

ПРОГНОЗ СИЛЬНЫХ ЛЕТНИХ ОСАДКОВ НА ОСНОВЕ ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ РЕГИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ГИДРОМЕТЦЕНТРА РОССИИ

А.А. Алексеева, В.М. Лосев

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
losev@mecom.ru, alekseeva@mecom.ru*

Введение

Задача удовлетворительного для использования на практике прогноза сильных летних дождей, количеством 15 мм/12ч и более, до сих пор не решена. Даже в рамках приоритетного в настоящее время направления развития мезомасштабных моделей не удается добиться удовлетворительного решения проблемы. Причем это относится не только к моделям, используемым в оперативной практике России, не решена данная задача и в мировой практике прогнозирования. В России осадки прогнозируются в рамках двух глобальных моделей, региональной модели, нескольких вариантов модели WRF, мезомасштабной модели ФГБУ «Гидрометцентр России», модели COSMO-Ru и комплексным методом. Но, несмотря на столь обширный модельный прогностический материал по осадкам, как показано в [7], сильные осадки прогнозируются на территории России с недостаточной точностью. Плохо прогнозируются как максимумы осадков, так время и место их выпадения.

Кроме этого внедрен статистический метод прогноза осадков [14], а также физико-статистический метод прогноза сильных летних дождей с детализацией интенсивности в двух градациях (от 11 до 34 мм/12ч и 35 мм/12ч и более) с заблаговременностью 12 и 24 ч [5, 6], о котором далее и пойдет речь. Но прежде следует заметить, что на сегодняшний день необходимо развивать все подходы к прогнозированию сильных дождей, чтобы предсказывать их как можно точнее и чтобы была возможность предупредить об их возникновении и возможном ущербе заблаговременно.

Упомянутый внедренный решением ЦМКП Росгидромета физико-статистический метод прогноза сильных летних дождей с детализацией интенсивности в двух градациях (от 11 до 34 мм/12ч и 35 мм/12ч и более), реализованный на основе выходных данных региональной модели ФГБУ «Гидрометцентр России», показал при оперативных испытаниях высокую предупрежденность сильных дождей, но имеет достаточно большое количество лишних спрогнозированных случаев – «ложных тревог».

Поэтому в задачу данного исследования входило:

– исследование причин наличия в прогнозе сильных дождей «ложных тревог»;

- исследование возможности оптимизировать прогноз приземной температуры точки росы в региональной модели как важного метеорологического элемента для прогноза максимальной конвективной скорости и ливней;
- усовершенствование метода прогноза сильных дождей;
- проведение численных экспериментов по прогнозу сильных дождей;
- верификация прогнозов, рассчитанных усовершенствованным методом прогноза, и их сравнение с прогнозами, рассчитанными внедренным методом.

Рассматриваемый метод является комплексным, разработанным на основе двух внедренных ЦМКП Росгидромета методов прогноза: метода прогноза максимального количества полусуточных осадков и метода альтернативного прогноза ливней в градации опасных явлений (ОЯ) погоды. Комплексный метод также решением ЦМКП Росгидромета рекомендован к внедрению и внедрен в ФГБУ «Гидрометцентр России». Методы адаптированы к оперативной версии региональной модели [12], ежечасно генерирующей прогностические значения метеорологических элементов, с шагом сетки 75 км для всей России и 25 км для Южного федерального округа и Северного Кавказа.

Основы внедренных методов прогноза

При разработке *метода прогноза максимального количества конвективных осадков* использовались экспериментальные данные пювниографических наблюдений об интенсивности и количестве осадков, о верхней границе кучево-дождевых облаков к моменту начала выпадения осадков, измеренной с помощью метеорологического радиолокатора (МРЛ). Также использовались данные метеорологических наблюдений станций и постов, карты барической топографии [9].

Подробнее с внедренным методом прогноза максимального количества осадков можно ознакомиться в [3, 6]. Основой данного метода является определение количества прогнозируемых осадков по влагосодержанию облака с учетом того известного факта, что большая часть сконденсированной в облаке влаги остается в атмосфере и не участвует в осадкообразовании [13, 16]. Такой учет осуществляется с помощью коэффициента генерации осадков k_0 – отношения фактически выпавших осадков к общему количеству генерируемой облаком влаги.

Ранее в [11] получено, что интенсивность осадков J (мм/мин) из крупномасштабных облачных систем определяется произведением параметров: максимальной конвективной скорости W_m (м/с) и относительной площади, занятой конвективными ячейками в облаке,

$\Delta t_{л} / \Delta t$, где $\Delta t_{л}$ (мин) – продолжительность выпадения ливневого дождя, Δt (мин) – общая продолжительность дождя:

$$J = 0,024 \cdot W_m \frac{\Delta t_{л}}{\Delta t} \quad (\text{коэффициент корреляции } r = 0,8). \quad (1)$$

Коэффициент генерации осадков, согласно [9, 11], зависит от продолжительности выпадения ливневого дождя $\Delta t_{л}$, характеризующей горизонтальные размеры суммы конвективных ячеек, из которых выпадает основная масса осадков:

$$k_0 = 0,0055 \cdot \Delta t_{л} \quad (\text{коэффициент корреляции } r = 0,92). \quad (2)$$

Количество осадков определяется как

$$Q = J \cdot \Delta t. \quad (3)$$

Исходя из зависимости (2),

$$\Delta t_{л} = \frac{k_0}{0,0055}. \quad (4)$$

Подставив (1) и (4) в (3), получаем:

$$Q = 4,36 \cdot k_0 W_m, \quad (5)$$

где Q – количество осадков (мм) из крупномасштабной облачной системы.

Из проведенных ранее исследований [13] известно, что коэффициент генерации осадков для крупномасштабной и мезомасштабной облачности различен. В [11] масштаб облачности определяется по ИК-снимкам с ИСЗ по классификации, принятой в [15]. Коэффициент генерации осадков зависит от горизонтального и вертикального масштаба облачности, разности значений удельной влажности при насыщении на уровнях конденсации и конвекции [8]. Наибольший коэффициент генерации осадков – в циклонической облачности, наименьший – во внутримассовой [8, 9]. Различные значения коэффициента генерации осадков для разных типов облачности, по-видимому, связаны с различными размерами конвективных ячеек, характерных для данной облачности, из которой выпадают осадки. Из облаков одной и той же мощности и влагосодержания может выпасть разное количество осадков. Это объясняется разными условиями баланса влаги в кучево-дождевых облаках (Cb). Согласно [10, 13], баланс влаги в Cb зависит от зон крупномасштабной конвергенции. Упорядоченная вертикальная скорость τ мала на уровне моря и меняется монотонно до численного максимума на бездивергентном уровне. При ее среднем значении в слое от уровня моря до бездивергентного уровня $\bar{\tau} > 0$ наблюдается дивергенция на уровне моря, при $\bar{\tau} < 0$ – конвергенция. Этот вывод следует из уравнения неразрывности и граничного условия на уровне моря $\tau_0 = 0$.

Зависимость коэффициента генерации осадков от среднего значения упорядоченных вертикальных токов $\bar{\tau}$ [10]:

$$k_0 = 0,2 - 0,0053 \cdot \bar{\tau} \quad (\text{коэффициент корреляции } r = 0,76), \quad (6)$$

где $\bar{\tau}$ в гПа/12ч.

Таким образом, оказалось, что коэффициент генерации осадков зависит от вертикальной скорости синоптического масштаба.

Зависимость (5) с учетом зависимости (6):

$$Q = 4,36 \cdot W_m (0,2 - 0,0053 \bar{\tau}) \quad (\text{коэффициент корреляции } r = 0,99). \quad (7)$$

При $\bar{\tau} = 0$ гПа/12ч $k_0 = 0,2$, а при $\bar{\tau} = 38$ гПа/12ч $k_0 = 0$, т.е. осадки в этом случае из Сб не выпадают.

В случаях, когда дождь ливневого характера вносит основной вклад в общую сумму осадков, **максимальное количество осадков** рассчитывается как функция только максимальной конвективной скорости, и уравнение регрессии имеет вид:

$$Q = c \cdot W_m \quad (\text{мм/12ч}), \quad (8)$$

где c – эмпирический коэффициент.

При этом решение, по какой из зависимостей, (7) или (8), рассчитывать количество осадков, определяется пороговыми значениями влажности в слое 850–700 гПа (средним дефицитом точки росы), максимальной конвективной скорости, лапласиана приземного давления и вертикальных упорядоченных движений на уровне 850 гПа.

Ранее проведенные исследования [9] показали: при сильных ливнях чем больше величина максимальной конвективной скорости, тем меньше разница между максимальной и средней интенсивностью осадков, продолжительностью ливневой части дождя и общей продолжительностью дождя. В связи с этим в формулу для прогноза **максимального количества осадков** введен коэффициент на интенсивность конвекции $L = f(W_m)$, определенный из соотношения между максимальной и средней интенсивностями осадков, зависящих от максимальной конвективной скорости W_m .

Считается, что одну часть времени за дождь осадки выпадают с максимальной интенсивностью, а другую часть продолжительности осадков – со средней интенсивностью осадков. Для осадков со средней интенсивностью уравнения регрессии имеют, соответственно, вид:

$$Q' = 4,36 \cdot L \cdot W_m (0,2 - 0,0053 \bar{\tau}). \quad (9)$$

$$Q' = c \cdot L \cdot W_m. \quad (10)$$

Исследования, проведенные А.А. Акулиничевой [1], показали, что отношение продолжительности ливневой части дождя к общей продолжительности дождя характеризуется плотностью конвективных струй χ , средние значения которой для летних месяцев находятся в интервале 0,29–0,38.

С учетом этого параметра окончательная формула прогноза максимального количества осадков имеет вид:

$$Q_{\max} = Q \cdot \chi + Q' \cdot (1 - \chi). \quad (11)$$

Расчет максимального количества осадков физико-статистическим подходом производится с ежечасной детальностью, а затем на основе ежечасных данных прогнозируется количество осадков по полусуткам. Ежечасные прогнозы максимального количества осадков используются в рассматриваемом комплексном методе прогноза. Данный метод является основой прогноза осадков во всех градациях.

Альтернативный метод прогноза ливней градации ОЯ является уточняющим для градации осадков 50 мм/12 ч и более. Прогноз ливней в градации ОЯ осуществляется по дискриминантным функциям, позволяющим по набору признаков с помощью выбранного решающего правила определить, к какому классу относится рассматриваемый объект: к классу «ливни в градации ОЯ» или к классу «без ливней в градации ОЯ». Для оценки качества разделения классов использовались такие характеристики, как: выборочное расстояние Махаланобиса и предупреденность и оправдываемость каждого из классов.

Отбор предикторов, определяющих выпадение ливней в градации ОЯ, производился на основе физической сущности происходящего процесса, т.е. исходя из условий и механизма образования ливней в градации ОЯ. Так как главной причиной образования ливней в градации ОЯ является вертикальная неустойчивость атмосферы, мерой интенсивности поднятия восходящего воздуха за счет конвекции выбрана величина максимальной конвективной скорости W_m . Одним из основных факторов, влияющих на количество осадков, является влажность у поверхности Земли и степень увлажнения восходящего воздуха в слое тропосферы 850–700 гПа. Точка росы у поверхности Земли (Td_3) характеризует массовую долю влаги у поверхности Земли и влияет на высоту уровня конденсации. Степень увлажнения восходящего воздуха оценивается средним дефицитом влажности в слое 850–700 гПа ($\overline{d_{8,7}}$). Лапласиан приземного давления ($\nabla^2 P_3$) характеризует конвергенцию воздушных масс в нижнем слое тропосферы, благоприятствующую развитию суперячейковых кучево-дождевых облаков. Он косвенно определяет знак и модуль упорядоченных вертикальных движений на уровне 850 гПа, которые вносят вклад в интенсивность и количество осадков при ливнях в градации ОЯ. Наибольшая

информативность этих параметров подтверждена их ранжированием с помощью коэффициента точечно-биссеральной корреляции, который наиболее удобен для выявления связи между предикторами и двумя классами явлений, исключаящими друг друга.

Таким образом, прогностические дискриминантные функции для двух классов явлений: ливневых осадков с количеством ≥ 50 мм/12ч и без них $L_{я}$ и $L_{\bar{я}}$, имеют вид [4]:

$$L_{я} = 0,242 \cdot W_m + 1,621 \cdot Td_3 + 0,068 \cdot \nabla^2 P_3 + 0,475 \cdot \overline{d_{8,7}} - 18,0. \quad (12)$$

$$L_{\bar{я}} = 0,117 \cdot W_m + 1,425 \cdot Td_3 - 0,002 \cdot \nabla^2 P_3 + 0,618 \cdot \overline{d_{8,7}} - 12,4. \quad (13)$$

Прогноз ливней градации ОЯ осуществляется по наибольшей по значению функции.

В комплексном методе осадки в градации ОЯ (≥ 50 мм/12ч) прогнозируются, если одновременно рассчитанное количество осадков ≥ 50 мм/12ч и прогнозируются ливни градации ОЯ. Если одно из условий не выполняется, прогнозируются осадки в соседней градации – неблагоприятных явлений (НЯ) от 30 до 50 мм/12ч.

Исследование причин ложных тревог при прогнозе сильных осадков

Как уже указывалось выше, главным недостатком комплексного метода прогноза данным подходом является довольно большое количество «ложных тревог» сильных дождей при предупреденности явлений с заблаговременностью 12 ч 53–83 % и с заблаговременностью 24 ч 39–67 %. Частично к таким случаям относятся незафиксированные выпадающие осадки ввиду редкой сети наблюдений. Поэтому следующей задачей исследований было выявление причин прогноза «ложных тревог» явления.

Во-первых, исследовалось влияние на прогноз осадков приземной температуры точки росы. Данный параметр играет важную роль как при построении модели конвекции, а значит и расчете параметров конвекции, так и при прогнозе осадков, поскольку максимальная конвективная скорость W_m и приземная температура точки росы Td_3 являются предикторами прогностических уравнений. Во внедренных методах прогноза максимального количества осадков и ливней градации ОЯ приземная температура точки росы до сих пор прогнозируется по экспериментальной зависимости, полученной в [4], так как ее гидродинамическое модельное значение было недостаточного качества.

Исследование возможности оптимизации прогноза приземной температуры точки росы в региональной модели

Как уже говорилось выше, для более точного прогноза опасного конвективного явления важно как можно точнее спрогнозировать приземные температуру и влажность воздуха. Одной из этих задач – оптимизации прогноза приземной температуры точки росы в региональной модели, было посвящено данное исследование.

Ранее в региональной модели учет границ из внешней глобальной модели Exeter для влажности не проводился. Для других эволюционных переменных (U и V – составляющих ветра, T_s – температуры) проводился учет только на боковых границах, где они задавались как функции времени и затрагивали ближайший приграничный ряд, где производилось сглаживание по методу Миякоды.

Оптимизация прогноза приземной температуры точки росы Tds с учетом боковых и нижней границ:

– На каждом шаге по времени для Tds (также как ранее для приземной температуры T_s) задействованы несколько приграничных рядов, в каждом из которых шаговое приращение внешнего прогноза берется с весом λ , а модельного прогноза – $(1 - \lambda)$.

– Испытано несколько вариантов значений весового коэффициента шагового приращения внешнего прогноза λ от границ к центру области прогноза – остановились на значении $\lambda = 0,2$ в центральных областях прогноза.

Разработанный алгоритм предусматривает, что прогностические значения T_s и Tds к моментам времени, кратным 6 ч от начала прогноза, далеко не отходят от граничных значений прогноза Exeter, заблаговременностью на 12 ч больше, чем регионального прогноза.

Качество прогнозов T_s и Tds повысилось: RMS стало меньше на 1–1,5 °C, чем без учета нижних границ.

– Прогностические значения T_s ранее (с 2009 г.) и сейчас записываются в БД RGPR ФГБУ «Гидрометцентр России» и оцениваются А.Н. Багровым. Прогноз T_s по качеству сравним с прогнозом модели NCEP, но несколько хуже модели Exeter.

- Прогноз Tds , судя по табл. 1, улучшен в сравнении с вариантом без учета границ, однако относительная ошибка осталась сравнительно высокой (в некоторых случаях >1). Поэтому, с целью минимизации среднеквадратической ошибки, была проведена коррекция прогностических значений Tds .

Суть метода коррекции – нахождение оптимальной среднеквадратичной изменчивости исследуемой прогностической величины.

На обучающей выборке для каждого срока прогноза определяются:

– средние (характерные) значения коэффициента корреляции R между полями прогностической и фактической изменчивости;

– характерные значения отношения среднеквадратичных прогностической и фактической изменчивостей μ .

Можно показать, что при предположении, что в оперативном режиме величины R и μ будут примерно такими же, как в обучающей выборке, для минимизации среднеквадратической ошибки необходимо вектор прогностической изменчивости умножить на R/μ , т.е.

$$Td_{i,j}(h)k_{0r} = Td_{i,j}(0) + (Td_{i,j}(h) - Td_{i,j}(0)) \cdot R/\mu,$$

(на обучающей выборке получено $R/\mu = 0,575$). Более подробно суть коррекции изложена ниже.

Коррекция прогностических значений метеорологических величин на основе знания осредненных значений коэффициента корреляции между векторами прогностической и фактической изменчивостей и отношения их модулей из зависимой (обучающей) выборки для анализируемого метода прогноза

Пусть имеем прогноз метеорологической величины f в N точках (точка – станция или узел регулярной сетки) на некотором уровне (стандартный изобарический, поверхность Земли) с момента времени $t = 0$ до $t = \tau$. Обозначим f_i^0 – начальное значение функции f в i -ой точке ($i = 1, 2, \dots, N$), $\Delta f_{inn} = f_{inn}^\tau - f_i^0$ и $\Delta f_{i\phi} = f_{i\phi}^\tau - f_i^0$, соответственно, прогностическая и фактическая изменчивость за промежуток времени от 0 до τ .

И мы имеем обучающую выборку m прогнозов, в которых нам известна не только прогностическая, но и фактическая изменчивость. Обозначим $\overrightarrow{\Delta f_{np}}$ и $\overrightarrow{\Delta f_{\phi}}$ N -мерные векторы прогностической и фактической изменчивости соответственно; $\overrightarrow{\Delta f_{ош}} = \overrightarrow{\Delta f_{np}} - \overrightarrow{\Delta f_{\phi}}$ – вектор ошибки прогноза. В N -мерном ортогональном пространстве модуль вектора равен корню квадратному из суммы квадратов его компонент:

$$|\overrightarrow{\Delta f_{np}}| = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\Delta f_{inn})^2}; \quad |\overrightarrow{\Delta f_{\phi}}| = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\Delta f_{i\phi})^2} \quad (14)$$

(в дальнейшем $\sum_{i=1}^N$ будем обозначать просто \sum). Обозначим R – косинус угла между векторами $\overrightarrow{\Delta f_{np}}$ и $\overrightarrow{\Delta f_{\phi}}$. В N -мерном ортогональном пространстве он равен:

$$R = \left(\sum \Delta f_{inn} \cdot \Delta f_{i\phi} \right) / \left(|\overrightarrow{\Delta f_{np}}| \cdot |\overrightarrow{\Delta f_{\phi}}| \right). \quad (15)$$

Обозначим η – отношение модуля прогностической к модулю фактической изменчивости:

$$\eta = \left| \overrightarrow{\Delta f_{np}} \right| / \left| \overrightarrow{\Delta f_{\phi}} \right|. \quad (16)$$

Среднеквадратическая ошибка прогноза (обозначим её E) будет равна:

$$E = \sqrt{\sum (\Delta f_{inn} - \Delta f_{i\phi})^2 / N}. \quad (17)$$

Пусть имеем обучающую выборку m прогнозов, для которой найдены характерные (осреднённые по прогнозам) значения \bar{R} и $\bar{\eta}$. Предположим, что в новом прогнозе, в котором фактическое значение неизвестно, R и η равны, соответственно, \bar{R} и $\bar{\eta}$ (в дальнейшем «черту» над R и η опустим). Несложно показать, что, зная эти две величины, можно минимизировать ошибку нового прогноза умножением всех компонент вектора прогностической изменчивости Δf_{inn} ($i = 1, \dots, N$) на некоторый множитель α .

Распишем формулу (17) в виде:

$$\begin{aligned} N \cdot E^2 &= \sum (\Delta f_{inn} - \Delta f_{i\phi})^2 = \sum [(\Delta f_{inn})^2 + (\Delta f_{i\phi})^2 - 2 \cdot \Delta f_{inn} \cdot \Delta f_{i\phi}] = \\ &= \left| \overrightarrow{\Delta f_{inn}} \right|^2 + \left| \overrightarrow{\Delta f_{i\phi}} \right|^2 - 2 \cdot \sum \Delta f_{inn} \cdot \Delta f_{i\phi}. \end{aligned} \quad (18)$$

Напомним, что, согласно (15) и (16), $\frac{\sum \Delta f_{inn} \cdot \Delta f_{i\phi}}{\left| \overrightarrow{\Delta f_{np}} \right| \cdot \left| \overrightarrow{\Delta f_{\phi}} \right|} = R$; $\left| \overrightarrow{\Delta f_{np}} \right| = \eta \cdot \left| \overrightarrow{\Delta f_{\phi}} \right|$.

Пусть новый (скорректированный) вектор прогностической изменчивости

$$\overrightarrow{\Delta f_{np}^{(H)}} = \alpha \cdot \overrightarrow{\Delta f_{np}},$$

тогда модуль ошибки изменится, он станет функцией α .

Перепишем формулу (18):

$$\begin{aligned} N \cdot [E(\alpha)]^2 &= \sum (\Delta f_{inn}^{(H)} - \Delta f_{i\phi})^2 = \left| \overrightarrow{\Delta f_{inn}^{(H)}} \right|^2 + \left| \overrightarrow{\Delta f_{i\phi}} \right|^2 - 2 \cdot \sum \Delta f_{inn}^{(H)} \cdot \Delta f_{i\phi} = \\ &= \alpha^2 \cdot \left| \overrightarrow{\Delta f_{np}} \right|^2 + \frac{\left| \overrightarrow{\Delta f_{np}} \right|^2}{\eta^2} - 2 \cdot \alpha \cdot \sum \Delta f_{inn} \cdot \Delta f_{i\phi} = \\ &= \alpha^2 \cdot \left| \overrightarrow{\Delta f_{np}} \right|^2 + \frac{\left| \overrightarrow{\Delta f_{np}} \right|^2}{\eta^2} - 2 \cdot \alpha \cdot \left| \overrightarrow{\Delta f_{np}} \right| \cdot \left| \overrightarrow{\Delta f_{\phi}} \right| \cdot R \end{aligned}$$

или, с учетом (16), получим:

$$N \cdot [E(\alpha)]^2 = \left| \overrightarrow{\Delta f_{np}} \right|^2 \cdot \left(\alpha^2 - 2 \cdot \alpha \cdot \frac{R}{\eta} + \frac{1}{\eta^2} \right). \quad (19)$$

Продифференцировав выражение (19) по α и приравняв производную к нулю, получим значение $\alpha = \alpha_{onm}$, при котором модуль ошибки прогноза будет минимальным:

$$N \cdot \frac{d}{d\alpha} \{ [E(\alpha)]^2 \} = |\overrightarrow{\Delta f_{np}}|^2 \cdot \left(2 \cdot \alpha_{onm} - 2 \cdot \frac{R}{\eta} \right) = 0;$$

Откуда

$$\alpha_{onm} = \frac{R}{\eta}. \quad (20)$$

Подставив значение α_{onm} из (20) в (19), получим (с учётом, что $|\overrightarrow{\Delta f_{np}}|^2 = \eta^2 \cdot |\overrightarrow{\Delta f_{\phi}}|^2$):

$$N * [E_{\min}]^2 = \eta^2 * |\overrightarrow{\Delta f_{\phi}}|^2 * \left(\frac{R^2}{\eta^2} - 2 * \frac{R^2}{\eta^2} + \frac{1}{\eta^2} \right), \text{ или}$$

$$\varepsilon^2 = \frac{N * E^2}{|\overrightarrow{\Delta f_{\phi}}|^2} = 1 - R^2, \quad (21)$$

где ε – среднеквадратическая относительная ошибка прогноза.

Окончательно: если $\alpha = \alpha_{onm} = \frac{R}{\eta}$, то $\varepsilon = \varepsilon_{\min} = \sqrt{1 - R^2}$, $\overrightarrow{f_{np}^{(onm)}} = \frac{R}{\eta} \cdot \overrightarrow{f_{np}}$;

а, следовательно, $|\overrightarrow{f_{np}^{(onm)}}| = \frac{R}{\eta} \cdot |\overrightarrow{f_{np}}| = R \cdot |\overrightarrow{\Delta f_{\phi}}|$ или

$$\frac{|\overrightarrow{f_{np}^{(onm)}}|}{|\overrightarrow{\Delta f_{\phi}}|} = R, \quad (22)$$

т.е. прогноз оптимально сбалансирован, если модуль прогностической изменчивости удовлетворяет условию (22).

Следует отметить, что если среднеарифметическая ошибка обучающей выборки много меньше среднеквадратической ошибки, то $R = \overline{R}$ (осреднённый косинус угла между векторами фактической и прогностической изменчивостей) с большой точностью равен коэффициенту корреляции между этими векторами.

В таблице для примера приведены сравнительные оценки прогностических значений температуры точки росы для Центрального федерального округа (ЦФО) региональной модели без коррекции и с учетом коррекции для нескольких прогнозов. Как видно, с применением коррекции температура точки росы прогнозируется точнее (меньше относительная ошибка и RMS).

С дискретностью 6 ч данные регионального прогноза полей температуры точки росы и относительной влажности у поверхности Земли записываются в оперативную базу (RGPR) и доступны для потребителей.

Сравнительные оценки прогнозов температуры точки росы для региона ЦФО на выходе региональной модели без коррекции и с учетом коррекции для нескольких прогнозов

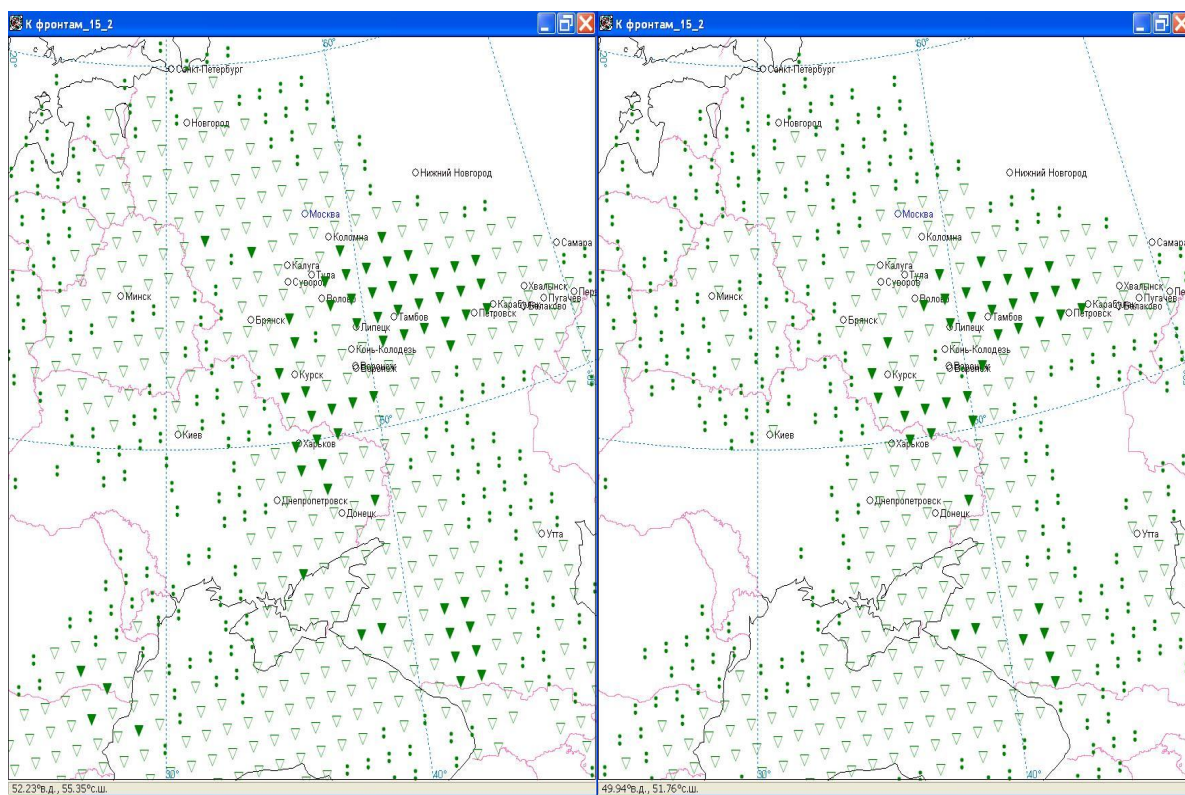
Исходный срок	Наличие коррекции	Относительная ошибка			RMS		
		Заблаговременность, ч					
		12	24	36	12	24	36
10.12.2012 0 ч ВСВ	нет	0,85	0,69	0,64	2,70	3,00	3,30
	есть	0,67	0,61	0,59	1,95	2,70	3,00
10.12.2012 12 ч ВСВ	нет	0,85	0,71	0,70	2,70	3,00	3,20
	есть	0,77	0,65	0,70	2,35	2,75	3,20
11.12.2012 0 ч ВСВ	нет	0,99	0,91	0,80	2,85	3,15	3,00
	есть	0,80	0,80	0,72	2,20	2,70	2,25
11.12.2012 12 ч ВСВ	нет	1,13	0,92	0,73	3,00	3,00	3,10
	есть	0,92	0,76	0,72	2,40	2,50	3,00

Примеры прогноза осадков комплексным методом на основе выходных данных региональной модели с прогнозом приземной температуры точки росы по эмпирической зависимости (а) и с использованием ее оптимизированного модельного прогноза (б) с заблаговременностью 12 ч на 15.06.2012 г. приведены на рис. 1.

Как видно (рис. 1 б), при использовании оптимизированного модельного прогноза приземной температуры точки росы прогнозируются меньшие по площади поля осадков и, в общем, прогнозируются осадки с более низкой интенсивностью по сравнению с вариантом прогноза приземной температуры точки росы по эмпирической зависимости (рис. 1 а).

В рамках данных исследований и по эмпирическим данным Б.Е. Пескова получено, что при прогнозе сильных осадков дополнительный учет предикторов влажности – оптимальных значений дефицита точки росы на уровне 850 гПа d_{850} (2–5 °С) и приземной точки росы ($Td_3 \geq 15$ °С) позволяет сократить количество «ложных тревог». В альтернативном методе прогноза ливней в градации ОЯ эти предикторы учтены, а их дополнительный учет в комплексном методе позволяет сократить количество «ложных» тревог в градации осадков от 15 до 50 мм/12ч при прогнозе максимального количества осадков. Это важно, так как повторяемость сильных летних осадков данной градации намного превышает их повторяемость в градации ОЯ, а значит, ошибки в прогнозе осадков данной градации вносят основной вклад в оценки точности прогнозов сильных осадков. Исследования показали, что ошибочные прогнозы («ложные тревоги») являются результатом недостаточной точности модельного прогноза скорости вертикальных упорядоченных движений, через которые определяется коэффициент генерации осадков. Исследования по расчету максимального количества осадков на основе использования при расчете коэффициента генерации осадков

влажности в слое 850–700 гПа проводятся в настоящее время, что, надеемся, приведет к более точному их прогнозу. На данный момент решено использовать оптимальные значения данных предикторов для уменьшения «ложных» тревог в комплексном альтернативном методе прогноза осадков в трех градациях.



а)

б)

Рис. 1. Прогноз осадков на основе выходных данных региональной модели с прогнозом приземной температуры точки росы по эмпирической зависимости (а) и с использованием ее оптимизированного модельного прогноза (б) с заблаговременностью 12 ч на 15.06.2012 г., где ■ - осадки в градации от 15 до 35 мм/12ч; ▽ - осадки в градации от 35 до 50 мм/12ч; ▽ - осадки в градации ≥ 50 мм/12ч.

На рис. 2 приведены примеры прогноза осадков с заблаговременностью 12 ч на 15.06.2012 г. с дополнительным учетом (а) предикторов влажности во внедренном методе и с дополнительным учетом предикторов влажности и оптимизированного модельного расчета температуры приземной точки росы (б).

Как видно из сравнения прогнозов осадков с дополнительным учетом предикторов влажности (рис. 2 а) с прогнозами без их учета (рис. 1 а), сокращение количества прогнозируемых случаев налицо. Сравнение прогнозов с дополнительным учетом предикторов влажности и оптимизированного модельного расчета температуры приземной точки росы (рис. 2 б) показывает, что еще уменьшается количество прогнозируемых случаев,

а также уточняется прогноз интенсивности осадков: в сторону ее уменьшения над сушей и увеличения – над морем. Применяемый способ прогноза температуры приземной точки росы по эмпирической зависимости не учитывает тип подстилающей поверхности, поэтому приводит к дополнительным ошибочным прогнозам.

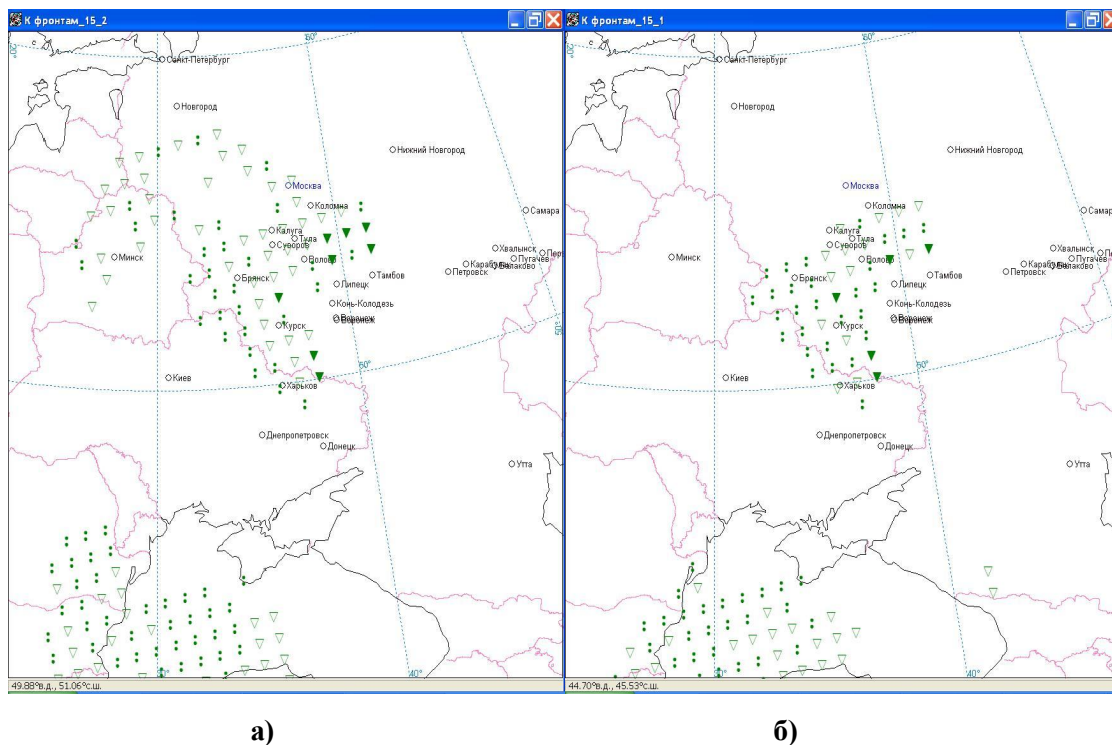


Рис. 2. Прогноз осадков с заблаговременностью 12ч на 15.06.2012 г. с дополнительным учетом (а) предикторов влажности и с дополнительным учетом предикторов влажности и оптимизированного модельного расчета приземной точки росы (б), где ■ - осадки в градации от 15 до 35 мм/12ч; ▽ - осадки в градации от 35 до 50 мм/12ч; ▾ - осадки в градации ≥ 50 мм/12ч.

15 июня 2012 г. южный циклон охватил своим влиянием ЕТР, переместившись из низовьев Дона в правобережье Волги, а его атмосферные фронты дошли до юго-восточных границ Подмосковья. В зонах атмосферных фронтов наблюдалась сильная конвективная неустойчивость. Повсеместно на станциях метеорологических наблюдений отмечалось развитие зон активной конвекции с комплексами неблагоприятных и опасных явлений погоды, в т.ч. очень сильными ливнями с градом, примерно в 1,5 раза превышающими месячную норму. Южный циклон сопровождался экстремально сильным ливнем на юго-востоке Московской области. В Коломне за 12 ч выпало 119 мм осадков. По интенсивности такой ливень можно сравнить с тропическим (только с 18 до 22 ч в Коломне выпало 90 мм осадков). В Кашире за день 15 июня и ночь 16 июня выпало 89 мм. В Волове Тульской

области выпало 73 мм. Около трети месячной нормы осадков выпало в Тверской области. В Калужской и Смоленской областях дождь был тоже сильным, до 16 мм. 15 июня вечером несколько сел Долгоруковского района Липецкой области также пострадали от дождя и сильного града.

Поздним вечером 15 июня на территории Тульской области прошли грозовые дожди. Таким образом, прогнозируемые сильные осадки не противоречат фактически наблюдаемым явлениям.

Кроме того, были проведены исследования по учету предиктора «фактор фронта» с целью сокращения прогнозов «ложных тревог» сильных осадков. Но если для прогноза сильных шквалов [2] этот предиктор оказался важным, то для прогноза сильных осадков – не показательным.

Рекомендованный к внедрению метод прогноза сильных осадков и его усовершенствованный вариант реализован в рамках программного комплекса прогноза опасных конвективных явлений в ФГБУ «Гидрометцентр России». Прогнозы рассчитываются 2 раза в сутки в 0 и 12 ч ВСВ, результаты прогноза внедренным методом автоматизировано визуализируются в виде двух карт и передаются в оперативном режиме в рекомендованные ЦМКП Управления гидрометеорологической службы (УГМС). Кроме этого, результаты прогнозов записываются в оперативную базу данных Гидрометцентра России и в рамках программного комплекса «Прометей» доступны для использования в любом УГМС, где имеется доступ к данному комплексу (удаленный доступ). В рамках «Прометей» визуализация автоматизировано осуществляется с помощью пакета «Изограф» (автор – Ю.В. Алферов).

2 августа 2013 г. получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013617159 «Усовершенствованный программный комплекс прогноза количества осадков при сильных летних дождях на основе выходных данных гидродинамической региональной модели Гидрометцентра России», зарегистрированное Федеральной службой по интеллектуальной собственности.

Выводы

Таким образом, уточнение прогноза приземной влажности в региональной модели и дополнительный учет влажности у Земли и пограничном слое позволяют автоматизировано уточнить прогноз сильных осадков. Авторская проверка усовершенствованного метода на более представительной выборке, намеченная на 2014 г., и сравнение результатов прогноза с прогнозами внедренным методом, возможно, позволит уточнить пороговые значения предикторов влажности. Но однозначно можно сделать вывод, что дополнительный учет

влажности у Земли и в пограничном слое и более точный прогноз модельной приземной влажности позволяют уменьшить количество прогнозируемых «ложных» тревог сильных осадков и уточнить их интенсивность.

Список использованных источников

1. *Акулиничева А.А.* Параметры дождей над районами Поволжья // Труды Гидрометцентра СССР. – 1969. – Вып. 57. – С. 113–118.
2. *Алексеева А.А.* Метод прогноза сильных шквалов // Метеорология и гидрология. – 2014 (в печати).
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.* Условия формирования и краткосрочный прогноз сильных ливней и града на ЕТ СНГ: автореф. дис. к.г.н. – М., 1993. – 27 с.
5. *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/12ч 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.
6. *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.
7. *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.
8. *Глушкова Н.И.* Диагноз и прогноз конвективных осадков с использованием данных МРЛ и ИСЗ // Труды Гидрометцентра СССР. – 1977. – Вып. 176. – С. 100–105.
9. *Глушкова Н.И.* Результаты исследований механизма образования сильных ливней и града // Труды Гидрометцентра СССР. – 1978. – Вып. 201. – С. 57–67.
10. *Глушкова Н.И.* Некоторые результаты исследования по усовершенствованию диагноза и прогноза осадков по данным МРЛ // Труды Гидрометцентра СССР. – 1980. – Вып. 220. – С. 78–84.
11. *Глушкова Н.И.* Исследование физико-статистических условий образования осадков // Труды Гидрометцентра СССР. – 1985. – Вып. 266. – С. 10–20.
12. *Лосев В.М.* Региональная гидродинамическая модель прогноза Гидрометцентра России // 80 лет Гидрометцентру России. – М.: Триада, лтд, 2010. – С. 36–58.

13. Пальмен Э, Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы / под ред. С.П. Хромова. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 616 с.

14. 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.

15. Попова Т.П., Чернова В.Ф. Вопросы спутниковой метеорологии // Методическое письмо. Вып. 7. – М.: Гидрометеиздат, 1975. – 18 с.

16. Сулаквелидзе Г.К., Глушкова Н.И., Федченко Л.М. Прогноз града, гроз и ливневых осадков. – Л.: -Гидрометеиздат, 1970. – 183 с.

Поступила в редакцию 16.05.2014 г.