

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-3-24-43>

УДК 551.509.324.2

Физико-синоптические предикторы, определяющие формирование сильных ливневых осадков

А.А. Алексеева, Б.Е. Песков

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
alekseeva@imecom.ru*

Дано физическое обоснование и определены оптимальные значения физико-синоптических предикторов, позволяющих уточнять внедренные в Гидрометцентре России по рекомендации ЦМКП Росгидромета прогнозы сильных осадков. Диагностированные на основе радиолокационных данных параметры конвекции и интенсивность конвективного явления расширяют возможности уточнения прогноза сильных и очень сильных осадков и позволяют дать штормовое предупреждение с увеличенной заблаговременностью или уточнить штормовое оповещение.

Ключевые слова: сильные осадки, физико-синоптические предикторы, диагностированные параметры конвекции, данные ДМРЛ-С

Physical and synoptic predictors and their optimal values leading to the formation of heavy rainfall

A.A. Alekseeva, B.E. Peskov

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
alekseeva@imecom.ru*

The physical and synoptic predictors are presented, which allow refining the automated forecasts of heavy precipitation implemented in the Hydrometeorological Center of Russia on the recommendation of the Roshydromet Central Methodological Forecasting Commission, as well as hydrodynamic forecasts of precipitation and forecasts of weather forecasters. The physical substantiation of the considered predictors is given. Their optimal values for the formation of heavy precipitation are determined. The parameters of convection and the intensity of the convective phenomenon diagnosed on the basis of radar data further expand the possibilities of refining forecasts of heavy and very heavy precipitation and, if necessary, allow issuing a storm warning with a sufficient lead time or refining a storm warning.

Keywords: heavy precipitation, physical and synoptic predictors, diagnosed convection parameters, DMRL-C data

Введение

Сильные осадки нередко наносят существенный ущерб жизнедеятельности, вызывая подтопления отдельных зданий, а иногда приводят к наводнениям на обширной территории, к провалам грунта

на автомобильных трассах, его вымыванию на железнодорожном полотне, вымоканию сельскохозяйственных культур, а также осложняют посадку самолетов. К таким последствиям, как правило, приводят ливневые осадки в летнее время года, достигающие критерия «опасное явление» (ОЯ) (дожди с количеством ≥ 50 мм/12ч и сильные ливни количеством ≥ 30 мм/ч), формирующиеся чаще всего в зоне активной конвекции при прохождении через регион медленно перемещающегося фронта с волнами. До сих пор не только в России, но и в мировой практике не решена проблема точного прогноза не только очень сильных осадков, но и осадков градации ≥ 15 мм/12ч. Поэтому прогноз таких осадков является важным как с научной точки зрения, так и практической.

В России на данный момент времени решениями Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета в 2006 и 2011 гг. [method.meteorf.ru] относительно прогноза дождей с количеством ≥ 50 мм/12ч и сильных ливней количеством ≥ 30 мм/ч рекомендованы к внедрению три автоматизированных метода, прогнозирующие осадки данных градаций: альтернативного прогноза ливней градации ОЯ [3, 5], максимального количества осадков в зонах конвекции [3, 5] и альтернативного прогноза осадков с детализацией интенсивности в трех градациях (от 11 до 34 мм/12ч, от 35 до 49 мм/12ч и 50 мм/12ч и более) [4] на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России с заблаговременностью 12 и 24 ч. Первый из этих методов рекомендован к внедрению в градации ОЯ. Относительно второго ЦМКП рекомендовала оперативно-прогностическим организациям Северо-Кавказского УГМС и Центрально-Черноземного УГМС, где проходили оперативные испытания метода, провести дополнительный анализ прогнозов максимального количества осадков в объединенной градации сильных и очень сильных осадков совместно с прогнозами осадков в градации ОЯ с целью выработки региональных практических рекомендаций по их комплексному использованию. Третий метод был принят к внедрению с максимальной пороговой градацией ≥ 35 мм/12ч, так как число случаев с осадками количеством ≥ 50 мм/12ч в период оперативных испытаний составило 11–17 в разные годы, что менее 5 % общей выборки, поэтому результаты испытаний прогнозов в градации ОЯ оказались статистически не обеспечены. В период принятия данных решений региональная модель Гидрометцентра России являлась базовой региональной гидродинамической моделью (решение ЦМКП от 11.05.2004 г.) [method.meteorf.ru].

Прогнозы сильных осадков рекомендованы к внедрению на данных модели с пространственным разрешением 75 км. Они рассчитываются в оперативном режиме, записываются в базу данных Гидрометцентра России. В настоящее время совершенствование методов прогноза сильных осадков на основе региональной модели не проводится. Основное внимание сегодня уделяется мезомасштабному моделированию. В Гидрометцентре России базовой моделью является COSMO-Ru:

13.04.2011 г. рекомендована версия COSMO-Ru 7 км, 15.12.2016 г. – COSMO-Ru2, 11.03.2021 г. – COSMO-Ru6ENA (шаг сетки 6,6 км), реализованная на базе конфигурации модели ICON-COSMO [method.meteorf.ru]. Согласно решению ЦМКП от 11.03.2021 г., оценки прогноза осадков представлены для градации ≥ 5 мм/12ч, однако при рассмотрении данного вопроса ЦМКП было отмечено, что оправдываемость осадков в градации ≥ 30 мм/12ч модели COSMO-Ru6ENA составляет 14 % и 20 % с заблаговременностью 18 ч и 30 ч соответственно.

Следует заметить, как показали сравнения в рамках проведенных оперативных испытаний осадков модели COSMO-Ru6ENA, и лучшие зарубежные модели на территории России имеют тот же порядок оправдываемости осадков в градации ≥ 30 мм/12ч. Так, у одной из самых успешных моделей прогноза осадков UKMO оправдываемость 17 % и 26 % с заблаговременностью 18 ч и 30 ч соответственно. Это обусловлено несколькими причинами. Во-первых, конвективные облака, характерные для выпадения таких осадков, являются «подсеточными» процессами и часто моделями не описываются. Во-вторых, начальные данные, усваиваемые моделями, не улавливают местных особенностей для развития конвекции, что зависит от густоты и качества наблюдательной сети. Кроме того, источниками ошибок могут быть несовершенство описания физики и энергетики атмосферных процессов, а также потеря точности в процессе приближенного решения системы уравнений модели.

Более значимы при прогнозе конвективных явлений погоды ошибки в прогнозе температуры T и температуры точки росы T_d у поверхности Земли, так как каждый градус меняет ситуацию около уровня конденсации иногда на противоположную: T и T_d на 1–2 °C выше – и задерживающий слой у уровня конденсации будет преодолен термиком, Сб возникнет, выпадет до 10–50 мм осадков; T и T_d на 1–2 °C ниже – и задерживающий слой погасит подъем термика, Сб не возникнет, больших осадков не будет.

Стоит отметить, что точность прогнозов температуры T и температуры точки росы T_d у земли гидродинамическими моделями вблизи фронтов часто еще ниже, ошибки 1–2 °C в прогнозе T характерны, T_d прогнозируется еще менее точно. Такие же ошибки на высоте, например, на 2–3 км выше уровня конденсации, особенно при температуре конвективного элемента $T' \ll T$ на этом уровне, не изменяют прогноза «без осадков». Даже значительный задерживающий слой на высоте 4 км, например, также ничего принципиально не изменит: $(T'-T)$ составит 4–6 °C вместо 6–8 °C, вертикальная скорость – 8–12 м/с вместо 10–15 м/с, количество осадков при ливне уменьшится на 2–3 мм (например, 23–27 мм вместо 25–30 мм).

Задача данного исследования – найти способы уточнить прогнозы сильных осадков с помощью дополнительных предикторов для характеристики и учета неустойчивости и влажности. Кроме того, при использовании выходных модельных данных для расчета этих дополнительных,

как правило, более простых предикторов ошибки прогнозов могут оказаться меньше, чем при прогнозе самих сильных осадков в рамках модели.

Представляемые исследования направлены на решение важной проблемы повышения качества прогнозирования сильных и очень сильных осадков в летний период. Полученные результаты могут использоваться практикующим синоптиком в целях уточнения модельных прогнозов.

Материалы и методы исследования

В исследовании использованы данные измерений количества осадков на метеостанциях из материалов оперативных испытаний метода прогноза максимального количества осадков в зонах конвекции [3] за период июнь–август 2004 года: ежедневные 12-часовые суммы осадков в 10 областях Центрального федерального округа России (Калужская, Смоленская, Тверская, Тульская, Московская, Ярославская, Костромская, Рязанская, Владимирская и Ивановская). Общее число рассмотренных дней 859, из них 397 дней с осадками $\geq 0,6$ мм; 114 – ≥ 11 мм; 79 – ≥ 15 мм; 25 – ≥ 24 мм; 11 – ≥ 30 мм; 7 – ≥ 35 мм; 4 – ≥ 50 мм. Исследования проведены на выборке данного периода как на материалах, полученных непосредственно на местах испытаний и утвержденных ЦМКП.

Для исследований использованы другие доступные материалы, дополнительно характеризующие осадки: кольцевые и микрокольцевые синоптические карты дискретностью 3–6 часов, чаще всего за 12 ч ВСВ; более подробно – карты барической топографии АТ850 и др.

Синоптические карты Гидрометцентра России дают макромасштабную картину синоптической ситуации в целом. Хорошо проявляются зоны антициклонов, циклонов, седловин, ложбин, гребней (масштаба 1000–2000 км). Фронтальный анализ представляет вероятностную схему расположения больших (до 1000 км) фронтальных зон в целом во всей нижней половине тропосферы (1000–500 гПа).

В данном исследовании дополнительно проведен анализ приземного барического поля в окрестностях (до 1000–1500 км) исследуемых случаев сильных осадков через 1 гПа, а также полей влажности, температуры, скорости и направления ветра. Проведенный анализ позволил уточнить положение атмосферных фронтов и волн на них, выявить небольшие по площади барические образования с перепадом давления всего 1–3 гПа, не отраженные в макромасштабных полях. На поверхности 850 гПа также проведен дополнительный анализ поля геопотенциала через 1 дам; температуры (показателя абсолютной влажности) и дефицита температуры точки росы (показателя относительной влажности) через 1 °С. При анализе густота и направление изобар и изогипс согласовывались с направлением и скоростью ветра по известному квазигеострофическому закону и отклонению от него у поверхности Земли. Все это и учет тенденции давления у поверхности Земли позволили уточнить положение фронтов и волн, их

перемещение и эволюцию при формировании осадков, в том числе сильных. Таким образом, уточнены характеристики атмосферы, обуславливающие возникновение таких осадков.

Кроме того, в анализе конкретных случаев использовались прогностические осадки $Q_{\text{метод}}$, рассчитанные в оперативном режиме по вышеуказанному альтернативному методу прогноза осадков с детализацией интенсивности в трех градациях [4] и методу максимального количества осадков в зонах конвекции [3]. Следует отметить, что методы прогноза разрабатывались РР-подходом (Perfect Prognosis). Метод прогноза, разработанный РР-подходом, позволяет использовать любую прогностическую модель физико-синоптических условий, каждая из которых вносит свои ошибки в конечный прогноз.

Примененный в рамках исследований подход можно использовать для уточнения количества сильных осадков, прогнозируемых другими методами в оперативном режиме.

Нами также использованы данные ДМРЛ-С в летние периоды 2016–2021 гг. с целью диагностики параметров конвекции и характеристик ливневых осадков по радиолокационной информации, особенно для процессов с сильными ливневыми осадками.

Результаты исследований

Вертикальная неустойчивость в автоматизированном альтернативном методе прогноза сильных осадков в зонах конвекции и в методе прогноза их максимального количества оценивается с помощью максимальной конвективной (в кучево-дождевом облаке) скорости восходящего потока (W_m), используя метод Н.И. Глушковой [9], один из наиболее надежных, многократно подтвержденных.

Смысл расчета заключается в оценке температуры T' сначала в термике, затем в облаке, поднимающемся с уровня максимальной температуры T (обычно у земли). Расчет ведется по слоям оценкой энергии неустойчивости по $(T'-T)$ каждого слоя. Температура T у земли прогнозируется на основании упомянутой выше региональной модели, а температура точки росы T_d – с использованием дополнительных соотношений T_d у земли и на поверхности 925 гПа, полученных эмпирически [1]. Градации осадков согласно методу [4] и максимальное количество осадков [3] определяются в первую очередь вертикальной неустойчивостью и влажностью в нижней половине тропосферы. Кроме того, учитываются вертикальные упорядоченные крупномасштабные движения. Метод прогноза осадков в трех градациях комплексирован два подхода к прогнозу осадков, рекомендованных к внедрению: количественного прогноза для всех градаций и альтернативного для прогноза осадков в градации ОЯ.

Ниже описаны предлагаемые нами дополнительные предикторы для уточнения прогноза сильных ливней.

Дополнительные предикторы первой очереди

Влажность воздуха. Известно, что дефицит точки росы характеризует относительную влажность, влияющую на испарение влаги в кучево-дождевом облаке и под ним, а также и на солнечный прогрев через облачность, связанную с дефицитами. Можно утверждать, что на каждом уровне имеется оптимальный дефицит точки росы, отклонение от которого в любую сторону приводит к уменьшению осадков.

В связи с этим, предикторы, связанные с дефицитами точки росы, имеют следующий вид:

$$d'_i = (A - |d_i - B|), \quad (1)$$

где d'_i – предиктор с дефицитом точки росы на конкретной изобарической поверхности; d_i – дефицит на той же изобарической поверхности; A и B – эмпирически подобранные коэффициенты.

Предиктор d'_i по мере роста d_i сначала растет, достигает максимума, равного A , при $d_i = B$, а затем уменьшается, как это и следует из вышеупомянутых физических закономерностей.

Примерные значения эмпирических коэффициентов A и B уже известны в синоптической метеорологии. Так, оптимальный $d_{850} = B_{850} = 3$ °С. С учетом ошибок концепции MOS (расчеты на основе конкретной гидродинамической модели), B_{850} может быть 3,5–4 °С. A подбирается из следующих соображений: при $d_{850} \sim 0-0,5$ °, $d'_i \sim 0$ (прогрева нет, ливень невозможен), т. е. $A \sim 2-3$ °С. При $A = 3$, $d_{850} = 6 - d'_{850} = 0$, т. е. ливень невозможен, что соответствует известным немногочисленным фактам. Потому требуется проверить это на большем материале конкретной применяемой модели, при осадках разной величины вплоть до сильных и очень сильных до 30–50 мм/12ч.

При $d_{850} \gg 6$ ° слишком сухой воздух тем более делает невозможным ливень и $d'_{850} \ll 0$ характеризует степень недостатка условий для ливня: чем больше d_{850} , тем меньше d'_{850} , тем меньше вероятность ливня при прочих благоприятных для ливня условиях. Таким образом, d'_i может быть одним из:

$$\begin{aligned} d'_{850} &= (3 - |d_{850} - 3|), \text{ для дождя } d_{850} \text{ от } 1 \text{ до } 5 \text{ °С}; \\ d'_{700} &= (3 - |d_{700} - 4|), \text{ для дождя } d_{700} \text{ от } 2 \text{ до } 6 \text{ °С}; \\ d'_{500} &= (3 - |d_{500} - 5|), \text{ для дождя } d_{500} \text{ от } 3 \text{ до } 7 \text{ °С}. \end{aligned} \quad (2)$$

Рост d'_i и пределов d_i при ливнях обусловлен ростом с высотой нижнего предела насыщающего d_i надо льдом и ростом верхнего предела d_i по мере понижения абсолютной влажности. Наряду с физически

оптимальными значениями $A = 3$ и B от 3 до 5, при статистическом испытании на конкретной модели полезно проверить значения A от 2 до 4 и B от 2 до 7.

Горизонтальная неустойчивость влияет на ливни, как показано в [9], через фронты, волны на них, ложбины на линиях неустойчивости, т. е. через первоначальный упорядоченный импульс подъема у земли, который затем усиливается вертикальной неустойчивостью. Наиболее универсальным предиктором горизонтальной неустойчивости является лапласиан приземного давления:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \approx \frac{\Delta p}{\Delta x^2} + \frac{\Delta p}{\Delta y^2} = \nabla^2 p = L. \quad (3)$$

$L > 0$ определяет сходимость горизонтальных потоков и, как следствие, необходимый первоначальный динамический (вынужденный) подъем, усиливающийся затем упорядоченной термической конвекцией.

Если $L < 0$, то преобладает расходимость и нисходящее движение. Если $L \ll 0$, тем больше нисходящее движение в пограничном слое, тем больше препятствий для ливня: исходная (даже большая) влажность падает и может образоваться задерживающий слой – инверсия или замедленное падение с высотой температуры T , т. е. вертикальная устойчивость в тонком слое. Часто она в рамках моделей не прогнозируется из-за сглаживаний и недостаточной точности, но эмпирически по $L \ll 0$ проявляется.

При $L \gg 0$, большие восходящие движения повышают влажность до насыщения, появления слоистой облачности, уменьшения солнечного прогрева, прекращения термической конвекции, что также обычно препятствует ливням. Таким образом, существует оптимальная величина $L > 0$, отклонение от которой препятствует ливням. При $\Delta x = \Delta y \sim 300$ км оптимальна $L \sim$ от 2 до 4 гПа/300 км², или примерно от 0 до 6 гПа/300 км², учитывая ошибки конкретной модели. Тогда соответствующий предиктор будет, аналогично (1):

$$L' = 4 - \left| \nabla_{300}^2 - 3 \right|. \quad (4)$$

Выбранный для расчета масштаб 300 км не лучший для конвекции. Можно попробовать 225, 150 и 75 км. Но ошибки прогноза L по горизонтали на 75–100 км, как показал опыт использования таких масштабов, не редкое событие, поэтому масштаб 225–300 км является с нашей точки зрения оптимальным. Полезным оказалось проверить вариации значений коэффициентов и для лапласиана приземного давления: A от 3 до 5 вместо 4 и B от 2 до 6 вместо 3.

Ветер в тропосфере, определяющий перенос облаков и зон ливней, фронтов и волн в прогнозах учитывается, очевидно, недостаточно. А чем сильнее ветер, тем быстрее облако проходит пункт измерения осадков,

тем меньше продолжительность ливня и меньше выпавших в данном пункте осадков. С другой стороны, при слабом ветре, штиле, облако малоподвижно, дождь продолжительный. В Сб образуется обширная накопительная, препятствующая солнечному прогреву, внизу далеко от Сб растекается охлажденный дождем воздух, отсекая приток в него теплого воздуха; интенсивность дождя уменьшается; соответственно, количество осадков тоже может уменьшиться.

Таким образом, можно предположить, что имеется оптимальная скорость ветра v . Поскольку перенос определяется средним ветром в слое 850–500 гПа, предиктор (5) тестировался на разные значения:

$$|v'_8|^5 = A - |v_8^5 - B|. \quad (5)$$

Примерно $|v'_8|^5$ от 5 до 7 м/с (от 4 до 10 м/с, учитывая допуск на ошибки модели), т. е. оптимально:

$$|v'_8|^5 = 9 - |v_8^5 - 6|. \quad (6)$$

Чем больше v' (v ближе к оптимуму), тем больше условий для ливня. Чем меньше v' (ветер или очень слабый, или слишком сильный), тем меньше условий для ливня. На атмосферных фронтах следовало бы брать не v , а только нормальную его составляющую, которая более точно определяет продолжительность дождя. Полезно испытать вариации значений коэффициентов: A от 7 до 12 и B от 5 до 8.

Выбранные как основные дополнительные предикторы первой очереди очень сильных дождей и ливней можно комплексовать с помощью дискриминантного и/или корреляционного анализа.

Наряду с этими или, возможно, взамен предлагается другое физико-статистическое объяснение – произведениями этих предикторов. Связи с ливнями получаются далеко не линейными, что в природе чаще и бывает.

Комплексный предиктор типа:

$$Q = a \cdot \sqrt[n]{Q_{\text{метод}}} \cdot \sqrt[n]{d'_{850}} \cdot \sqrt[n]{L'} \cdot \sqrt[n]{v'}. \quad (7)$$

Расчет дает $Q = 0$ при равенстве нулю одного из множителей, даже несмотря на большую величину другого (остальных). Это действительно должно быть так. Например, если $d'_{850} \ll 0$ (воздух очень сухой, в котором ливней не бывает). $\sqrt[n]{d'_{850}} = 0$, и $Q = 0$ несмотря на благоприятные прочие условия. С другой стороны, если ни один из множителей не равен 0, но очень маленький, требуется очень благоприятное одно или все условия, чтобы $Q \gg 0$.

В частности, опыт использования результатов прогноза указанного метода [3] показывает, что иногда рассчитанные осадки $Q_{\text{метод}}$ при большой вертикальной неустойчивости составляют 50–100 мм, а фактически

выпадает осадков Q от 0 до 10 мм не только когда $d'_{850} \ll 0$, но и $L' \ll 0$. В этом случае тонкий задерживающий слой, сглаженный и недоучтенный при расчете $Q_{\text{метод}}$, прерывает конвективную струю вблизи уровня конденсации, и вместо потенциально возможного мощного Сб образуется Сп.

Иногда и рассчитанные $Q_{\text{метод}} > 50$ мм, и воздух оптимально влажный, есть и атмосферный фронт, но $v' \ll 0$ (перенос слишком сильный), $n'''\sqrt{v'} = 0$, $Q \sim 0$, фактически выпадает от 0 до 10 мм. С другой стороны, иногда все условия благоприятны для ливня, хотя рассчитанные $Q_{\text{метод}} \sim 20$ мм, произведение же дает Q от 40 до 60 мм, что и отмечается фактически.

Корни 2–4 степеней, как и коэффициент a , подбираются на опытных данных, в частности чтобы влияние каждого сомножителя было соизмеримо между собой, а результирующие рассчитанные Q и фактические Q были в пределах $\pm 20\text{--}30\%$ друг от друга, поскольку достижение большей точности пока не предполагается.

Тот же вид комплексного предиктора можно взять при прогнозе не Q , а $P\%$ – вероятности ливня той или иной величины. Коэффициент a можно найти из простейшего уравнения регрессии или графически, в частности когда на одной оси графика Q' , а на другой Q'' , где:

$$\begin{aligned} Q' &= a' \cdot n\sqrt[Q_{\text{метод}}]{} \cdot n''\sqrt[d'_{850}]{} \\ Q'' &= a'' \cdot n'''\sqrt[L']{} \cdot n'''\sqrt[v']{} \end{aligned} \quad (8)$$

Дополнительные критерии второй очереди

Хотя в выбранных для анализа методах вертикальная неустойчивость учитывается физически достаточно полно, тем не менее в выбранной модели (MOS) могут точнее прогнозироваться более простые ее показатели, а через них и осадки.

К ним относятся:

– вертикальная неустойчивость γ в слоях 850–700 и 850–500 гПа; чем $\gamma \geq 0$ больше, тем вертикальный градиент температуры T больше влажноадиабатического, особенно в слое 850–700 гПа, что важно для ливня:

$$\gamma = 2T_{850} - T_{700} - T_{500} - 33 = (T_{850} - T_{700}) + (T_{850} - T_{500}) - 33; \quad (9)$$

– вертикальная неустойчивость T'_{3-850} в слое земля – поверхность 850 гПа; чем значение T'_{3-850} больше 1, тем T'_{850} в термике выше T_{850} в окружающем воздухе, что важно для роста Сб и последующего ливня:

$$T'_{3-850} = 0,5 \cdot (T + T_d)_3 - T_{850} - 6; \quad (10)$$

– то же, что и (10), но в слое 925–850 гПа, где, как правило, начинается рост термика, Сб ночью и утром:

$$T'_{925} = 0,5 \cdot (T + T_d)_{925} - T_{850} - 3; \quad (11)$$

– то же, что и (10), но в слое 700–500 гПа; чем ближе дефициты точки росы d в слое 700–500 гПа приближаются к оптимальным ($\sim 5-6^\circ$), тем больше T'_{700} соответствует сильному ливню:

$$T'_{700} = 5 - |T_{700} + T_{500} - 11|; \quad (12)$$

При $d \approx 3^\circ$ влажность близка к насыщающей надо льдом, облачность As препятствует солнечному прогреву у земли и термической конвекции, $d_5^7 \approx 0^\circ$, ливень маловероятен. То же при $d \approx 8^\circ$, когда слишком велико испарение на границе Сб. Полезно проверить коэффициенты, $A = 5 \pm 1$ и $B = 11 \pm 2$, так как при больших упорядоченных восходящих движениях в сухом воздухе T_{500} понижается, $(T_{850} - T_{500})$ растет, реализуется потенциальная неустойчивость.

Предиктор, у поверхности Земли уменьшающий осадки испарением при $d_3 \gg 8^\circ$, а также при $d_3 \ll 8^\circ$, когда возможно появление низкой облачности St, также резко уменьшающей солнечный прогрев. Коэффициенты с точностью $\pm 1-2^\circ$ взяты из повседневной практики:

$$D' = 9 - |d_3 - 8|; \quad (13)$$

– у земли чем ближе температура к 25°C , тем больше предиктор T'_3 и вероятнее ливень, так как летом в России при сильном ливне T_3 обычно от 23 до 27°C , и сильный ливень бывает редко при $T_3 > 32^\circ\text{C}$ и $T_3 < 18^\circ\text{C}$, так как или под облаком испаряется слишком много влаги, или слишком холодно, когда не исключена скрытая устойчивость в слое 925–850 гПа:

$$T'_3 = 8 - |T_3 - 25|; \quad (14)$$

– чем выше температура точки росы у земли относительно 12°C , тем вероятнее ливень. Для ливня количеством 25–30 мм $T_d \geq 14^\circ\text{C}$, для ливня ≥ 50 мм $T_d \geq 15-16^\circ\text{C}$:

$$T'_d = T_d - 12. \quad (15)$$

Все предикторы берутся таким образом, чтобы они влияли на вероятность ливня однозначно: чем больше значения предиктора, тем больше вероятность ливня. Такая форма предикторов удобна и для поиска комплексов предикторов через их произведение или сумму с коэффициентами, определенными из дискриминантного анализа.

Из предикторов горизонтальной неустойчивости, возможно, наилучший – модельные вертикальные движения на поверхности 850 гПа, так

как в этом случае, в частности, учитываются и орографические движения. Но пока опыт показывает, что лапласиан приземного давления, отражающий циклоничность у поверхности Земли – предиктор не хуже, а может быть и лучше.

Добавочно к приведенным выше предикторам рекомендуется проверить следующие: лапласиан T и T_d при $\Delta x = \Delta y = 300$ км, характеризующие, как показывает мировой опыт, сильно влияющие на ливни языки тепла и влаги, в частности на фронтальных волнах и в молодых циклонах.

Важно, безусловно, контраст T на расстоянии по нормали к густоте изотерм и фронту, превышающий 8°C .

Все взятые приземные характеристики горизонтальной неустойчивости, возможно, дополняют модельные вертикальные движения на поверхности 850 гПа, так как для конвекции часто важны не упорядоченные движения вверх, а импульс именно у земли.

Важно проверить также рост давления за холодным фронтом, активизирующий сильный ливень тем же импульсом у земли.

Результаты проведенного анализа позволяют несколько приблизиться к прогнозу со 100%-ной предупреденностью сильных осадков (дается прогноз, если значения предикторов внутри диапазонов), максимально возможной оправдываемостью (внутри диапазонов предикторов будут случаи без таких дождей, т. е. ложные тревоги) и 100%-ной оправдываемостью прогнозов их невозможности (дается прогноз без таких осадков в диапазоне значений предикторов, где таких осадков не бывает).

Дополнительный учет синоптической ситуации

80 % очень сильных ливней наблюдаются на малоподвижных фронтах [2]. Применительно ко всем ливням, включая и слабые, факт их связи с фронтами и объяснение этому факту были известны давно [9]. Малоподвижность фронта свойственна только очень сильным ливням (≥ 50 мм/12ч), так как при быстром движении в Сб может быть большая интенсивность (мм/мин, мм/ч) осадков, но общее их количество из-за малой продолжительности осадков над данным местом не успевает достичь обычно экстремально больших величин.

Как и при других экстремальных летних явлениях (ураганных шквалах, особо крупном граде), с холодным фронтом без волнового возмущения на нем связано 17 % очень сильных ливней, а с вершиной волны – 44 %. Очевидно на волне «бурное» вытеснение теплого воздуха идет наиболее интенсивно благодаря ускорению и сходимости ($\text{conv } V$) потоков в формирующемся небольшом (мезо) циклоне. Имеет место концентрация энергии у вершины волны (15×50 км) за счет ее ослабления в окрестностях, сходимость приземных ветров $\text{conv } V$ у вершины увеличивается с 10^{-5} до 10^{-4} c^{-1} .

Тем не менее 20 % очень сильных ливней выпадает на периферии циклона (7 %) и в малоградиентном поле давления на периферии антициклонов (13 %). В этих 20 % присутствует также эффект «бурного» кратковременного вытеснения теплого воздуха вверх за счет «старых», слабо выраженных приземных фронтов, небольших циклонов и ложбин, видимых только при проведении дополнительных изобар. Поднятый от земли теплый влажный воздух поднимается выше за счет вертикальной неустойчивости. Эффект «бурного» вытеснения у земли нужен вместо первоначального слабого термического перегрева (разнородного нагрева участков самой земли). Поднятый таким образом («вынужденно») полосой – линией воздух, за счет всегда имеющегося днем у самой земли сверхадиабатического градиента T , оказывается теплее окружающего воздуха и поднимается выше термически (обычным путем плавучести при $\Delta T > 0$).

В [2] показано, что фронт играет меньшую роль уже на поверхности 850 гПа: в 77 % очень сильных ливней контрасты T от 0,5 до 2 °С/100км, т. е. почти любой из обычно встречающихся, кроме неустойчивости нужен лишь первоначальный подъем у самой земли или фронтом, или другой силой: сходимостью даже слабых ветров, рельефом. Вынужденный подъем возникает не только на наветренной стороне гор, крутых склонов речных долин, возвышенностей, но и у холмистой гряды с перепадом высот более 100–200 м (например, Клинско-Дмитровская гряда). В [2] показано, что лапласиан приземного давления, характеризующий сходимостью ($\text{con}v V$) приземных ветров, при ливнях более 50 мм/12ч положителен (в среднем и в 80 % фронтальных случаев). Расчет лапласиана приземного давления желателен при $r = 150$ км, но обычно в силу исключения модельных ошибок $r = 300$ км.

На периферии циклонов и в размытом поле макромасштабный лапласиан ($r = 300$ км) слабо отрицателен, так как он не улавливает небольшие ложбины, циклоны, зоны сходимости ветров, старые фронты. Об этом же говорят и рассчитанные упорядоченные вертикальные движения на поверхности 850 гПа [2]. Они в среднем восходящие для 87 % очень сильных ливней.

Роль неустойчивости подтверждается: во всех 100 % очень сильных ливней рассчитанная максимальная скорость струи в S_b больше 20 м/с. Даже в малоградиентном поле давления она от 20,6 до 27 м/с, на периферии циклона от 24,6 до 41 м/с, на холодном фронте без волн – от 20,1 до 51,2 м/с, с волнами – от 20,4 до 51,4 м/с. Тот факт, что здесь практически не проявляется роль волн, на которых сильных ливней в 2,5 раза больше, чем на фронтах без волн, говорит о завышении расчетных скоростей на последних. Возможно, недоучтен первоначальный перегрев или вынужденный подъем.

В [2] показана и роль влажности. В среднем для очень сильных ливней T_d у земли составляет 15,5–17,3 °С (колеблется по ситуации), т. е.

значительно выше обычных летом (9–12 °С), $(T - T_d)$ в слое 850–700 гПа составляет 2,6–4 °С, т. е. значительно меньше обычных (5–7 °С).

Большую помощь в уточнении прогноза могут оказать данные радиолокационных наблюдений, сеть которых в России модернизируется, ЕТР уже практически покрыта сетью ДМРЛ-С. Диагностированные локатором данные об опасных конвективных явлениях погоды помогают убеждаться в точности краткосрочных прогнозов, совершенствовать наукастинг таких явлений, с достаточной заблаговременностью дать штормовое предупреждение или вовремя передать штормовое оповещение. Кроме того, позволяют получить новые данные о причинах возникновения сильных осадков, а также в диагнозе проверить качество применяемых в прогнозе подходов и на основе полученных результатов совершенствовать методы прогноза.

Рассмотрим пример, показывающий пользу полученных результатов исследований. Проанализируем случай сильного дождя в Курске 10.06.2021 г. В этот же день сильные ливни отмечались в Воронеже и Самарской области (Красный Яр).

На рис. 1 приведены фрагменты синоптических карт от 10 июня 2021 г.: верхний ряд – карты приземного анализа от 06 и 12 ч ВСВ. Синоптическая ситуация определялась малоподвижным южным циклоном с центром над Центрально-Черноземным районом России с серией атмосферных фронтов. Как видно, в 06 ч ВСВ наблюдались отдельные ливни и грозы, а в 12 ч ВСВ они отмечаются повсеместно. На рис. 1в–е представлены карты барической топографии: АТ925, АТ850, АТ700 и АТ500 за 12 ч ВСВ. Циклон прослеживается до 500 гПа. В Самарской области выше 850 гПа – ложбина. На рис. 2 представлен прогноз сильных осадков по внедренному автоматизированному методу альтернативного прогноза осадков в трех градациях интенсивности [4] на дневное время 10.06.2021 г. Как видно, в Курской области прогнозировались осадки в градации 15–34 мм/12ч, в Воронежской области – как осадки в той же градации, так и осадки градации ОЯ. На рис. 3 представлено диагностированное по информации сети ДМРЛ-С ежечасное количество осадков за периоды с 12 до 13 ч и с 13 до 14 ч ВСВ; за два срока наблюдений (12.00 и 12.10 ч ВСВ) на рис. 4 – диагностированные максимальные конвективные скорости и интенсивность осадков и град на рис. 5.

Рассмотрим более подробно случай с сильными осадками в Курске, так как известно количество наблюдаемых осадков. Следует отметить, что прогноз в Курской области оправдался, прогнозируемые и наблюдаемые осадки относятся к одной градации осадков. Предлагаемые для уточнения прогноза физико-синоптические предикторы положительны, кроме T'_{925} , что указывает на сильные осадки. Так, $d'_{850}=1$; $d'_{700}=2$; $d'_{500}=1$; $L > 0$; $|v'_{18}|^5 = 5,5$; $\gamma = 3$; $T'_{3-850} = 2,7$; $T'_{925} = -1,5$; $T'_{700} = 4$; $D' = 8$; $T'_3 = 6,2$; $T'_d = 2,2$.

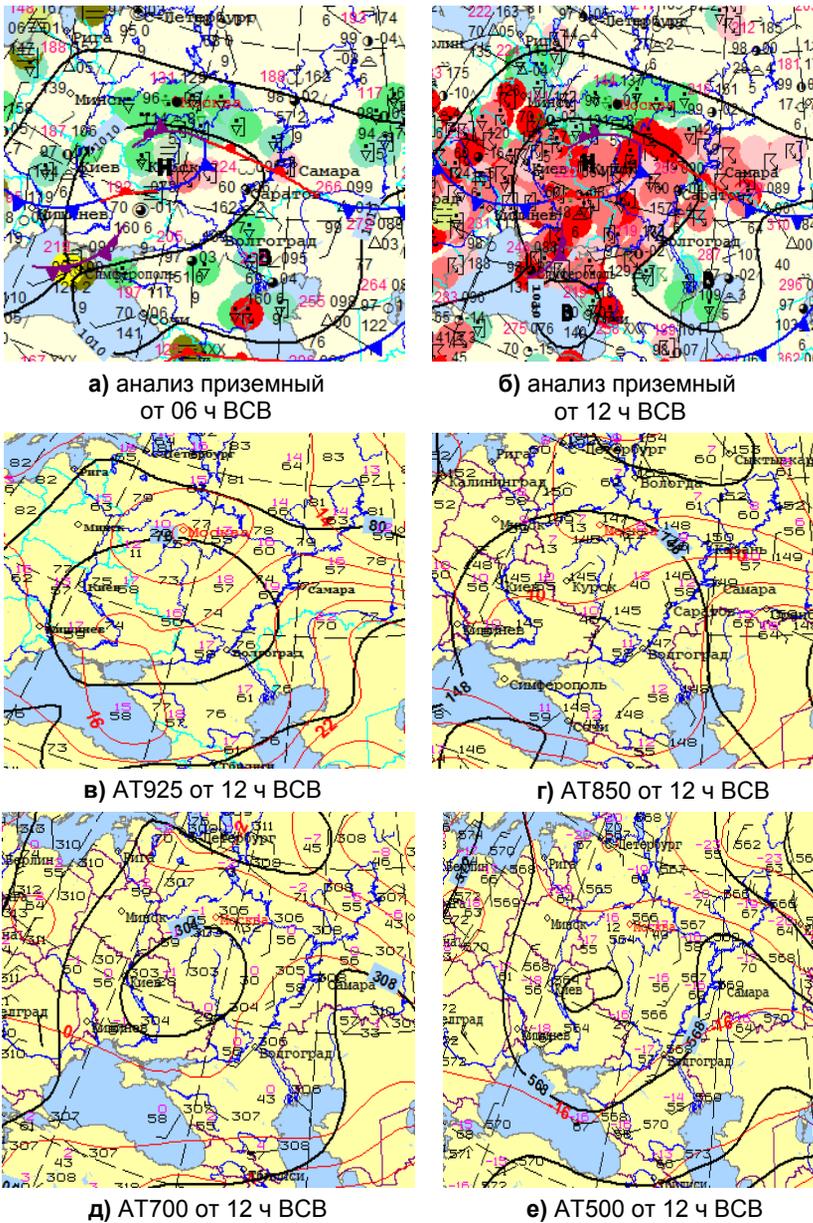


Рис. 1. Фрагменты карт приземного анализа от 06 и 12 ч ВСВ (а, б), барической топографии АТ925 (в), АТ850 (г), АТ700 (д) и АТ500 (е) от 10.06.2021 г. [meteoinfo.ru].

Fig. 1. The fragments of surface analysis charts for 06.00 and 12.00 UTC (a, b) and the charts for the levels of 925 (c), 850 (d), 700 (d), and 500 hPa (e) on June 10, 2021 (<https://meteoinfo.ru>).

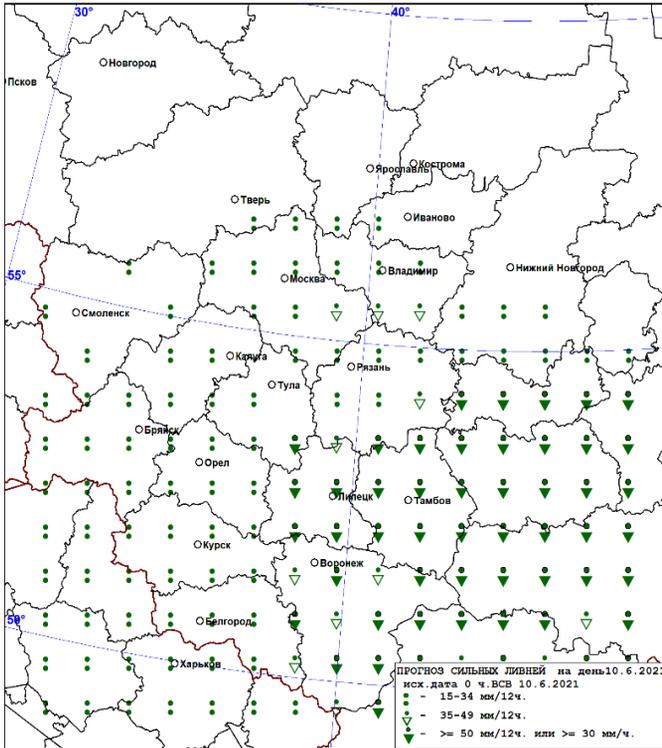
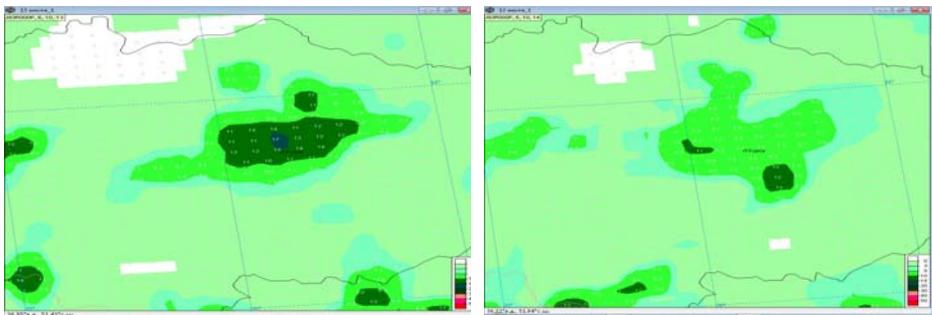


Рис. 2. Прогноз сильных ливней [4] на день 10.06.2021 г. от исходного срока 00 ч ВСВ с заблаговременностью 18 ч.

Fig. 2. The forecast of heavy rainfall [4] for June 10, 2021 from the 00.00 UTC run with a lead time of 18 hours.

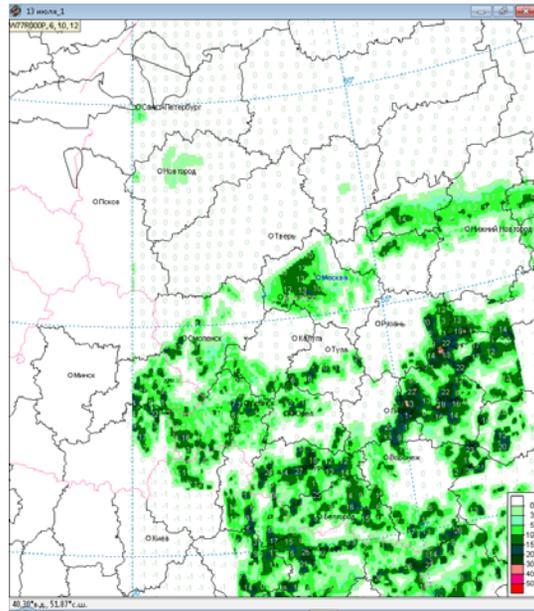


с 12 до 13 ч ВСВ

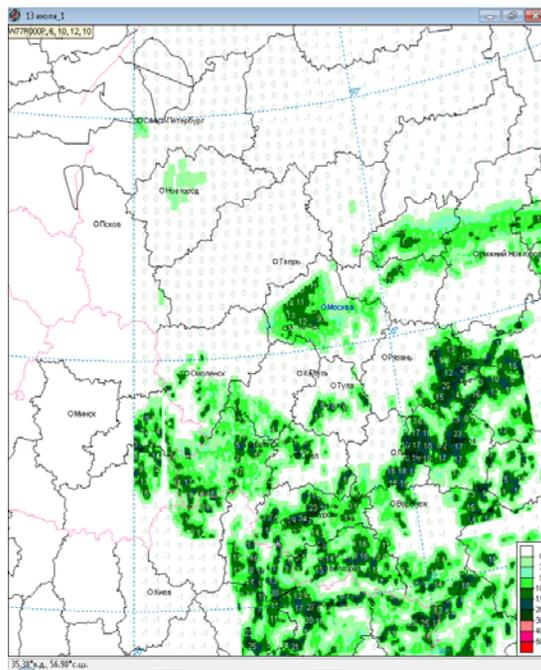
с 13 до 14 ч ВСВ

Рис. 3. Диагностированное по информации сети ДМРЛ-С ежечасное количество осадков, мм/ч, за период с 12 до 13 ч и с 13 до 14 ч ВСВ.

Fig. 3. Hourly precipitation (mm/h) diagnosed according to the information of the DMRL-C network for the period from 12.00 to 13.00 UTC and from 13.00 to 14.00 UTC.



12.00 ч ВСВ



12.10 ч ВСВ

Рис. 4. Диагностированные по информации сети ДМРЛ-С максимальные конвективные скорости (м/с) за сроки 12.00 и 12.10 ч ВСВ.

Fig. 4. The maximum convective velocities (m/s) diagnosed according to the information of the DMRL-C network for 12.00 and 12.10 UTC.

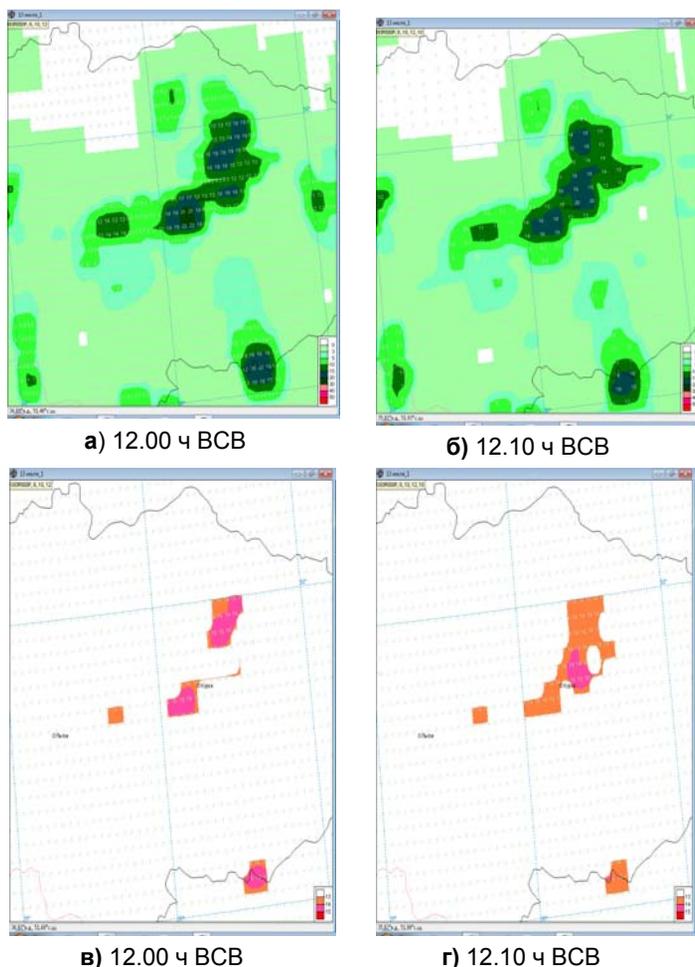


Рис. 5. Диагностированные по информации сети ДМРЛ-С интенсивность осадков, мм/ч (а, б) и град (цифры кода: 13, 14 и 15, соответственно, диаметром менее 1 см, от 1 до 2 см и более 2 см) (в, г) за сроки 12.00 и 12.10 ч ВСВ.

Fig. 5. The precipitation intensity (mm/hour) (а, б) and hail (code numbers 13, 14, and 15, respectively, with a diameter <1 cm, 1–2 cm, and >2 cm) (в, г) diagnosed according to the information of the DMRL-C network for 12.00 and 12.10 UTC.

Диагностированные по данным ДМРЛ-С [6] максимальные конвективные скорости составляют 24–27 м/с; интенсивность осадков 13 и 15 мм/ч, а вблизи города 20–21 мм/ч; град диаметром 1–2 см в сроки 12.00 и 12.10 ч ВСВ; количество осадков 15 и 7,5 мм за период от 12 до 13 ч ВСВ и от 13 до 14 ч ВСВ соответственно. Таким образом, радиолокационные данные также наглядно подтверждают правильность прогнозирования осадков градации 15–35 мм/12ч, т. е. в данном случае прогноз достаточно точен.

Перечислим в завершении главные условия образования сильных ливней:

– вертикальная неустойчивость тропосферы, для оценки которой используется в дополнительных предикторах прежде и чаще всего температура воздуха у земли и на поверхностях 850, 700 и 500 гПа, а также температура точки росы у земли и различные показатели неустойчивости;

– синоптические условия: атмосферные фронты, волны и циклоны на них, упорядоченные вертикальные движения, лапласиан приземного давления.

Влияние синоптической ситуации на ливни изучено давно, влияние на очень сильные ливни показано в [2] и проанализировано в статье. Видно, что влияние ее значимо, как и вертикальной неустойчивости, но оба этих фундаментальных комплексных фактора изучены по отдельности и не учитываются в рамках единого механизма развития Сб.

В ряде работ многие факторы, благоприятные для возникновения сильных ливней, учтены с помощью статистики. На фактических данных показано, что, действительно, одни факторы дополняют другие: с ростом неустойчивости растет вероятность ливней, но при одной и той же неустойчивости дополнительно увеличивают вероятность ливней другие факторы, такие как фронты, упорядоченные восходящие движения. Одна вертикальная неустойчивость сама по себе не приводит к ливням, особенно сильным, в некоторых синоптических ситуациях. Также и фронт сам по себе без вертикальной неустойчивости не дает ливней. Тем не менее эти две группы факторов часто по-прежнему рассматриваются по отдельности. Считается, что на фронте неустойчивость или не важна, или всегда сопутствует ему. С другой стороны, неустойчивость, оцененная по большой группе факторов или не нуждается в дополнительном учете фронта, или все вобрала в себя, что есть на фронте. Есть два мнения: фронт как сильный динамический фактор рождает Сб при любой стратификации и неустойчивость все учитывает сама по себе.

В используемых методах [3, 4] фронт и волны не учитываются. Причины этого – трудности автоматизированного их учета, а также частичный их учет через упорядоченные вертикальные движения. Кроме того, считается, что при расчете неустойчивости косвенно учтены все сопутствующие фронту факторы: повышенные вертикальные градиенты T и влажность у земли и в тропосфере.

Выводы

В представленном исследовании выявлены физико-синоптические предикторы и обоснованы их оптимальные значения для формирования сильных ливневых осадков. Рекомендованы пределы их изменения при уточнении прогнозов сильных и очень сильных осадков в зависимости от применения прогностических данных различных гидродинамических моделей.

Показано, что использование радиолокационных данных позволяет рассчитывать важный параметр конвекции – максимальную конвективную скорость, а также диагностировать интенсивность ливневых осадков, града, почасовое количество осадков, что обеспечивает уточнение их прогноза.

Диагностирование по данным сети ДМРЛ-С максимальной конвективной скорости позволяет определять параметр конвекции с разрешением по площади около 4 км и интервалом 10 минут. Аналогично на практике можно уточнять прогнозы сильных осадков, прогнозируемых любым другим подходом, что практически значимо, так как упомянутые методы рекомендованы со статусом дополнительных или консультативных для синоптиков. Дополнительно с подходами уточнения прогнозов сильных осадков можно ознакомиться в [7, 8].

Работа выполнена в рамках исследований по плану ЦНТП Росгидромета НИТР 1.1.5.

Список литературы

1. *Алексеева А.А.* Условия формирования и краткосрочный прогноз сильных ливней и града на ЕТ СНГ: Дис. ... канд. геогр. наук. М., 1993. 187 с.
2. *Алексеева А.А.* Исследование условий формирования экстремальных осадков на Европейской территории бывшего СССР // Труды Гидрометцентра России. 1996. Вып. 328. С. 115-124.
3. *Алексеева А.А.* Методы прогноза максимального количества осадков в зонах активной конвекции и альтернативного прогноза сильных ливней и шквалов // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. Информационный сборник № 34. 2006. С. 49-69.
4. *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 // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. Информационный сборник № 39. 2012. С. 43-53.
5. *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.
6. *Алексеева А.А., Песков Б.Е.* Оценка максимальной скорости конвективного потока, характеристик ливневых осадков и града по радиолокационной информации // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 360. С. 135-148.
7. *Песков Б.Е., Алексеева А.А., Никифорова А.Е.* Усовершенствование метода прогноза летних осадков // Метеорология и гидрология. 2008. № 10. С. 52-61.
8. *Песков Б.Е., Дмитриева Т.Г.* Уточнение мезомасштабного численного прогноза сильных ливней // Метеорология и гидрология. 2010. № 9. С. 5-16.
9. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть I. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 703 с.

References

1. *Alekseeva A.A.* Usloviya formirovaniya i kratkosrochnyy prognoz sil'nyh livney i grada na ET SNG. *Dis. ... kand. geogr. nauk.* Moscow, 1993, 187 p. [in Russ.].
2. *Alekseeva A.A.* Issledovanie uslovii formirovaniya ekstremal'nyh osadkov na Evropeiskoi territorii byvshego SSSR. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 1996, vol. 328, pp. 115-124 [in Russ.].
3. *Alekseeva A.A.* Metody prognoza maksimal'nogo kolichestva osadkov v zonah aktivnoi konvekcii i al'ternativnogo prognoza sil'nyh livnei i shkvalov. *Rezul'taty ispytaniya novyh i usovershenstvovannyh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informacionnyi sbornik*, 2006, vol. 34, pp. 49-69 [in Russ.].
4. *Alekseeva A.A., Losev V.M., Bagrov A.N.* Rezul'taty ispytaniya avtomatizirovannogo metoda prognoza osadkov s detalizaciei intensivnosti v trekh gradaciyah (ot 11 do 34, ot 35 do 49, 50 mm/12 ch i bolee) na osnove vyhodnyh dannyh regional'noi modeli s zablagovremennost'yu 12 i 24 ch. *Rezul'taty ispytaniya novyh i usovershenstvovannyh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informacionnyi sbornik*, 2012, vol. 39, pp. 49-60 [in Russ.].
5. *Alekseeva A.A., Losev V.M., Peskov B.E., Vasil'ev E.V., Nikiforova A.E.* Prognoz razvitiya zon aktivnoi konvekcii s osobo opasnymi yavleniyami na osnove regional'noi modeli Gidromettsentra Rossii. *80 let Gidromettsentru Rossii.* Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 147-159 [in Russ.].
6. *Alekseeva A.A., Peskov B.E.* Assessment of the maximum speed of convective flow, characteristics of heavy rain and hail using radar information. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 360, pp. 135-148 [in Russ.].
7. *Peskov B.E., Alekseeva A.A., Nikiforova A.E.* Enhancement of the method of summer precipitation forecasting. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2008, vol. 33, no. 10, pp. 644–650. DOI:10.3103/S1068373908100051.
8. *Peskov B.E., Dmitrieva T.G.* Specifying the mesoscale numerical forecast of heavy showers. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2010, vol. 35, no. 9, pp. 581–589. DOI: 10.3103/S1068373910090013.
9. *Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam pogody. Chast' 1.* Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1986, 702 p. [in Russ.].

*Поступила 28.06.2021; одобрена после рецензирования 14.09.2021;
принята в печать 28.09.2021.*

*Submitted 28.06.2021; approved after reviewing 14.09.2021;
accepted for publication 28.09.2021.*