучшил качество прогнозов осадков в окрестностях Афин. В работе же Лю и Монкрифа [51], где также проводились эксперименты с моделью MM5 на сетке с горизонтальным разрешением 3 км и прямым расчетом конвекции, был сделан вывод, что прогноз конвективных систем над территорией США стал более точным, чем при расчете на сетке с горизонтальным разрешением 10 км и применением трех наиболее популярных параметризаций конвекции. Аналогичные результаты были получены в экспериментах с моделью NHM Японского метеорологического агентства по моделированию катастрофического ливня (111 мм/ч) в Токио [50]. Переход к расчетам на сетке с шагом 2 км и прямому моделированию конвекции позволил существенно повысить качество прогноза этого ливня.

Похожая задача: оценить преимущество (или недостатки) воспроизведения конвекции путем перехода к расчетам на более мелких сетках решалась в экспериментах Н.Ф. Вельтищева и В.Д. Жупанова с моделью WRF-ARW, результаты которых изложены в [10]. Получено, что

- WRF-ARW с шагом 1 км воспроизводит конвективные системы с мезомасштабной организацией, которые не противоречат структурам облачного покрова и радиоэха, наблюдаемым на изображениях с геостационарного спутника и при радиолокационных измерениях. Время возникновения и затухания конвекции воспроизводится достаточно успешно;

- осадки лучше прогнозируются по мере увеличения разрешения модели по горизонтали и особенно при отказе от параметризации конвекции (переходу к ее прямому моделированию);

- резкие усиления ветра невозможно спрогнозировать при использовании параметризации конвекции;

- при непосредственном моделировании конвекции с шагом 3 км и 1 км несколько завышены суммы осадков. Для решения данной проблемы необходимо добавить вязкости при работе модели в конвективном режиме;

- хуже всего прогнозируется положение конвективных систем в пространстве. Для преодоления данной проблемы необходимо использовать измерения доплеровских локаторов.

Осадки лучше прогнозируются при отказе от параметризации конвекции (при переходе к ее прямому моделированию), подтверждается, как было сказано выше, и в [50]

Исследование зависимости точности прогноза осадков от особенностей выбранной параметризации микрофизических процессов [47]. Исследовались две параметризации микрофизических процессов: Линя и WSM6 в модели WRF-ARW. В обеих параметризациях микрофизических процессов одни и те же гидрометеоры: облака в жидкой и кристаллической фазах, дождь, снег и крупа. Важные отличия: формирование микрофизических процессов в кристаллической фазе и в коэффициентах формулы для расчета гравитационного оседания крупы. У Линя – в два раза больше. Получено, что различия в скорости оседания крупы играют большую роль. Меньшая их скорость в WSM6 уменьшает интенсивность осадков и сохраняет большую ледность и водность облаков. Поэтому более плотная облачность в параметризации WSM6 оказывает большее влияние на пространственное перераспределение радиации, достигающей поверхности Земли, а это приводит к изменению пространственного положения конвекции.

Исследование влияния на точность прогноза осадков использования индекса динамического состояния, как динамического порогового параметра при прогнозировании осадков [40]. Также исследовалась прогностическая значимость динамических факторов генерации осадков [33].

Продолжается разработка **концепции 3-х мерной модели осадкообразующего конвективного облака и численное моделирование сильных ливней** [16, 17].

Развивается направление исследований по **предупреждению** о сильных ливнях для разных территорий **на основе спутниковой информации** [7, 29, 68].

Востребованы на практике **вероятностные прогнозы** осадков [25, 34, 56, 62]. Для прогнозирования конвективных явлений используются **индексы конвекции** [18]. Продолжает развиваться **прогнозирование** количества осадков **на основе синоптической информации** [8, 19, 30]. Исследуются **процессы образования осадков** в конвективных облаках [36]. Ряд работ посвящено совершенствованию прогноза осадков в горных районах **за счет усвоения более точного рельефа** [52] и **специфического режима увлажнения** [31].

Поскольку краткосрочное прогнозирование не дает нужных результатов точности прогноза сильных осадков, активно развивается **сверхкраткосрочное прогнозирование** сильных осадков [20, 38, 45, 61]. Заслуживает внимания система предупреждений о конвективных явлениях в США, предусматривающая перспективы до 2020 г. [64].

Как видим, исходя из обзора научных работ с 2001 г. до настоящего времени, во всем мире делаются попытки решить проблему прогноза сильных осадков, используя

многочисленные подходы. Ученые признают, что проблема не решена, хотя сделано немало попыток ее решения. Как видно, благодаря развитию мезомасштабных моделей появилось больше возможностей исследования развития зон активной конвекции с сильными осадками и их моделирования.

Поскольку проблема модельного прогноза сильных осадков не решена, в России до сих пор в оперативной практике прогнозирования используются подходы, разработанные ранее [например 22, 23, 32, 37]. Они базируются на данных радиозондирования атмосферы, расчет прогнозов, как правило, производится вручную, занимая много времени в век практически полной автоматизации. В некоторых региональных службах прогнозирования данные подходы реализуются на выходных данных современных гидродинамических моделей. Следует заметить, что до 1969 г. количественный прогноз осадков в России не составлялся. Первые результаты по разработке таких методов прогноза в России были получены в 1964 г.

В разработанных количественных физико-статистических методах прогноза используется две модели осадкообразования. В первой модели осадки рассматриваются как результат псевдоадиабатического охлаждения, при котором вся влага конденсируется при температуре насыщения и высвобождается непосредственно в форме осадков [22, 23]. Эта модель до сих пор является основополагающей во многих методах прогноза осадков, разработанных и используемых в оперативной практике синоптиков России. Во второй модели осадкообразования считается, что образование ливневых осадков происходит за счет накопления крупных капель в зоне аккумуляции и обрушения накопившейся воды вследствие того, что вес ее превысил подъемную силу, создаваемую восходящими потоками в облаке [32, 37]. Эта модель является базовой в исследованиях Высокогорного геофизического института.

В настоящее время установлено [14, 15, 24], что не все количество сконденсированной в облаке влаги выпадает в виде осадков. Этот фактор не учитывается в первой модели осадкообразования. Во второй модели количество осадков однозначно определяется максимальной скоростью восходящего потока в облаке или мощностью облака [32].

Наряду с указанными выше подходами для прогноза осадков также используются статистические методы прогноза, разработанные как ранее, так и адаптированные к выходным данным современных гидродинамических моделей [1, 25], а также методы статистической интерпретации гидродинамических прогнозов.

Сильные ливни также прогнозируются на основе использования радиолокационной и спутниковой информации [29]. Физическая основа осадкообразования едина, разнятся лишь способы вычисления параметров атмосферы, через которые воспроизводится процесс.

В последнее десятилетие в ФГБУ «Гидрометцентр России» совершенствуется подход прогноза сильных летних дождей, базирующийся на второй модели осадкообразования [32]. Учитывается вышеуказанный недостаток данного подхода. Какое количество сконденсированной в облаке влаги выпадет в виде осадков, определяется коэффициентом генерации осадков. Во внедренном решении ЦМКП Росгидромета от 4 апреля 2006 г. методе прогноза максимального количества осадков коэффициент генерации осадков рассчитывается по эмпирической зависимости от упорядоченных крупномасштабных вертикальных движений на уровне 850 гПа [1, 3, 27]. В усовершенствованном варианте данного метода коэффициент генерации осадков рассчитывается через его зависимость от среднего значения дефицита точки росы в слое 850–700 гПа, что позволяет сократить число «ложных тревог» из-за ошибок в прогнозе скорости крупномасштабных вертикальных движений, правильность прогноза которых сложно проверить.

Кроме того, в рамках данного направления разработаны два метода альтернативного прогноза: ливней в градации ≥ 50 мм/12ч (ОЯ) (внедренного в практику решением ЦМКП Росгидромета от 4 апреля 2006 г.) и сильных ливней в трех градациях: ≥ 11 мм/12ч, ≥ 35 –49 мм/12ч и ≥ 50 мм/12ч (внедренного в практику решением ЦМКП Росгидромета от 2 марта 2011 г.) [2].

Как показали результаты испытаний указанных методов [2], они имеют достаточно высокую предупрежденность, но существует проблема достаточно большого количества «ложных тревог». В направлении сокращения числа «ложных тревог» при сохранении достигнутой предупрежденности ведутся исследования в настоящее время [4].

Заключение

Подводя итоги данного исследования, можно сделать вывод, что проблема прогноза сильных летних дождей с достаточной для практики точностью не решена в мировой практике. Развитие гидродинамических моделей мезомасштаба открывает новые возможности для исследования данной проблемы. Но остается открытым вопрос, какое пространственное разрешение моделей является оптимальным для прогноза сильных летних дождей. Как показывает приведенный обзор литературы, так и результаты верификации прогнозов сильных осадков [6] применяемыми в России моделями разного разрешения, мезомасштабные модели с пространственным разрешением порядка 1–2 км также не решили данную проблему. Необходимы дальнейшие исследования, которые бы на большой выборке доказывали преимущество отказа от параметризации конвекции в моделях в пользу ее прямого моделирования. Как видно, нет однозначного ответа, какая параметризация

конвекции лучше себя зарекомендовала при прогнозе таких осадков. Остается открытым и вопрос выбора оптимального варианта набора параметризаций атмосферных процессов в конкретной гидродинамической модели.

Учет новых данных об атмосфере, полученных на основе спутниковых, радиолокационных, в т.ч. доплеровских радиолокаторов, в объективном анализе и инициализации гидродинамических моделей приводит к повышению точности прогноза сильных летних дождей.

Как показывают результаты исследований, прогнозы сильных летних дождей очень чувствительны даже к сроку отсечения данных для оперативного объективного анализа, с которого стартует модель. При этом может измениться не только место возникновения, но и прогнозируемая интенсивность конвективного явления. На взгляд автора статьи, к ошибкам в прогнозе сильных летних осадков приводит также не учет особых точек радиозондирования атмосферы в объективном анализе, которые в отдельных случаях могут приводить к изменению состояния конвективной устойчивости атмосферы. Кроме того, важным вопросом является сглаживание приземной влажности в объективном анализе. Высокая фактическая приземная влажность, являющаяся признаком возникновения опасных конвективных явлений в условиях неустойчивости, часто сглаживается в объективном анализе, т.е. уже на уровне объективного анализа сглаживаются процессы, приводящие к сильным ливням.

Очень важным является точность прогнозирования моделями приземных температуры и влажности, которые являются определяющими при расчете конвективной неустойчивости.

На взгляд автора статьи, важным также является выбор модели осадкообразования. Если осадки рассматриваются как результат псевдоадиабатического охлаждения, то это больше относится к обложным осадкам. В этом случае вертикальные скорости на порядок меньше, чем в случае конвективных осадков. В модели осадкообразования, когда считается, что образование ливневых осадков происходит за счет накопления крупных капель в зоне аккумуляции и обрушения накопившейся воды вследствие того, что вес ее превысил подъемную силу, создаваемую восходящими потоками в облаке, рассчитанные максимальные конвективные скорости правильно отражают развитие зон активной конвекции с сильными осадками. Но в этом случае необходимо более точно учитывать вовлечение при подъеме воздуха, наличие инверсий в нижней тропосфере, и в таком подходе особенно важна точность прогноза приземных температуры и влажности воздуха.

Краткосрочные автоматизированные прогнозы сильных летних дождей необходимо уточнять сверхкраткосрочными прогнозами и наукастингом на основе спутниковой,

радиолокационной и специально обработанной и обчисленной мезосинооптической информации, а также используя опыт синоптика, накопленный при прогнозировании в определенных физико-географических условиях.

Таким образом, поскольку на сегодняшний день пока не решена проблема гидродинамического модельного прогноза сильных дождей с необходимой для практики точностью, рано отказываться от использования и развития физико-статистических, статистических и синоптико-статистических подходов в решении данной задачи, а также от применения постпроцессинга модельных прогнозов осадков.

Список использованных источников

1. *Алексеева А.А.*, Лосев В.М., Песков Б.Е., Васильев Е.В., Никифорова А.Е. Прогноз развития зон активной конвекции с особо опасными явлениями на основе региональной модели Гидрометцентра России // 80 лет Гидрометцентру России. – М.: Триада, лтд, 2010. – С. 147–159.

2. *Алексеева А.А.*, Лосев В.М., Багров А.Н. Результаты испытания автоматизированного метода прогноза осадков с детализацией интенсивности в трех градациях (от 11 до 34, от 35 до 49, 50 мм/12 ч и более) на основе выходных данных региональной модели с заблаговременностью 12 и 24 ч // Информационный сборник № 39 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2012. – С. 49–60.

3. *Алексеева А.А.* Методы прогноза максимального количества осадков в зонах активной конвекции и альтернативного прогноза сильных ливней и шквалов // Информационный сборник № 34 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2007. – С. 49–69.

4. *Алексеева А.А.*, Лосев В.М. Прогноз сильных летних дождей на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России // Труды Гидрометцентра России. – 2014. – Вып. 351 (см. настоящ. журнал).

5. *Багров А.Н.* Сравнительная оценка успешности прогнозов элементов погоды на основе ряда отечественных и зарубежных моделей атмосферы различного масштаба (в период с апреля по сентябрь 2011 года) // Информационный сборник № 39 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2012. – С. 69–79.

6. *Багров А.Н.* Сравнительная оценка успешности прогнозов сильных осадков с помощью моделей атмосферы различного масштаба // Информационный сборник № 41 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2014. – С. 63–73.

7. Бухаров М.В., Алексеева А.А. Диагноз возможных ливней и града по измерениям уходящего теплового излучения Земли со спутника NOAA // Метеорология и гидрология, 2004. – № 9. – С. 21–30.
8. Васильев А.А., Вильфанд Р.М. Прогноз погоды. – М.: Росгидромет, 2008. – 60 с.
9. 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.
10. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Эксперименты по численному моделированию интенсивной конвекции // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 9. – С. 30–44.
11. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Эксперименты по усвоению радиолокационной отражаемости в модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 3. – С. 5–19.
12. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинина И.А. Мезомасштабный краткосрочный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-RU // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 1. – С. 5–17.
13. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Система COSMO-RU негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 8. – С. 5–20.
14. Глушкова Н.И. Исследование взаимосвязи между различными параметрами кучево-дождевого облака для усовершенствования прогноза осадков // Труды Гидрометцентра СССР. – 1978. – Вып. 201. – С. 38–47.
15. Глушкова Н.И. Результаты исследований механизма образования сильных ливней и града // Труды Гидрометцентра СССР. – 1978. – Вып. 201. – С. 57–67.
16. Довгалоук Ю.А., Веремий Н.Е., Владимиров С.А., Дрофа А.С., Затевахин М.А., Игнатьев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С., Синькевич А.К., Стасенко В.Н., Степаненко В.Д., Шаповалов А.Р., Щукин Г.Г. Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака // Труды ГГО. – 2008. – Вып. 558. – С. 102–142.
17. Довгалоук Ю.А., Веремий Н.Е., Владимиров С.А., Дрофа А.С., Затевахин М.А., Игнатьев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С., Синькевич А.К., Стасенко В.Н., Степаненко В.Д., Шаповалов А.Р., Щукин Г.Г. Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака // Труды ГГО. – 2010. – Вып. 562. – С. 7–39.
18. Канухина А.Ю. Исследование возможности прогноза конвективных явлений с помощью индексов конвекции, рассчитанных по данным численной мезомасштабной модели // Ученые записки РГГМУ. – 2006. – № 2. – С. 86–94.
19. Кнутас А.В., Клименко Н.П., Чапилова С.Ф. Синоптический анализ мощных грозо-градовых процессов и возможности совершенствования их прогноза // Проблемы физико-математических наук: Материалы 46 научно-методической конференции преподавателей и студентов

«XXI век – век образования». – Ставрополь.: Изд-во Ставропольский государственный университет, 2001. – С. 123–130.

20. *Мешков А.В.* Сверхкраткосрочный прогноз интенсивности ливневых осадков в северо-западном районе Европейской территории России и Белоруссии: автореф. к.г.н. – Воронеж, 2001. – 17 с.

21. *Нападий В.Е., Крохин В.В.* О результатах испытания синоптико-статистического метода прогноза осадков по градациям (в том числе стихийных) по станциям Приморского края с заблаговременностью 1-3 суток) // Информационный сборник № 31 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2006. – С. 49–69.

22. *Орлова Е.М.* Расчет количества и продолжительности ливневых осадков // Труды Гидрометцентра СССР. – 1967. – Вып. 13. – С. 11–20.

23. *Орлова Е.М.* Краткосрочный прогноз атмосферных осадков. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 164 с.

24. *Пальмен Э., Ньютон Ч.* Циркуляционные системы атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 615 с.

25. *Переходцева Э.В.* Гидродинамико-статистический метод прогноза сильных летних осадков по ЕТР на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России // Информационный сборник № 41 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2014. – С. 74–88.

26. *Песков Б.Е., Дмитриева Т.Г.* Уточнение мезомасштабного численного прогноза сильных ливней развития // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 9. – С. 5–16.

27. *Песков Б.Е., Алексеева А.А., Никифорова А.Е.* Усовершенствование метода прогноза летних осадков развития // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 10. – С. 52–61.

28. *Ривин Г.С., И.А. Розинкина, А.Н. Багров, Д.В. Блинов.* Мезомасштабная модель COSMO-RU07 и результаты ее оперативных испытаний // Информационный сборник № 39 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2012. – С. 15–48.

29. РД 52.27.339-93. Руководство по диагнозу и прогнозу опасных и особо опасных осадков, града и шквалов по данным метеорологических радиолокаторов и искусственных спутников Земли. – М.: Росгидромет, 1996. – 180 с.

30. *Русин И.Н.* Синоптическая интерпретация данных при расчете ливневых осадков в горах. – СПб: Изд-во РГГМУ, 2003. – 218 с.

31. *Русин И.Н.* Влияние гор на формирование ливневых осадков. – СПб, Изд-во РГГМИ, 1997. – 59 с.

32. *Сулаквелидзе Г.К., Глушкова Н.И., Федченко Л.М.* Прогноз града, гроз и ливневых осадков. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 185 с.

33. Шакина Н.П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов. – Л. Гидрометеиздат, 1985. – 263 с.
34. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н. Диагноз и прогноз распределения вероятности осадков разной интенсивности // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 8. – С. 5–22.
35. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н. Иванова А.Р. Прогностическая значимость динамических факторов генерации осадков // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 5. – С. 31–44.
36. Шерхов А.Х. Исследование механизма процессов осадкообразования в конвективных облаках: автореф. к.ф.-м.н. – Долгопрудный, 2002. – 17 с.
37. Шишкин Н.С. Облака, осадки и грозовое электричество. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 392 с.
38. Cacic I., Jurcu V. Nowcasting – prognosa neposrednog razvoja vremena // Hrv. Meteorol. Cas. – 2002. – N 37. – P. 57–62.
39. Cheinet S. A multiple mass-flux parameterization for the surface-generated convection // J. Atmos. Sci.– 2003. – Vol. 60, N 18. – P. 2313–2327.
40. Claufnetzer A., Nevir P. Analysis of quantitative precipitation forecasts using the Dynamic State Index. Atmos // Res. – 2009. – Vol. 94, N 4. – P. 694–703.
41. Collier C.G., Illingworth A.J., Golding B.W. UWERN Report № 5: Quantitative precipitation forecasts // Eather. – 2002. – Vol. 57, N 2. – P. 59–68.
42. Gallus W. A., Jankov I. Convective systemrainfall forecast accuracy as a function of large-scale forcing // World Clim. Res. Programme. – 2003. Vol. 3, N 33. P. 05/12–05/13.
43. Goerber M., Milton S.F., Wilson C.A. WGNE assessment of quantitative precipitation forecasts from operational numerical weather prediction models over the U.K // World Clim. Res. Programme. – 2002. – N 32. –P. 02/07–02/08.
44. Grell G.A., Devenyi D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation technigues. Geophys // Res. Lett. – 2002. Vol. 29, N 14. P. 38/1–38/4.
45. Grose A.M.E., Smith E.A., Chung Hyo-Sang, On Mi-Lim, Sohn Byung-Ju, Turk F. J. Possibilities and limitation for quantitative precipitation forecastes using nowcasting methods with infrared geosynchronous satellite imagery // J. Appl. Meteorol. – 2002. Vol. 41, N 7. P. 763–785.
46. Haiden T. NWP research in Austria (Central Institute for Meteorology and Geodynamics) // World Clim. Res. Programme. – 2003. N 33. P. 05/14–0.5/15.
47. Hong Song-You, Sunny L. Kyo-Sun, Kim Ju-Hye, Lim Jeong-Ock Jade, Dudhia J. Sensitivity study of cloud-resolving convective simulations with WRF using two bulk microphysical parameterizations: ice-phase microphysics versus sedimentation effects // J. Appl. Meteorol. Climatol. – 2009. Vol. 48. N 1. P. 61–76.
48. Kain J. S. The Kain-Fritsch convective parameterisation: an update // J. Appl. Meteorol. – 2004. Vol. 43, N 1. P. 170–181.

49. *Kotroni V., Lagouvardas K.* Evaluation of MM5 highresolution real-time forecasts over the urban area of Athens, Greece // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* – 2004. Vol. 43, N 11. P. 1666–1678.
50. *Kowabata T., Seko H., Saito K., Kuroda T., Tamiya K., Tsuyuki T., Honda Y., Wakazuki Y.* An assimilation and forecasting experiment of the Nerima heavy rainfall with a cloud-resolving nonhydrostatic 4-dimensional variational data assimilation system // *J. Meteorol. Soc. Jap.* – 2007. Vol. 85, N 3. – P. 255–276.
51. *Liu C., Moncrieff M.W.* Sensitivity of cloud-resolving simulations of warm-season convection to cloud microphysics parameterizations // *Mon. Wea. Rev.* – 2007. Vol. 135, N 8. P. 2854–2868.
52. *Lynn B. H., Tao Wei –Kuo, Abramopoulos F.* A parameterization for the triggering of landscape-generated moist convection . Part. I. Analysis of high-resolution model results // *J. Atmos. Sci.* – 2001. – Vol. 58, N 6. P. 575–592.
53. *Mozarakis N., Kotroni V., Lagouvardos K., Argiriou A.A.* The sensitivity of numerical forecasts to convective parameterization during the warm period and the use of lightning data as an indicator for convective occurrence // *Atmos. Res.* – 2009. – Vol. 94, N 4. P. 704–714.
54. *Obled C., Bontron G., Garcon R.* Quantitative precipitation forecasts: A statistical adaptation of model outputs through an analogues sorting approach // *Atmos. Res.* – 2002. – Vol. 63, N 3–4. – P. 303–324.
55. *Papadopoulos A., Serpetzoglou E., Anagnostou E.* Improving NWP through radar rainfall- driven land surface parameters: A case study on convective precipitation forecasting // *Adv. Water Resour.* – 2008. – Vol. 31, N 11. – P. 1456–1469.
56. *Reggiani P., Weerts A.H.* Probabilistic quantitative precipitation forecast for flood prediction: an application // *J. Hydrometeorol.* – 2008. Vol. 9, N 1. – P. 76–95.
57. *Richard E., Cosma S., Benoit R., Binder P., buzzi A., Kaufmann P.* Intercomparison of mesoscale meteorological models for precipitation forecasting // *Hydrol. And Earth. Syst. Sci.* – 2003. Vol. 7, N 6. – P. 799–811.
58. *Sattler K., Feddersen H.* Study on limited-area short-range ensemble approaches targeted for heavy rain in Europe // *World. Clim. Res. Programme.* – 2003. N 33. – P. 05/28–05/29.
59. *Seko H., Kowabata T., Tsyuki T.* Data assimilation experiments of Nerima heavy rainfall. // *World. Clim. Res. Programme.* – 2005. – N 35. – P. 01/41–01/42.
60. *Shin D.W., Cocke S., Lakow T.E.* Superensemble precipitation forecasts using TRMM and DMSP satellite microwave imager products // *World. Clim. Res. Programme.* – 2002. – N 32. – P. 06/23–06/34.
61. *Silglaff J.M., Counce L.M., Pavolonis M.J., Heidinger A.K.J.* Nowcasting convective storm initiation using satellite based box-averaged cloud-top cooling and cloud-type trends // *J. Appl. Meteorol. and Climatol.* – 2011. – Vol. 50, N 1. – P. 110–126.
62. *Sokol Z., Kitzmiller D., Pesice P., Guan S.* Operational 0–3h probabilistic quantitative precipitation forecasts // *Atmos. Res.* – 2009. – Vol. 92, N 3. – P. 318–330.
63. *Sokol Z., Rezacosa D.* Assimilation of the radar derived water vapour mixing ratio, into the LM COSMO model with a high horizontal resolution // *Atmos. Res.* – 2009. – N 3. – P. 331–342.

64. *Stensrud D.J., Xue M., Wicker L.J., Kelleher K.E., Foster M.P., Schaefer J.T., Schneider R.S., Benjamin S.G., Weygandt S.S., Ferree J.T., Tuell J.P.* Convective-scale warm-on-forecast system // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* – 2009. Vol. 90, N 10. – P. 1487–1499.

65. *Stephens G.L., L'Ecuyer T., Forbes R., Gettleman A., Golaz J.C., Bodas-Salcedo A., Suzuki K., Gabriel Ph., Haynes J.* Dreary state of precipitation in global models // *J. Geophys. Res.* – 2010. – V. 115, N 24. – P. D 24211/1–D 24211/13.

66. *Tollerud E.I., Kertesz S.* A new heavy precipitation warning aid for Hungary // *IAHS Publ.* – 2001. – N 267. – P. 35–37.

67. *Xiao Q., Kyo Ying-Hwa, Sun J., Lee Wen-Chau.* Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3DVAR system: impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rain fall case // *J. Appl. Meteorol.* – 2005. – Vol. 44, N 6. – P. 768–788.

68. *Xu J., Gao X., Xiao Q., Sorooshian S.* Investigate the impacts of assimilating satellite rainfall estimates on rainstorm forecast over southwest United States // *Geophys. Res. Lett.* – 2004. – Vol. 31, N 16. P. 216104/1–216104/3.

69. *Yang Ming-Jen, Tung Quen-Chi.* Evaluation of rainfall forecasts parameterization schemes // *J. Meteorol. Soc. Jap.* – 2003. – Vol. 81, N 5. – P. 1163–1183.

70. <http://method.meteorf.ru/>

Поступила в редакцию 16.05.2014 г.